

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКИРУСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
Факультег(ННІ) енергетики, автоматики і енергозбереження

УДК 681.3:519.711.3:517.958:621.313

ПОГОДЖЕНО  
Декан факультету(Директор ННІ)  
(назва факультету(ННІ))

(підпис) (ПІБ)  
«\_»\_ 202\_р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
(назва кафедри)

(підпис) (ПІБ)  
«\_»\_ 202\_р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему: Дослідження режимів роботи двигуна середньої потужності з використанням перетворювача частоти.  
Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма  
Магістерська програма  
Орієнтація освітньої програми

Керівник магістерської роботи

Доцент  
(науковий ступінь та вчене звання)

Виконав  
(підпис)

Сорокін Д. С.  
(ПІБ)

Сергеев М. А.  
(ПІБ студента)

КИЇВ-2022

ВСТУП.....	4
Перелік умовних позначень.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Режими роботи двигуна середньої потужності.....	7
1.2 Моделювання роботи двигунів.....	13
1.3 Моделювання приводу.....	15
1.4 Розрахунок електропривода.....	22
РОЗДІЛ 2. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ.....	25
2.1 Безпосередній перетворювач частоти.....	25
2.2 Загальні відомості про перетворювач частоти.....	29
2.3 Класифікація перетворювачів частоти.....	32
2.4 Загальні відомості про геометричний підхід.....	42
2.5 Трифазний матричний перетворювач частоти.....	44
2.6 Системи керування.....	50
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	66
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

НУБІП України

НУБІП України

## ВСТУП

# НУБІП України

Сучасний електропривід – це електромеханічна система, що включає силовий перетворювач, електродвигун, передавальний механізм і систему керування, яка призначена для приведення в рух робочих органів машин і механізмів. Він є основний споживач електроенергії, тобто більше 60% усієї електроенергії, яка виробляється в країні перетворюється на механічну роботу за допомогою електропривода. За останні роки гострою стала проблема економії електроенергії. Ця проблема ефективно розв'язується за допомогою удосконалення електрозбереження в електроприводі.

# НУБІП України

У зв'язку з недостатньою вивченістю теплових процесів в електродвигунах та відсутністю надійних інженерних методів розрахунку нагрівання нових конструкцій дане дослідження в першу чергу стосується моделювання теплових процесів у таких машинах.

# НУБІП України

У роботі розглядається проблема підігріву електродвигуна з сорочкою як найбільш поширеного і характерного типу замкнутих асинхронних електродвигунів.

# НУБІП України

Найефективнішим і в більшості випадків практично єдиним способом управління швидкістю двигуна змінного струму є регулювання частоти. Перетворювачі електричних машин з регульованою частотою через ряд властивих їм недоліків (висока встановлена потужність приладів, низький ККД, інерційність тощо) не отримали широкого поширення.

# НУБІП України

Основною частиною регульованого електроприводу є керований перетворювач потужності, який забезпечує плавне регулювання швидкості електродвигунів шляхом перетворення цих значень напруги і встановлення частоти мережі на змінне значення. Перетворювачі частоти містять принципи конструкції, критерії вибору та захисні функції. Частотні перетворювачі не

# НУБІП України

дозволяють змінювати швидкість обертання електродвигуна на поточне значення.

Дуже важливо підібрати правильний перетворювач, від якого залежить ефективність і термін служби перетворювача частоти і всього електроприводу в цілому. Для захисту двигуна необхідно правильно підібрати потужність гідротрансформатора. Якщо потужність інвертора занадто висока, двигун не

буде захищений. З іншого боку, якщо потужність перетворювача мала, він не зможе забезпечити необхідний динамічний режим роботи і може вийти з ладу через перевантаження. Правильна експлуатація також впливає на термін

служби перетворювача. При виборі інвертора слід враховувати не тільки потужність двигуна, але і діапазон робочих обертів двигуна, діапазон робочих

моментів, характер навантаження і щільність.

Значно перспективнішими є вентильні перетворювачі частоти, які завдяки своїй раціональній конструкції не мають електромеханічних дефектів.

Розробка напівпровідникових перетворювачів для живлення двигунів змінного струму з регульованою вихідною напругою і частотою відбувається за двома напрямками:

- вентильні перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму та автономним інвертором;

- вентильні перетворювачі без зв'язку постійного струму з прямим підключенням до ланцюгів мережі та навантаження.

У перетворювачах першого типу при живленні від промислової мережі змінного струму необхідними елементами є випрямляч і автономний інвертор.

Частотне регулювання вихідної напруги здійснюється інвертором, а напруги - випрямлячем. Поді обидві функції виконує інвертор, а випрямляч некерований.

Відома велика кількість схем перетворювачів частоти з проміжною ланкою постійного струму.

У перетворювачах другого типу енергія подається безпосередньо від мережі змінного струму без непрямого випрямлення. При використанні прямого перетворювача з системою управління неважко отримати вихідний струм, схожий на синусоїдальну форму, що може бути особливо корисно при роботі з двигунами середньої та великої потужності. Але перетворювачі частоти без зв'язку постійного струму також мають деякі недоліки. Зокрема, вони споживають значну реактивну потужність з мережі. Характерним недоліком, що випливає з самого принципу роботи перетворювача, є обмеження верхньої межі робочої частоти, що становить половину частоти напруги живлення.

Оскільки більшість двигунів у промисловості виготовляються на частоті 50 Гц, у цій роботі для тестування були обрані автономний інвертор напруги з широтно-імпульсною модуляцією та асинхронний двигун із короткозамкненим ротором.

Враховуючи, що вихідна напруга автономного інвертора не є чисто синусоїдальною, а отже струми статора і ротора пульсуючі, перевірте, чи не перегрівається двигун за таких умов.

#### **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

ПЧ - перетворювач частоти

БКЧ - безпосередній перетворювач частоти

МПЧ - матричний перетворювач частоти

ДПЧ - дволанковий перетворювач частоти

АІ - автономний інвертор

АІС - автономний інвертор струму

ККД - коефіцієнт корисної дії

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ДБЖ - джерело безперебійного живлення

СК - система керування МК - мікроконтролер

# НУБІП України

## 1.1 Режими роботи двигуна середньої потужності

НУБІП України Сучасний електропривод споживає до 60% всієї електроенергії, виробленої для промисловості. Проблема економії електроенергії в електроприводі залишається актуальною. Ми також знаємо, що асинхронний

електропривод споживає до 90% електроенергії, споживаної всіма типами електроприводів. Тому дуже актуальною є розробка методів оцінки та контролю ефективності використання асинхронних двигунів у промисловості та побуті. В даний час в різних галузях промисловості широко

використовується система «перетворювач частоти - асинхронний електродвигун» (ПЧ-АД), що дозволяє регулювати частоту обертання асинхронного двигуна в широких межах. Силкові напівпровідники, які лежать в основі частотного перетворювача, стають дешевшими та складнішими, що, у свою чергу, сприяє їх широкому використанню. Очікується, що використання системи IF-AD заощадить 10-70% електроенергії залежно від

типу навантаження та умов застосування.

НУБІП України Машини постійного струму мають властивість оборотності, тобто можуть працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому при підключенні машини постійного струму до джерела постійного струму в обмотці збудження і обмотці якоря машини виникнуть струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент  $M$ , який не гальмує, як це було в генераторі, а обертається.

НУБІП України Номінальний режим роботи електричної машини - це режим роботи, для якого машина розроблена заводом-виробником і який зазначений у його паспорті. Сучасні стандарти передбачають вісім номінальних режимів роботи електричних машин з позначенням від S1 до S8.

Довготривалий номінальний режим (S1) — режим роботи при постійному номінальному навантаженні, який триває протягом часу ( $t_p \geq 3T_n$ ), протягом якого підвищення температури всіх частин машини при постійній температурі навколишнього середовища досягає певного значення  $t_{ust}$ .

Прикладами механізмів з таким технологічним режимом є відцентрові насоси з постійними значеннями висоти всмоктування, тиску в напірному трубопроводі і потужності, компресорні та вентиляторні установки, конвеєри з постійною масою матеріалу, що транспортується, зерноочисні машини, силосорізки, металорізки, різальні машини, установки безперервного транспорту.

Короткочасний номінальний режим роботи (S2) — режим, при якому періоди незмінного номінального навантаження машини чергуються з періодами відключення її з електромережі, причому тривалість періоду роботи ( $t_p < 3T_n$ ) настільки мала, що машина не встигає нагрітися до ustalеної температури  $t_{ust}$ , а за період паузи охолоджується до температури охолоджуючого середовища.

Режим S2 характеризується тривалістю робочого періоду. Стандартна тривалість робочого періоду  $t_p$ : 10, 30, 60, 90 хв. Але умови виробництва вимагають ширшої номенклатури, тому налагоджено випуск електричних машин і з іншою тривалістю роботи, наприклад, 1; 2,5; 5; 8; 13; 18 хв та ін.

У короткочасному режимі працюють приводи ЕД конвеєрів для роздавання кормів, прибирання гною, перевертання лотків в інкубаторі та ін., якщо час роботи машини перевищує 90 хвилин, режим роботи вважається тривалим.

Під час роботи електротехнічних пристроїв виникають наступні режими роботи: Тривалий - при якому температура приладу досягає постійного значення і пристрій досить довго знаходиться під навантаженням при цій температурі; переривчасто-тривалий - режим роботи, при якому пристрій залишається під навантаженням при постійній температурі протягом часу, обмеженого технічними умовами; короткочасний - режим роботи, при якому



період навантаження змінюється перервою, час якої достатній для досягнення приладом температури холодного стану.

Трифазні асинхронні двигуни загального призначення серії 4AM випускаються з висотою осі обертання від 50 до 250 мм. Порівняно з двигунами серії 4A вони мають на 5 дБ нижчий рівень шуму, вищий пусковий момент і, у деяких стандартних розмірах, покращену енергоефективність.

Шкала потужності двигунів серії 4AM відповідає шкали потужності двигунів серії 4A, їх монтажні розміри та підключення також збігаються. У виробництві двигунів серії 4AM використовуються електротехнічна сталь з меншими

питомими втратами і більш високою магнітною проникністю, нові жароміцні і високоміцні ізоляційні матеріали, більш прогресивні технології і вдосконалена система вентиляції. Мають ступінь захисту IP44.

Двигуни цієї серії мають наступні відмінності:

1) станина з горизонтальними і вертикальними поздовжніми ребрами для двигунів з висотою осі обертання 132, 160 і частково 190 мм; , dt d-M-M J  
 $c \omega \rightarrow = \Sigma 14$

2) проміжні рами меншої довжини по відношенню до рам двигунів серії 4A для шести- і восьмиполюсних двигунів з висотою осі обертання 200 - 250 мм;

3) для двигунів з висотою осі обертання 160 і 180 мм використовуються закриті підшипники типу 180000 з двостороннім ущільненням і змащенням на весь термін служби;

4) спрощена конструкція підшипникових вузлів з пристроями дозаправки мастила;

5) збільшення до дев'яти лопатей вентиляторів чотирьох-, шести- і восьмиполюсних двигунів з висотою осі обертання 160-250 мм і зменшення діаметра корпусів вентиляторів для них. Решта характеристик двигунів серій 4AM і 4A однакові.

Умовні позначення двигунів серії 4AM розшифровуються так: 4 AM X  
X X X X X X X X X X X X X

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10  
НУВБІП УКРАЇНИ

1 - ряд;  
2 - виконання за способом захисту від дії навколишнього середовища:  
Н - захищений; наявність цього знака свідчить про закриті повітродувки;

3 - виконання за матеріалом ліжка і покривала:  
А - алюмінієва рама і кришки;  
Х - рама з алюмінію, опорні пластини - чавун; показує знаки означає, що рама і диски чавунні або сталеві;

4 - значення електричної модифікації:  
С - з підвищеним ковзанням;  
Р - з підвищеним пусковим моментом;  
К - з фазним ротором; Б - вбудований;

5 - висота осі обертання, мм (дві або три цифри);  
6 - установчий розмір в залежності від довжини ліжка (S - короткий, М - середній, L - довгий);  
7 - довжина ланки статора (А або В) із збереженням заданого розміру.  
Відсутність букв свідчить про наявність лише однієї довжини сердечника;

8 - кількість полюсів (2, 4, 6, 8 і 10);  
9 - додатковий індекс - позначення спеціалізованої продуктивності двигуна:  
Х2 - стійкий до хімічних речовин;

С - сільськогосподарський;  
UP - захищений від пилу;  
P3 - для мотор-редукторів;  
F - з подовженим кінцем вади для моноблочних насосів;  
В - з вбудованим температурним захистом;

Е - з вбудованим електромеханічним гальмом;  
Н - низький рівень шуму;

10 – кліматичне виконання і категорія розміщення. Поряд з двигунами загального призначення основного виконання в серії 4AM передбачені модифікації та спеціалізовані виконання.

Електродвигуни серії 4AM загального призначення з висотами осі обертання 50 - 132 мм і 160 - 250 мм мають ізоляцію класу нагрівостійкості відповідно В і F. Виконання двигунів серії 4AM за способом монтажу наведено у Додатку В. Двигуни надійно працюють при умовах: висота над рівнем моря не більше 1000 м; температура навколишнього середовища  $-40 - +40^{\circ}\text{C}$ ; відносна вологість повітря при температурі  $+25^{\circ}\text{C}$  до 93 %; запиленість повітря не більше  $10 \text{ мг/м}^3$  для двигунів із ступенем захисту IP44 і не більше  $2 \text{ мг/м}^3$  – IP23, навколишнє середовище вибухобезпечне, не повинно містити струмопровідного пилу, агресивних газів у концентраціях, що руйнують метал та ізоляцію. Допускається робота при коливаннях напруги у живильній мережі в межах  $-5 - +10\%$  і частоти змінного струму  $\pm 2,5\%$  від номінальних значень.

Вибір двигуна для електроприводу залежить від типу двигуна та його номінальних даних; потужність, номінальні значення напруги і частоти обертання, перевантаження і т. д. Правильний підбір приводного двигуна забезпечує тривалу надійну роботу електроприводів у всіх заданих режимах. Вибір двигуна пов'язаний з виконанням ряду вимог, що визначаються параметрами живильної мережі, способом монтажу двигуна, зовнішніми умовами його роботи і режимом роботи електропривода.

Параметри електромережі визначають вибір типу двигуна (постійний або змінний струм, однофазний або трифазний) і його номінальну напругу. Спосіб монтажу та зовнішні умови експлуатації визначають конструкцію двигуна (ножний двигун або фланцеве кріплення, закрите або захищене виконання) та його кліматичне виконання (для помірного, холодного, тропічного клімату тощо). Режим роботи електроприводу визначає вимоги до динамічних і статичних властивостей двигуна.

Вимоги до динамічних властивостей двигуна залежать від частоти пусків і гальмувань, характеру додавання і зняття навантажень двигуна. Наприклад, для частих пусків і гальмувань потрібен двигун з малим моментом інерції ротора (конструкції), тобто з малим моментом маховика  $GD^2$ , де  $G$  і  $D$  - маса ротора (конструкції) і його зовнішній діаметр відповідно.

Статичні властивості двигуна оцінюють на підставі механічних характеристик, тобто залежності частоти обертання  $n$  від електромагнітного моменту  $M$  або струму якоря  $I_a$ . За типом механічних властивостей всі електродвигуни діляться на три групи:

1) електродвигуни з абсолютно жорсткими механічними характеристиками, у вигляді прямої лінії, паралельної осі абсцис. Такі механічні характеристики мають синхронні двигуни, у яких частота обертання залишається постійною у всьому діапазоні допустимих моментів навантаження;

2) електродвигуни з жорсткими механічними характеристиками, у яких збільшення моментного навантаження на вал супроводжується незначним зниженням частоти обертання. Це характеристика асинхронних двигунів загального призначення та двигунів постійного струму з незалежним збудженням (паралельно);

3) електродвигуни з м'якими механічними характеристиками, у яких при збільшенні частоти навантаження частота навантаження об'єму частоти навантаження. Такими характеристиками володіють асинхронні двигуни з підвищеним активним опором в обмотці колеса. Наприклад, асинхронні приводи, двигуни постійного струму з прогресивним збудженням і паралельним збудженням з додатковим резистором у ланцюзі якоря.

Вибір типу двигуна слід починати з розгляду можливості використання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, оскільки ці двигуни є найпростішими за конструкцією, надійними та мають високі енергетичні показники. Недоліки цих моторів: занижений крутний момент і

великий пусковий струм, що у 5-7 разів перевищує номінальне значення робочого струму. У електроприводі великої потужності виправдовується застосування трифазних синхронних двигунів, що мають найбільш високі енергетичні показники (ККД і коефіцієнт потужності). При необхідності

регулювання частоти обертання вирішується питання про можливість використання трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, який взаємодіє з регульованим перетворювачем частоти, трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором або постійного струму. Двигун з

незалежним збудженням в електроприводі повинен бути вирішений. Основні

недоліки двигунів постійного струму: наявність джерел постійного струму, висока вартість, необхідність систематичного обслуговування робочого процесу, знижена надійність через частину неполадок в щітково-

колекторному вузлі, неможливість установки у вибухонебезпечних і пожежонебезпечних приміщеннях. -небезпечне середовище, радіоперешкоди

прийому, усунення яких. вибір спеціальних заходів. Однак двигуни постійного струму перевершують короткозамкнені асинхронні двигуни за керуваними і пусковими властивостями.

## 1.2 Моделювання роботи двигунів

Принцип роботи експериментальної установки. Безреостатний (прямий) режим прямого пуску є найважливішим режимом роботи двигунів постійного

струму. Це складний електромеханічний процес, що супроводжується

великими стрибками струму в обмотці якоря, різкою зміною швидкості і, як наслідок, виникненням високих механічних навантажень, погіршенням комутації та теплового стану машини. Зазначені обставини обмежують

застосування прямого пуску в машинах потужністю до 30 кВт. Найбільш

сприятливі умови у випадку подачі напруги на обмотку якоря після того, як зростання струму досягло сталого значення, коли запускається процес математичного розв'язання перехідного процесу. Іншою важливою

необхідністю прямого пускового випробування є його безпосередній зв'язок із забезпеченням електромеханічної швидкості електричної машини як елемента електромеханічної системи. Електромеханічна швидкість збільшується за рахунок електромагнітної та електромеханічної постійних часу, пускового моменту, пускового струму та енергетичної потужності джерел живлення.

Спочатку подається напруга на обмотку збудження, після досягнення струмом збудження усталеного значення до джерела напруги підключається обмотка якоря.

1) до моменту замикаання ключа струм збудження і основний магнітний потік досягли сталих значень;

2) щітки встановлені на геометричній нейтралі, поперечна і комутаційна реакції якоря відсутні протягом всього перехідного процесу, величина магнітного потоку залишається незмінною;

3) індуктивність і опір якорного кола постійні;

4) струм збудження набагато менший струму якоря

Структурна схема універсального електроприводу з частотною модуляцією на основі датчика швидкості; перетворювач частоти (ПЧ), що включає трифазний некерований випрямляч, трифазний інвертор імпульсів струму або напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), датчики струму і напруги, джерело живлення, плату управління і мікропроцесорну систему управління (СМ). Вхідний ВЧ-фільтр, вхідний дросель, вихідний дросель можуть підключатися до скла ПЧ або бути зовнішніми. Також обов'язковим компонентом електроприводу є захист. деякі компоненти безпеки включені у відповідність інвертора, забезпечуючи захист випрямляча та інвертора, та інші (плавкі запобіжники, автомати і ін.) - є зовнішніми.

Частотний перетворювач забезпечує ефективне регулювання амплітуди і частоти напруги живлення, що підводиться до статорні обмотки електродвигуна. Випрямляч (ланка постійного струму) виконаний на некерованих діодах і містить в своєму складі фільтр. Змінна напруга мережі живлення (3-380 В, 50 Гц) перетвориться в напругу постійного струму.

Идентифікація електромеханічних систем дозволяє передбачити хід електромагнітних і механічних систем. (Відомі моделі DP\$ZZZ, які враховують розміщення шунтової обмотки збудження паралельно напрузі.

Такі моделі досить просто моделювати, оскільки обмотка збудження та обмотка якоря не залежать від напруги. Але інші літературні джерела, де шунтова обмотка вбудована в паралельний) Спосіб роботи полягає в підвищенні достовірності опису електромеханічних процесів у ДПСЗЗ при математичному та комп'ютерному моделюванні та розширенні сфери застосування Matlab PPP на системи з ДПСЗЗ.

### 1.3 Моделювання приводу

У процесі створення моделі досліджуваної системи були проведені розрахунки датчика інтенсивності, за допомогою якого здійснювався контрольований розгін двигуна до заданої швидкості за заданий час.

Насос — це гідравлічна машина, призначена для створення природного потоку середовища, який перетворює механічну енергію приводу насоса в кінетичну енергію та енергію тиску рідини. Насоси Watomo приводяться в рух асинхронними електродвигунами.

У сталевих листах, комірках статора і ротора, спричинені гістерезисом і вихровими струмами, в обмотках статора і ротора. Усі втрати енергії вивільняються як втрачене тепло до того, як електродвигун нагріється.

Температура нагріву з часом підвищується нерівномірно. Спочатку тепло майже повністю використовується для підвищення температури двигуна, лише невелика частина виділяється в навколишнє середовище. Тому його температура в цей час різко підвищується. Коли різниця температур (різниця між температурою двигуна та температурою навколишнього повітря) збільшується, передача тепла в навколишнє середовище збільшується, тому підвищення температури сповільнюється, і настає момент, коли все тепло, що виділяється в двигун, виділяється в навколишнє середовище. Така

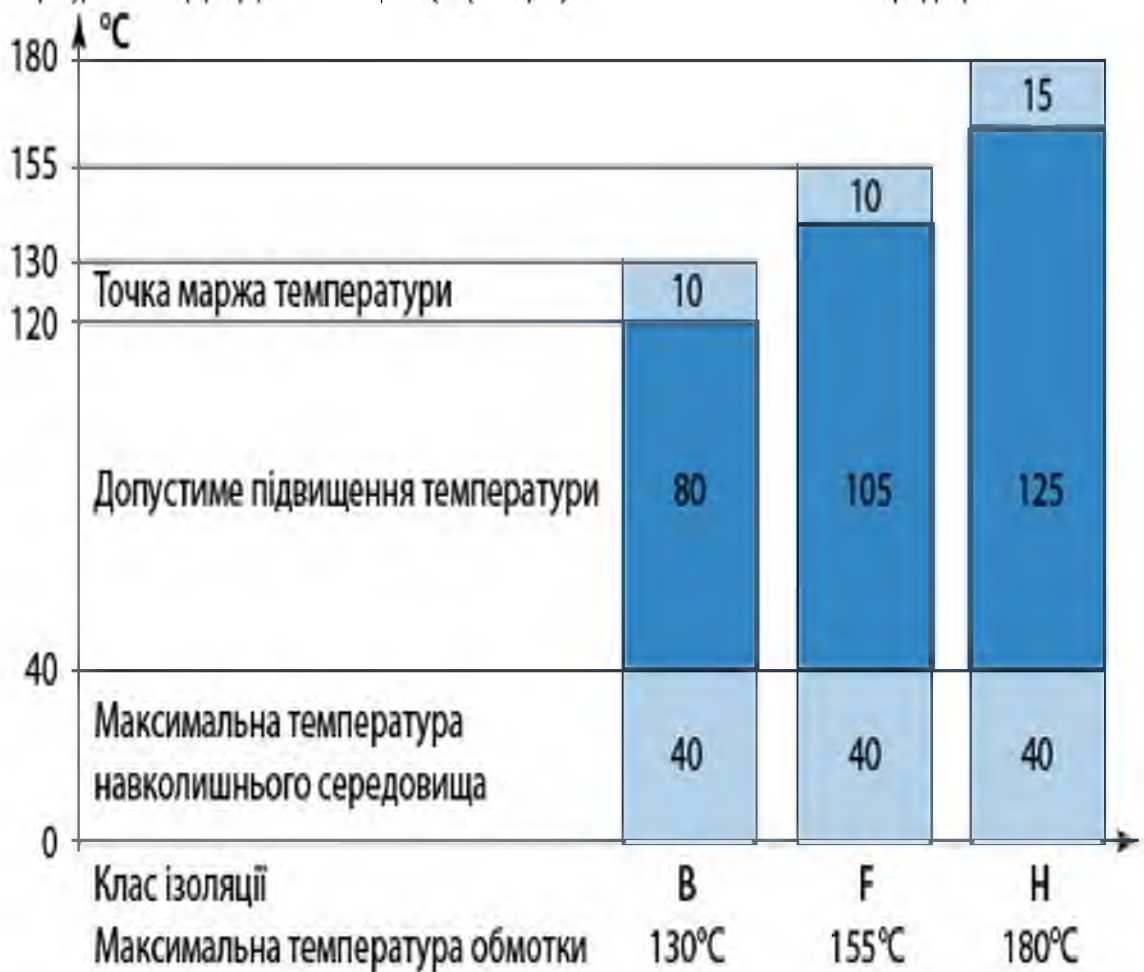
температура двигуна називається постійною. В електродвигунах малої і середньої потужності постійна температура встановлюється через півтори-дві години після початку роботи.

Допустима температура нагрівання двигуна залежить від теплостійкості його ізоляції. Розділяють сім класів теплостійкості ізоляції електродвигуна: У, А, Е, В, F, H і С.

До класу U відносяться волокнисті матеріали з бавовни, целюлози і натурального шовку. Найвища допустима температура їх нагрівання становить 90 °С. Ці ж матеріали, але просочені рідким ізоляційним матеріалом

(трансформаторне масло, масляний лак, бітумні компаунди) відносяться до класу А і допускають нагрівання до 105 °С

До класу Е відносяться синтетичні, органічні ізоляційні матеріали (плівки, волокна, смоли, суміші), максимально допустима температура нагріву яких становить 120 °С





Ізолоючі матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, просочені органічними лаками і смолами, належать до класу В, їх гранично допустима температура нагрівання становить  $130^{\circ}\text{C}$ . Ці ж матеріали з синтетичними зв'язуючими і просочувальними сполуками входять до класу F і допускають

температуру нагрівання  $155^{\circ}\text{C}$ . Якщо в матеріалах на основі слюди, азбесту і скловолокна застосовуються кремнійорганічні сполуки, то вони належать до класу H і мають гранично допустиму температуру нагрівання  $180^{\circ}\text{C}$ .

До класу С входять слюда, скло, кварц та керамічні матеріали з неорганічними сполуками. Гранично допустима температура нагрівання їх не обмежується (понад  $180^{\circ}\text{C}$ ).

У електричних двигунах використовують ізоляційні матеріали класу А, Е, В і F. Насоси Wafoto представлені з електродвигунами виготовленими з ізоляцією обмоток статора класу В та F.

Значення встановленої температури двигуна залежить від навантаження та умов охолодження. При сильному навантаженні за одиницю часу виділяється велика кількість тепла, а значить, температура двигуна більш стабільна. Допустима температура двигуна залежить від ізоляційних властивостей обмоток. Якщо двигун перевантажений, він може нагрітися до

температури, вищої за допустиму для цього класу ізоляції. При роботі з навантаженням, що відповідає номінальній потужності, постійна температура двигуна дорівнює допустимій температурі. Температура обмотки двигуна при номінальному навантаженні повинна бути на  $20-25^{\circ}\text{C}$  нижче гранично

допустимого значення. Значно нижча температура двигуна відповідає його роботі з невеликим навантаженням на вал. При цьому ККД двигуна і його потужність невеликі.

У нормальних умовах експлуатації електродвигун може працювати 10-15 років. Якщо двигун часто перевантажується, він перегрівається, ізоляція втрачає електричну і механічну міцність, а строк служби його на кожні  $8^{\circ}\text{C}$  перевищення температури більше допустимої зменшується приблизно у два рази.

Нагрівання обмоток статора залежить від режиму роботи електродвигуна.

ГОСТ 183—66 передбачає вісім номінальних режимів роботи. Основними з них є тривалий S1, короткочасний S2 і повторно-короткочасний S3.

При тривалому режимі S1 період роботи електродвигуна настільки великий, що температура його нагрівання досягає усталеного значення. Так працюють електродвигуни вентиляторів, насосів, зерноочисних машин тощо. Зокрема насоси Watoмо комплектуються двигунами такого класу. При вимкненні двигуна з мережі його температура поступово знизиться до температури навколишнього середовища.

Короткочасна робота електродвигуна S2 характеризується чергуванням періодів роботи з перервами. Крім того, час роботи настільки короткий, що двигун не встигає прогрітися до стабільної температури, а час паузи дозволяє йому охолонути до температури навколишнього середовища. У короткочасному режимі працюють приводні двигуни підйому кришок на зрошувальних каналах, повороту лотків в інкубаторах, кормових конвеєрів та ін.

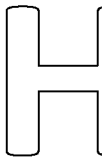
У повторюваному короткочасному режимі S3 період роботи двигуна чергується з паузами. При цьому тривалість одного робочого періоду з перервою не перевищує 10 хвилин. За такий короткий час температура двигуна не досягає заданого значення, а під час перерви не встигає опуститися до температури навколишнього середовища. У цьому режимі працюють двигуни приводів кранів, підйомників та ін.

На вході системи є аперіодичний зв'язок, який використовується для зменшення перерегулювання струму якоря при обуренні завданням.

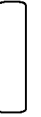
Передатна функція цієї аперіодичної ланки:

$$W(p) = \frac{1}{b_c \cdot a_c \cdot a_{TЯ} \cdot T_{TB} \cdot p + 1} = \frac{1}{2 \cdot 5,5 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot p + 1} = \frac{1}{0,22 \cdot p + 1}$$

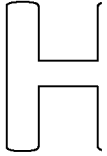
Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості:



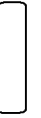
$$K_C = K_{ТГ} \cdot \frac{R_{зс}}{R_c} = 0,02 \cdot \frac{5,1 \cdot 10^4}{2,7 \cdot 10^5} = 3,778 \cdot 10^{-3}$$



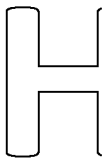
Передавальна функція регулятора швидкості:



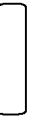
$$W_{PC}(p) = \frac{A \cdot K_{тЯ} \cdot (b_c \cdot a_c \cdot a_{тЯ} \cdot T_{TB} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c^2 \cdot a_{тЯ}^2 \cdot K_c \cdot T_{TB}^2 \cdot C_M \cdot \Phi_{MIN} \cdot p}$$



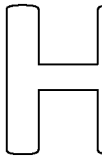
$$W_{PC}(p) = \frac{2,098 \cdot 6,095 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 5,5 \cdot 2 \cdot 0,01 \cdot p + 1)}{2 \cdot 5,5^2 \cdot 0,01^2 \cdot 3,778 \cdot 10^{-3} \cdot 38,2 \cdot 0,04 \cdot p} = \frac{20,139 \cdot p + 91,54}{p}$$



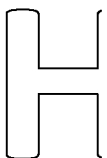
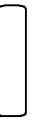
Регулятор струму якоря:



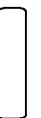
$$W_{РТЯ}(p) = \frac{K_{TB} \cdot R_{\Theta} \cdot (T_{\Theta} \cdot p + 1)}{a_{тЯ} \cdot T_{TB} \cdot K_{\Phi} \cdot K_{тЯ} \cdot C_E \cdot n_{MAX} \cdot p}$$



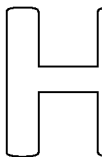
$$W_{РТЯ}(p) = \frac{1,111 \cdot 0,014 \cdot (8,085 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,01 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 6,095 \cdot 10^{-3} \cdot 4,25 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot p} = \frac{0,103 \cdot p + 12,734}{p}$$



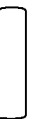
Регулятор струму збудження:



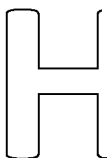
$$W_{РТВ}(p) = \frac{R_B \cdot ((T_B + T_{BT}) \cdot p + 1)}{T_{TB} \cdot K_{ВТВ} \cdot K_{TB} \cdot p} = \frac{23,932 \cdot ((0,773 + 0,077) \cdot p + 1)}{0,01 \cdot 18,578 \cdot 1,111 \cdot p} = \frac{98,547 \cdot p + 115,935}{p}$$



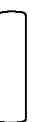
Передавальна функція ланцюга збудження:



$$W_{РТВ}(p) = \frac{T_B \cdot p + 1}{R_B \cdot ((T_B + T_{BT}) \cdot p + 1)} = \frac{0,077 \cdot p + 1}{23,932 \cdot ((0,773 + 0,077) \cdot p + 1)} = \frac{0,077 \cdot p + 1}{20,343 \cdot p + 23,932}$$



Передавальна функція якірного ланцюга:



$$W_{\text{оя}}(p) = \frac{K_{\Phi} \cdot C_E \cdot n_H}{R_{\Sigma} \cdot (T_{\text{BT}} \cdot p + 1) \cdot (T_E \cdot p + 1)} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 6.64 \cdot 800}{0,045 \cdot (0,077 \cdot p + 1) \cdot (8,085 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}$$

$$W_{\text{оя}}(p) = \frac{357,87}{6,428 \cdot 10^{-4} \cdot p^2 + 0,085 \cdot p + 1}$$

Механічна частина двигуна:

$$W_{\text{МЕХ}}(p) = \frac{C_M \Phi_M}{A \cdot p} = \frac{3,056}{2,098 \cdot p} = \frac{1,457}{p}$$

Нижче приведена на рисунку 1 Модель системи регулювання швидкості двигуна.

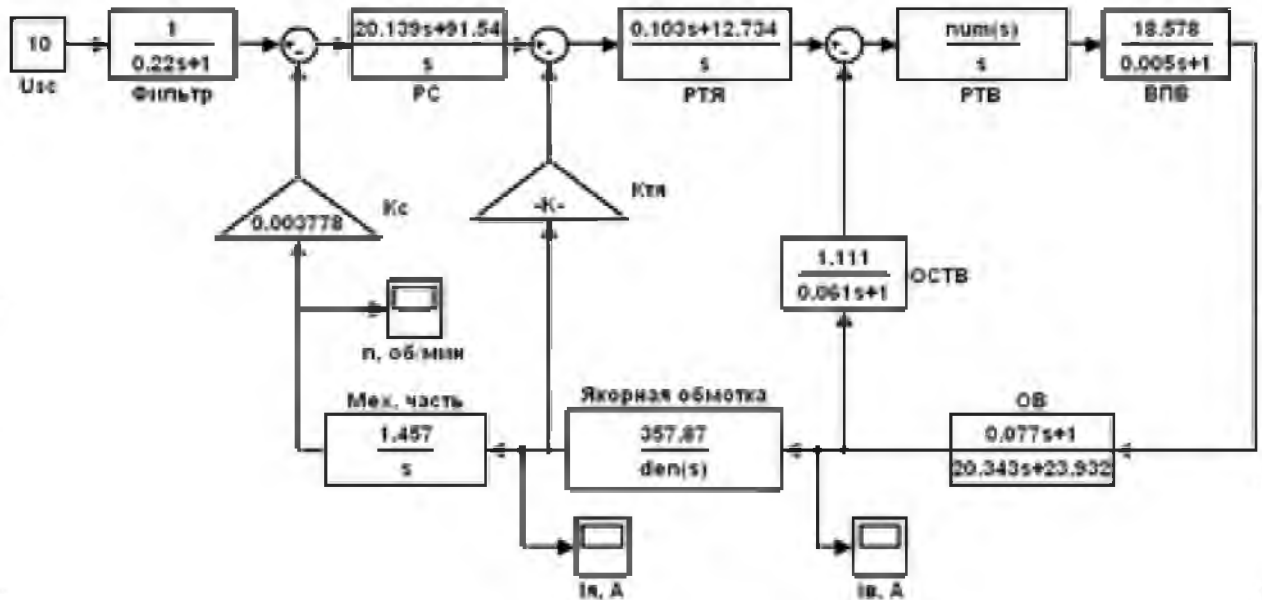


Рисунок 1 - Математична модель системи регулювання швидкості двигуна управлінням в ланцюзі збудження.

Профіль PCD має значний вплив на параметри приводу, оскільки його властивості (довжини прольотів, перепади висот опорних точок і провисання підвісного каната тощо) визначають навантаження на всі елементи «привід – тяговий канат» – система натяжного пристрою. Тому необхідно враховувати його особливості при моделюванні процесів, що відбуваються під час експлуатації ПЦД та формування динамічних навантажень, а також при

розробці рекомендацій щодо вдосконалення дороги. Тому проведення досліджень щодо обґрунтування раціональних параметрів ПЧД, і зокрема його приводу, з урахуванням профільних характеристик, є актуальним завданням з точки зору забезпечення безпеки вантажних і пасажирських перевезень, підвищення продуктивності (пропускної здатності), зниження матеріаломісткості деталей і вузлів, а також зниження енерговитрат дороги.

Використовуючи сучасні методи реєстрації зміни сили струму в часі, можна реєструвати осцилограми струму під час роботи ПЧД при різних режимах навантаження. Подальша математична обробка чисельними методами та врахування наведених залежностей дозволяє отримати діаграми периферійних зусиль. Застосування цих підходів дозволило вирішити ряд проблем, пов'язаних з математичним моделюванням навантаження елементів приводу та розробкою рекомендацій щодо раціонального профілювання РСД.

Зокрема, виявлено наявність раптової зміни (так званого стрибка) окружної сили під час проходження вагонами опор.

#### 1.4. Розрахунок електроприводу

Більше половини виробленої електроенергії використовується для живлення електроприводів. Тому визначення основних енергетичних показників і шляхів їх поліпшення має велике практичне значення. До основних енергетичних показників належать споживана потужність  $P$  і енергії, ККД -  $\eta$ , коефіцієнт потужності -  $\cos \phi$ . Ці показники залежать від режиму роботи РЕ, швидкості, напруги живлення, частоти і т. д. Потужність електроенергії, що подається з мережі на вхід РЕ, в основному використовується для здійснення руху робочого органу, зміни запасу кінетичної і потенційної енергії в механічній частині РЕ і запасу енергії в ємностях і індуктивності електричної частини. А витрата енергії розсіюється

у вигляді тепла - це добре відомо з курсу електричних машин. Вартість потужності в ЕП, що не регламентується, складається з витрат на електродвигун і механізми ЕП.

Для режиму роботи електроприводу 55 при ПВ = 40 % слід вибрати

короткозамкнений асинхронний двигун режиму 51 з паспортними даними:  $P_n = 28 \text{ кВт}$ ,  $U_n = 380/220 \text{ В}$ ,  $n_n = 965 \text{ об/хв}$ ,  $\cos \phi = 0,86$ . Потрібно визначити допустиму кількість включень двигуна, при якому він повністю

використовувався б в тепловому відношенні. Час пуску і гальмування

становить  $t_{\text{п}} = t_{\text{г}} = 1,5 \text{ с}$ , втрати потужності при пуску і гальмуванні  $\Delta P_{\text{п}} = \Delta P_{\text{г}} = 3 \Delta P_n$ , статична потужність навантаження в усталеному

режимі  $P_{\text{ст}} = 0,7 P_n$ , коефіцієнт погіршення охолодження  $\Delta = 0,5$  і

коефіцієнт втрат  $\alpha = 1$ . Побудувати спрощений розрахунковий графік руху електроприводу.

Рішення

Визначимо номінальні втрати в двигуні:

$$\Delta P_n = P_n (1 - \eta_n) / \eta_n = 28000(1 - 0,86) / 0,86 = 4558 \text{ Вт.}$$

Втрати енергії при пуску гальмуванні відповідно до заданих умов:

$$\Delta A_{\text{п}} + \Delta A_{\text{г}} = 3 \cdot 4558 \cdot 2 \cdot 1,5 = 41023 \text{ Вт} \cdot \text{с (Дж)}.$$

Втрати енергії в сталому режимі при навантаженні  $P_{\text{ст}} = 0,7 P_n$ :

$$\Delta P = \Delta P_n [\alpha + (P_{\text{ст}} / P_n)^2] = 2279[1 + 0,7^2] = 3395,7 \text{ Вт.}$$

де  $\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P / 2 = 2279 \text{ Вт}$ , так як  $\alpha = 1$

Допустима кількість включень двигуна

$$h_{\text{зм}} = 3600 \frac{(\Delta P_{\text{зм}} - \Delta P) \varepsilon + \Delta P_{\text{зм}} \beta_v (1 - \varepsilon)}{0,97(\Delta A_1 + \Delta A_2)}$$

$$= 3600 \frac{(4558 - 3395,7)0,4 + 4558 \cdot 0,5(1 - 0,4)}{0,97 \cdot 41023} = 166$$

При знайденому  $h_{\text{зм}} = 166$  час циклу складе  $t_c = 3600/h_{\text{зм}} = 21,7$  с.

Відповідно, час роботи і час паузи складуть:

$$t_p = t_c \varepsilon = 21,7 \cdot 0,4 = 8,68 \text{ с}$$

$$\text{и } t_v = t_c (1 - \varepsilon) = 21,7(1 - 0,4) = 13,02 \text{ с.}$$

Час усталеного режиму складе:  $t_{\text{зм}} = t_p - (t_v + t_c) = 5,68$  с.

На рис. 10.33 побудований спрощений розрахунковий графік руху електроприводу.

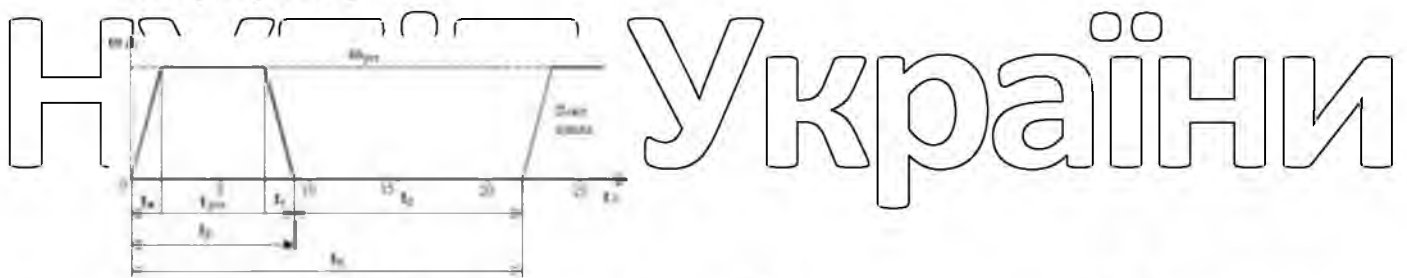


Рисунок 1.2. Спрощений розрахунковий графік руху електроприводу



# СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ СЕРЕДНЬОЇ ПІДУМОЖНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ

## 2.1 Безпосередній перетворювач частоти

Перетворювач частоти в комплекті з асинхронним електродвигуном може повністю замінити електропривод постійного струму. Основним

недоліком асинхронних електродвигунів є складність регулювання їх

швидкості традиційними методами (шляхом введення додаткових опорів в ланцюги обмоток, змінюючи напругу живлення). При живленні від мережі зі стабільною частотою двигун має постійну швидкість, близьку до синхронної,

яка завдяки високій жорсткості механічних властивостей практично не

залежить від моменту навантаження. Принцип частотного методу

регулювання швидкості асинхронного двигуна полягає в тому, що, змінюючи частоту напруги живлення, можна регулювати кутову швидкість магнітного поля статора, а отже, і частоту обертання ротора при незмінній кількості пар

полісів. Завдяки цьому механічні властивості мають високу жорсткість у

широкому діапазоні швидкостей. При цьому регулювання швидкості не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні незначні.

### Принцип частотного регулювання

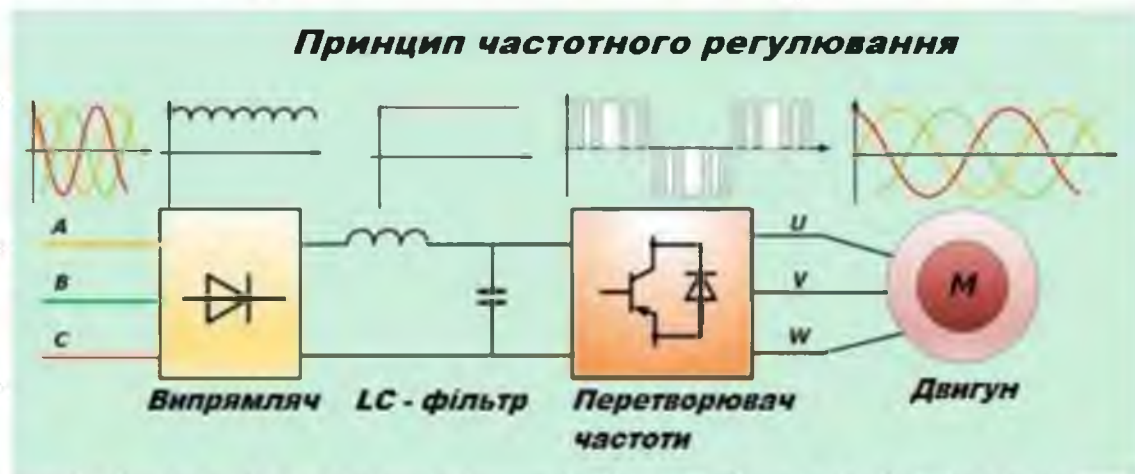


Рисунок 2. Принцип частотного регулювання



Більшість сучасних перетворювачів частоти мають два ступені перетворення енергії і складаються з випрямляча, згладжуючого фільтра та інвертора (рис. 1). Випрямляч перетворює енергію змінного струму, фільтр згладжує пульсації вихідної напруги випрямляча, а інвертор виконує зворотне перетворення, перетворюючи енергію постійного струму в енергію змінного струму, але з регулюванням напруги та частоти.

Для отримання високих енергетичних показників асинхронного двигуна - коефіцієнтів потужності, корисної роботи, перевантажувальної здатності - необхідно змінювати амплітуду напруги одночасно з частотою. Закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження. Контроль частоти обертання виконавчих механізмів може здійснюватися різними пристроями, але в даний час використовуються тільки статичні перетворювачі частоти.

Останні на даний момент є найбільш досконалими пристроями для управління асинхронним приводом. До недавнього часу розвиток частотно-регульованого електроприводу стримувався високою вартістю перетворювачів частоти. Але після виробництва силових схем з IGBT розробка високопродуктивних мікропроцесорних систем управління дозволила різним компаніям Європи, США, Японії та Росії створювати сучасні перетворювачі частоти за доступною

ціною. Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовані за схемою подвійного перетворення. Технологічні вимоги до електроприводів ліфтових механізмів вимагають впровадження гальмівних режимів роботи електроприводу. Це стосується і регульованих електроприводів змінного струму за системою IF-AD. Сучасні перетворювачі частоти на основі використання силових транзисторів IGBT з використанням мікропроцесорних програмованих пристроїв керування пропонують кілька можливих варіантів реалізації цього режиму. Так, можливе використання резистивного гальмування, тобто гальмування з розсіюванням енергії в двигуні та

додатковому гальмівному резисторі. Проте з технічних та економічних причин бажано застосовувати рекуперативне гальмування, тобто гальмування за допомогою енергії, що повертається в мережу живлення. Завдяки такій

конструкції створюються електроприводи в діапазоні потужностей від 1 до 500 кВт. Це пояснюється тим, що система з некерованим випрямлячем не споживає реактивної потужності, а вищі гармоніки струму не перевищують 30% першої гармоніки. Таким чином, втрати потужності в АД збільшуються в середньому лише на 5-8% порівняно з постачанням від ідеальної синусоїдальної мережі. Тому загальний ККД перетворювача частоти в цьому випадку досягає 95-97%. Рекуперативне гальмування виявляється особливо вигідним при високій потужності електроприводу. При цьому реалізація рекуперативного гальмування АД вимагає додаткових капітальних витрат, але при цьому щорічні експлуатаційні витрати зменшуються за рахунок рекуперації частини енергії гальмування; необхідність такого додаткового рекуператора в кожному конкретному випадку визначається техніко-економічним розрахунком. Тому рекуперативне гальмування доцільно застосувати для тих кранових електроприводів, які працюють здебільшого в перехідних режимах (механізми повороту), або для тих механізмів підйому, які часто спускають вантаж, близький до номінального. Режим рекуперативного гальмування електропривода з віддачею енергії в живильну мережу реалізується перетворювачами частоти серій ACS611, ACS617 і ACS800-17 фірми ABB чи аналогічними перетворювачами частоти серії SINAMICS або SIMOVERT MASTER DRIVERS VC (відрізок серії AFE) фірми SIEMENS. Ці перетворювачі мають у своєму складі два трифазних шестипульсних моста на IGBT-транзисторах і відповідні фільтри, що забезпечує надійну рекуперацію енергії асинхронного електродвигуна в мережу. Незважаючи на все ще значні витрати на сучасні перетворювачі частоти, у багатьох випадках можна очікувати досить швидкого повернення інвестицій завдяки енергозбереженню та іншим елементам ефективності. Використання цього обладнання є прибутковим активом для інвестицій компанії. Більшість підйомних механізмів (зокрема, підйомних механізмів) оснащені асинхронними двигунами з фазним ротором. Процес запуску відповідає характеристикам керування реостатом, де ступені опору дискретно

виводяться з ротора. У багатьох випадках кран гальмується в протипусковому режимі. Часте перемикання з режиму руху на режим гальмування при наближенні до заданої точки зупинки механізму пересування крана

призводить до виникнення максимальних ударних моментів двигуна, його прискорена відмова може скоротити період безвідмовної роботи. Режим

зниженої швидкості створює опір ротора, що пов'язано зі збільшенням ковзання двигуна та збільшенням електричних втрат. Системи PN-AD, що забезпечують плавний пуск асинхронних двигунів (системи Soft-Start), також

можуть бути використані для зниження енергоспоживання при роботі двигуна

без навантаження в зоні номінальних обертів. При цьому за рахунок збільшення кута відкриття клапанів, що входять до ГІН, перша гармоніка напруги зменшується і асинхронний двигун в даний момент статичного

навантаження працює на регулюючій характеристиці зі швидкістю, трохи

меншою за природна характеристика. Такий режим призводить до зниження

загальних втрат АД і споживаної активної потужності. У роботі проводяться дослідження щодо зменшення споживання електроенергії. Але при проведенні цих досліджень не враховуються особливості технологічного процесу

підйомних механізмів та режими їх роботи. Для обґрунтування доцільності

застосування конкретного електроприводу до ліфтових механізмів доцільно розробити автоматизовану систему порівняння електроприводів кранів з урахуванням співвідношення статичних і динамічних режимів, навантажень і

моментів інерції, а також відносний час роботи на знижених швидкостях.

Проблема полягає у відсутності конкретних рекомендацій щодо використання

альтернативних електроприводів для кранів. Актуальним завданням є визначення доцільності застосування того чи іншого електроприводу на кранах за показниками економічної ефективності. Тому, враховуючи всі

можливості конкретного альтернативного електроприводу, його переваги та

недоліки по відношенню до інших електроприводів під час роботи кранових механізмів у заданих умовах експлуатації, слід довести необхідність чи небажаність його використання.

## 2.2 Загальні відомості про перетворювач частоти

Сьогодні перетворювач частоти – це невеликий пристрій на сучасній напівпровідниковій основі, керований вбудованим мікропроцесором. Він може не тільки змінювати оберти двигуна, а й стежити за його працездатністю.

Частотний перетворювач легко працює з будь-якою системою керування технологічним процесом, його програмування просте та інтуїтивно зрозуміле, а експлуатація не представляє особливої складності. Коли перетворювач частоти підключено до витратоміра, система обробляє потік з точністю до часток відсотка. При цьому зникають такі небажані явища, як перенапруга, гідравлічні удари, обмотки двигуна не пошкоджуються ривками, пуск відбувається плавно. Найголовніше, щоб двигун використовував рівно стільки енергії, скільки йому необхідно для забезпечення заданих параметрів технологічного процесу (тиск і витрата води). Необхідна інформація про тиск в мережі надходить в перетворювач частоти від спеціального датчика.

встановленого на трубопроводі за працюючим насосом, після чого перетворювач відповідно змінює частоту, що подається на двигун, і його робочі характеристики. Схема підключення частотного перетворювача

представлена в загальному вигляді на рисунку 2.

Повний захист корпусу, в якому знаходиться перетворювач, від пилу і вологи дозволяє встановлювати такі системи в найскладніших умовах і екстремальних умовах роботи. Компоненти, необхідні для плавного регулювання, поєднані в корпусі перетворювача частоти, який можна встановити незалежно від місця розташування самого приводу в будь-якому доступному місці. Незважаючи на невеликі розміри, сучасні перетворювачі частоти характеризуються широкими експлуатаційними можливостями, які дозволяють вирішувати більшість завдань управління. Налаштований при запуску інвертор не потребує кваліфікованого обслуговування в подальшому.

Щоб виключити несанкціоноване втручання в налаштування існує спеціальний параметр, що забороняє всі зміни (у більшості виробників).

При наявності на об'єкті декількох електроприводів, що працюють в комбінованій системі, варто розглянути можливість встановлення перетворювача в комплексі з системою керування електроприводом – т.зв. станція керування електроприводом. Типова станція керування включає:

- шафа керування з комутаційними пристроями, перетворювачем частоти, додатковим програмованим логічним контролером (при необхідності для вирішення складних завдань керування), пристроями захисту та сигналізації;

- датчики контрольованих параметрів і виконавчі механізми системи керування.

Типовим прикладом інверторного застосування цього типу є станція керування насосною групою, в якій діапазон регулювання потоку дуже різноманітний і залежно від витрати працюють один, два або три насоси,

забезпечуючи заданий рівень тиску. Використовуючи наявний запас потужності вбудованого в частотний перетворювач мікроконтролера, на станціях управління реалізована можливість програмного керування групою електродвигунів для двох-трьох насосів. При цьому управління може

відбуватися в будь-якому режимі: при малих витратах заданий тиск забезпечується автоматично регульованою роботою одного насоса, при збільшенні витрат контролер контролює роботу КРУ, підключаючи другий і, якщо необхідний третій насос, забезпечення заданого рівня тиску, постійне регулювання, захист від гідравлічних ударів. Ресурс роботи кожного насосного агрегату можна програмувати з перемиканням через фіксовані проміжки часу.

Засоби та функції захисту:

- Електронний тепловий захист електродвигуна від перевантаження.
- Контроль температури охолоджувача забезпечує відключення перетворювача частоти у разі перегріву.

- Перетворювач частоти захищений від короткого замикання клем U, V, W електродвигуна.

• У разі відсутності фази електродвигуна перетворювач частоти вимикається та видає сигнал про несправність.

• Якщо фаза живлення відсутня, перетворювач частоти вимикається та видає попередження (залежно від навантаження).

• Контроль напруги в колі постійного струму забезпечує відключення перетворювача частоти у разі значного підвищення або зниження напруги в колі постійного струму.

• Перетворювач частоти захищений від короткого замикання на землю клем U, V, W електродвигуна.

Основні переваги частотного перетворювача.

-Управління електроенергією;

- Високий ККД за рахунок одноразового перетворення частоти;

-Можливість збільшити потужність після підключення додаткових інверторів.

- Подовження терміну служби обладнання промислових підприємств;

-Простота управління і відсутність необхідності обслуговування обладнання;

- І шумопоглинання при роботі двигуна;

• Стабільна робота на низьких частотах:

Незручності:

- не дуже точна опора обертання.

- сповільнена реакція на зміну режиму.

- найчастіше немає можливості контролювати крутний момент на валу

- зі збільшенням швидкості вище номінального значення крутний момент на валу двигуна зменшується (тобто коли ми піднімаємо частоту вище номінального значення 50 Гц).

Це тому, що вихідна напруга залежить від частоти. На номінальній частоті напруга дорівнює напрузі мережі і перетворювач частоти не вміє підняти її вище. Графік показує плавну частину графіка при 50 Гц. Виходячи

з вищесказаного, можна відзначити залежність моменту від частоти, яка падає за законом  $1/f$ , на діаграмі нижче вона позначена червоним кольором, а залежність потужності від частоти синім кольором.

Для кращого використання двигуна та отримання високих енергетичних показників його роботи (коефіцієнти потужності, корисної роботи та перевантажувальної здатності) необхідно одночасно з частотою регулювати напругу, що подається на двигун. Співвідношення частоти і напруги називають законом частотного регулювання. При виборі співвідношення частоти та напруги, що подається на статор асинхронного двигуна, найпоширенішою умовою є збереження перевантаження асинхронного двигуна, тобто множення критичного моменту  $M_k$  на момент статичного навантаження  $M_c$ , для будь-якої із регульованих механічних характеристик.

### 2.3 Класифікація перетворювачів частоти

Якщо врахувати роботу агрегату при витратах, менших за номінальні (вертикальні лінії А і Б), то для цих режимів раціонально працювати на зниженій частоті обертання. При цьому ефективність насоса вище, ніж при роботі на номінальній частоті обертання. Таким чином, зменшення частоти обертання відповідно до технологічного навантаження дозволяє не тільки заощадити споживану енергію за рахунок усунення гідравлічних втрат, але й отримати економічний ефект за рахунок підвищення ККД самого насоса.

Електричний струм — фізичне явище спрямованого руху електричних зарядів. Електричний струм створюється джерелом електричної енергії (генератором, акумулятором, термопарою).

За своєю природою електричний струм є:

- струм провідності (спрямований рух вільних носіїв електричного заряду в речовині або вакуумі, наприклад, рух електронів у металах);
- струм поляризації (спрямований рух зв'язаних заряджених частинок (диполів) в діелектрику внаслідок зміни його поляризації);
- перенесення струму (спрямований рух заряджених тіл, наприклад рух

іонів в електролітах і газах).

Постійний струм – це електричний струм, який не змінює напрямку з часом. Напрямок руху позитивних зарядів (напрямок, протилежний напрямку руху електронів) вважається напрямком постійного електричного струму.

Зверніть увагу на деяку некоректність у терміні постійний струм: насправді для постійного струму це насамперед значення напруги (вимірюється у вольтгах), а не значення струму (вимірюється в амперах), хоча значення струму також може бути постійним. Тому термін постійний струм слід розуміти як постійну напругу. Тоді ми будемо використовувати цей термін у цьому значенні.

Використання терміну постійний струм (як і змінний струм) підкреслює «силовий» характер цього сигналу, тобто це електричний сигнал, який передає потужність, призначену для живлення електроприладів. В інших значеннях використовуються більш точні терміни: напруга, сигнал тощо.

Прямі перетворювачі напруги (DCV) призначені для перетворення постійної напруги одного рівня в постійну напругу другого рівня з високою ефективністю. Їх іноді називають конвертерами. Вони використовуються для живлення навантажень з постійною напругою  $U_n$ , що відрізняється за величиною від напруги джерела живлення  $U_d$ .

За структурою ППН поділяється на:

1) на двофазних ППН, які складаються з автономного інвертора (AI), що перетворює постійну напругу в змінну, і випрямляча. Трансформатор, який стоїть між випрямлячем і ППН, дозволяє отримати вихідну напругу як нижче, так і вище вхідної.

2) на прямих ППН, що випускаються на базі автоматичних вимикачів.

Двофазні ППН найчастіше використовуються в джерелах живлення систем управління та автоматики і будуть розглянуті далі.

На малюнку 2а показаний графік зниження напруги ППН, а на малюнку 2б – графіки напруг на навантаженні  $u_i$  і на колекторі  $u_k$  і струмів: від джерела живлення  $i_d$ , від колектора  $i_k$ , діода  $i_d$  і навантаження  $i_t$ . Конструкції



виготовлені в припущенні, що транзистор і діод ідеальні, ємність конденсатора  $C_{\Phi} = \infty$ , а струм в колі навантаження неперервний.

Діод  $VD$  використовується для пропускання струму, який протікає, коли транзистор  $VT$  вимкнено через енергію, збережену в індуктивності навантаження. Конденсатор  $C_{\Phi}$  зменшує втрати в джерелі живлення, завдяки чому поглинання енергії з нього є більш постійним. Якщо транзистор  $VT$  включений в момент часу  $t_1$ , то на навантаження подається напруга джерела живлення (на навантаження подається імпульс напруги), а при його вимкненні в момент часу  $t_2$  протікає струм навантаження за рахунок енергії накопичена в індуктивності  $L_H$  і закрита діодом  $VD$ . У момент часу  $t_3$  процеси повторюються.

Для регулювання напруги на виході ПІН змінюється тривалість увімкненого стану транзистора. Регулювання напруги, при якому частота імпульсів до навантаження постійна, але їх тривалість змінюється, називається широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). ПІН, де використовується цей метод керування, називаються перетворювачами ширини імпульсу (ШІП).

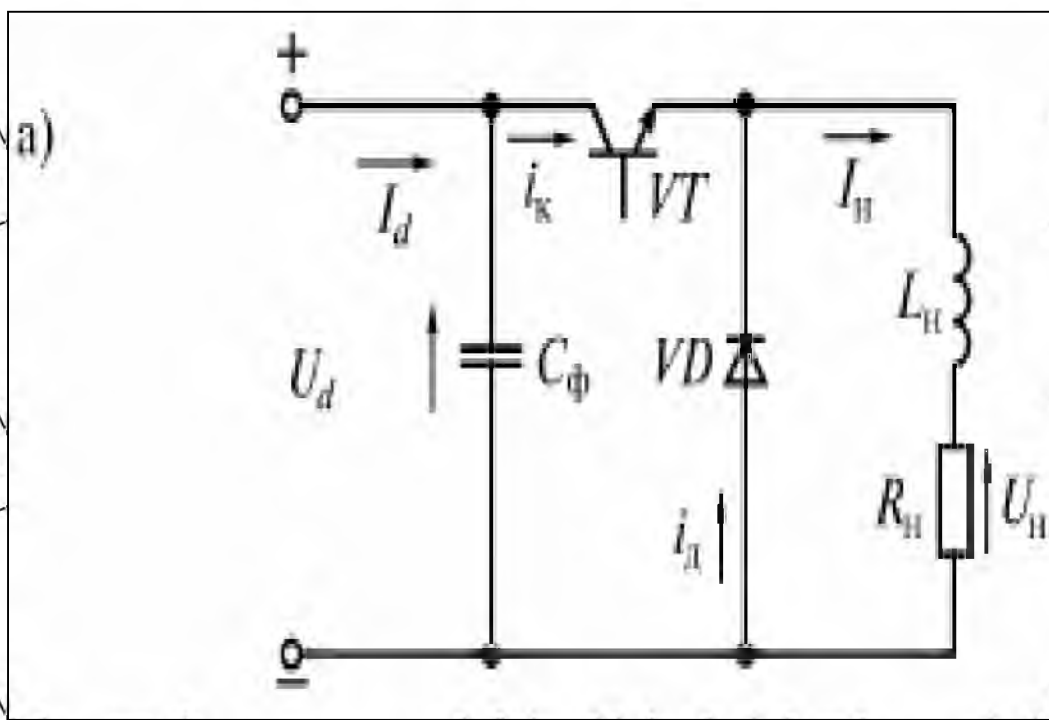


Рисунок 3 а. Схеми понижуючого ШІП

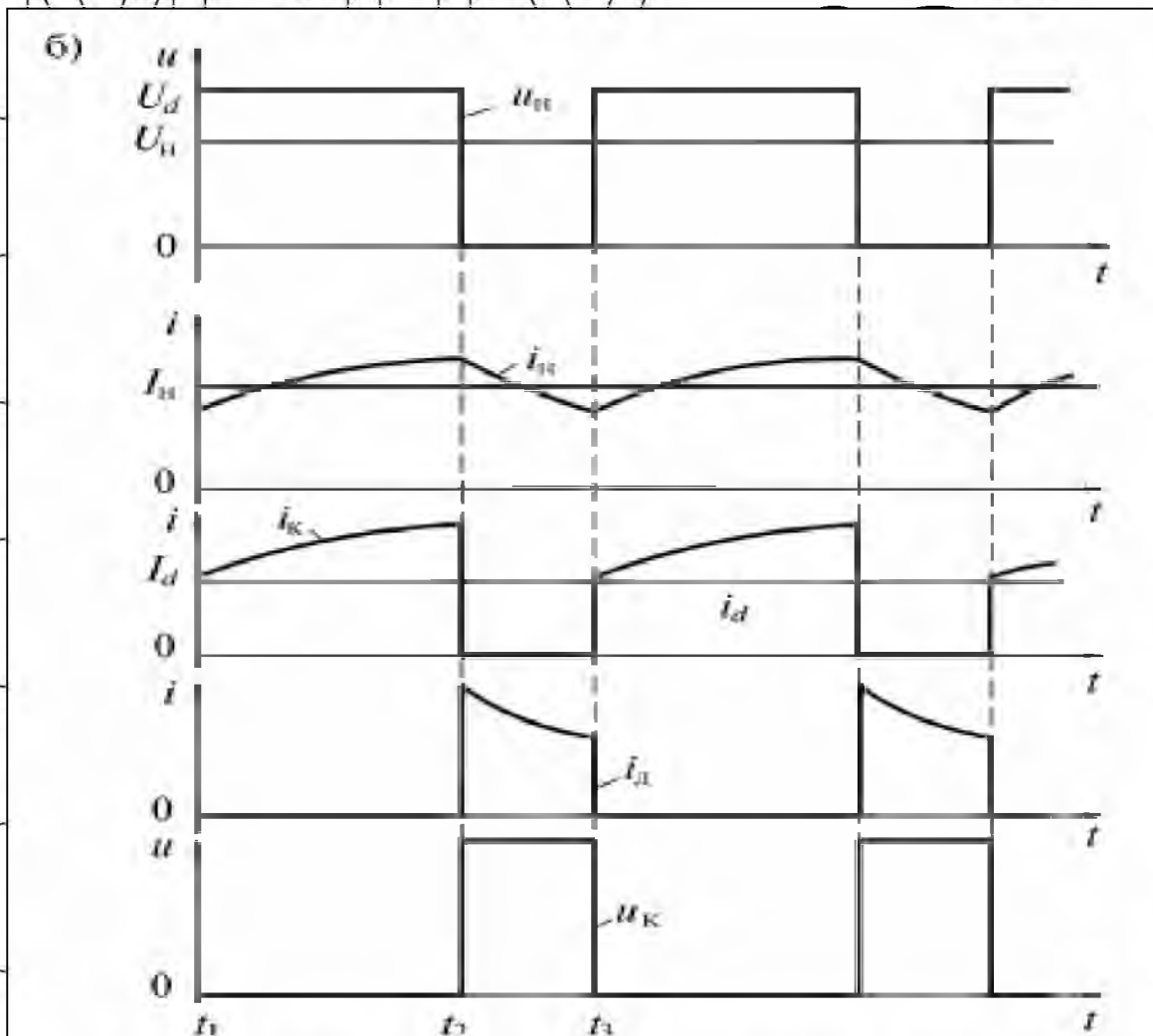


Рисунок 3 б. Схема діаграми напруг і струмів, що описують роботу ППН

Таким чином, при ШІМ частота і період руху імпульсів постійні. Можливі інші способи регулювання, при яких регулювання середнього значення напруги на виході відбувається зміною частоти руху імпульсів

постійної тривалості (частотно-імпульсна модуляція) або одночасною зміною

частоти та тривалості імпульсів (частотно-імпульсна модуляція). Найбільш

частіше застосовується ШІМ. Тому далі ми розглядаємо тільки ШІМ.

Всі наведені нижче співвідношення враховуються для тривалого струму в навантаженні, при цьому він не падає до нуля, поки струм протікає через

діод. Ширина баласту змінного струму зазвичай дуже мала, і навіть струм

холостого ходу двигуна зазвичай знаходиться за межами цієї області, тому це зазвичай не враховується при проектуванні електроприводу.

Чим більше транзистор знаходиться ввімкненому стані, тим більше середнє значення напруги на навантаженні  $U_H$

$$U_H = U_d, \quad (1.1)$$

де відносна тривалість ввімкненого стану транзистора так як не може бути більшою ніж 1, то цей ППН називається понижуючим.

В понижуючому ППН відповідає відносній тривалості імпульсів напруги, що прикладаються до навантаження, тобто

$$\gamma = \frac{t_i}{T} \quad (1.2)$$

де  $t_i$  – тривалість імпульсів напруги, що прикладаються до навантаження або тривалість включеного стану транзистора;

$T$  – період руху імпульсів.

Регулююча характеристика ППН – це залежність напруги на навантаженні від відносної тривалості ввімкненого стану транзисторів або в понижуючому ППН від відносної тривалості імпульсів напруги, що прикладаються до навантаження. Відповідно, рівняння 1.1 є рівнянням регулюючої характеристики понижуючого ППН. Тоді рівняння регулюючої характеристики понижуючого ППН в відносних одиницях (при умові що базова напруга  $U_d$ )

$$\gamma = \frac{U_H}{U_d} \quad (1.3)$$

Якщо вентилі ідеальні то ККД ППН рівний одиниці. При цьому потужність поглинена від джерела живлення, рівна потужності, виділеній в навантаженні

# НУБІП України

$$U_H I_H = U_d I_d \quad (1.4)$$

де  $I_d$  – струм, що поглинається від джерела живлення,

$I_H$  – струм навантаження.

# НУБІП України

З рівнянь (1.3) та (1.4) можна виразити струм навантаження

$$I_H = I_d \frac{U_d}{U_H} = \frac{I_d}{\gamma} \quad (1.5)$$

# НУБІП України

У відповідності з формулою 1.3 діапазон регулювання вихідної напруги понижуєчого ППН теоретично починається з нуля (при  $t_1=0$ ,  $\gamma=0$ ) і досягає  $U_d$  (при  $t_1=T$ ,  $\gamma=1$ ), тобто ця схема понижує напругу і, у відповідності з формулою

1.5, збільшує струм. Схема працює як «трансформатор постійного струму».

# НУБІП України

Введемо поняття коефіцієнту перетворення напруги  $K_i$

$$K_i = \frac{U_H}{U_d} \quad (1.6)$$

# НУБІП України

Тоді рівняння регулюючої характеристики

$$K_i = \gamma \quad (1.7)$$

На рисунку 3 зображені регулюючі характеристики різних ППН в залежності від відносної тривалості включеного стану транзисторів.

# НУБІП України

# НУБІП України

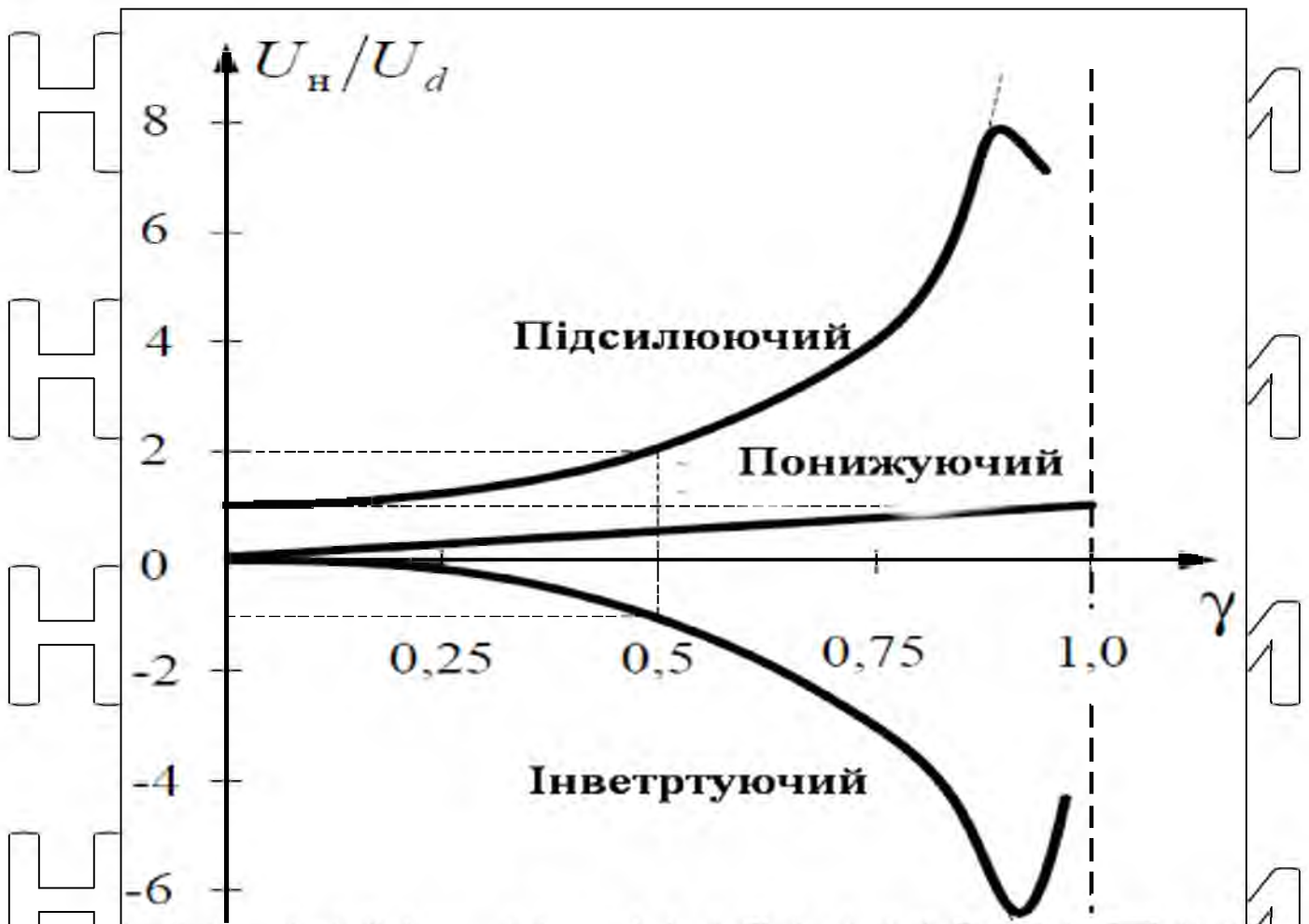


Рисунок 3. Регулюючі характеристики понижуючого, підсилюючого та інвертуючого ППН.

Зовнішня характеристика ППН – це залежність середнього значення напруги навантаження від струму навантаження з постійною відносною тривалістю увімкненого стану транзисторів. Зовнішні особливості опускання ППН досить жорсткі. Мають досить високий ККД. Більш детально ці питання будуть розглянуті нижче.

На рисунку 3 показано схему безпосереднього ППН, який підвищує напругу, а на рисунку 25 – діаграми напруг при навантаженні  $u_n$  і на колекторі  $u_k$  та струмів: поглинаючого від джерела  $i_d$ , колектора  $i_k$ , діода  $i_d$  і навантаження  $i_n$ .

Розглянемо роботу схеми. В момент часу  $t_1$  вмикається транзистор VT, струм наростає через дросель L. В момент  $t_2$  вимикається транзистор і за рахунок енергії, збереженої в індуктивності, під дією суми напруги джерела

живлення  $I_d$  та ЕДС самоіндукції через вентиль VD заряджається конденсатор  $C_{\text{н}}$ , а струм, використовуваний від джерела живлення, спадає. У момент часу  $t_3$  процеси повторюються. У цій схемі, на відміну від попередньої, можна підняти тільки напругу.

Таким чином, у момент  $t_1$  струм  $i_d$  проходить через транзистор, і енергія зберігається в індуктивності. Потім в інтервалі часу  $T - t_1$  через діод протікає струм  $i_d$  для зарядки конденсатора і до навантаження. Постійна складова струму  $i_d$  не проходить через конденсатор, тому середнє значення струму, що проходить через навантаження, дорівнює

$$I_n = I_d \frac{T-t_1}{T} \quad (1.8)$$

$$\text{Або } I_n = I_d(1-\gamma) \quad (1.9)$$

Тут  $\gamma$  — відносний час ввімкнутого стану транзистора

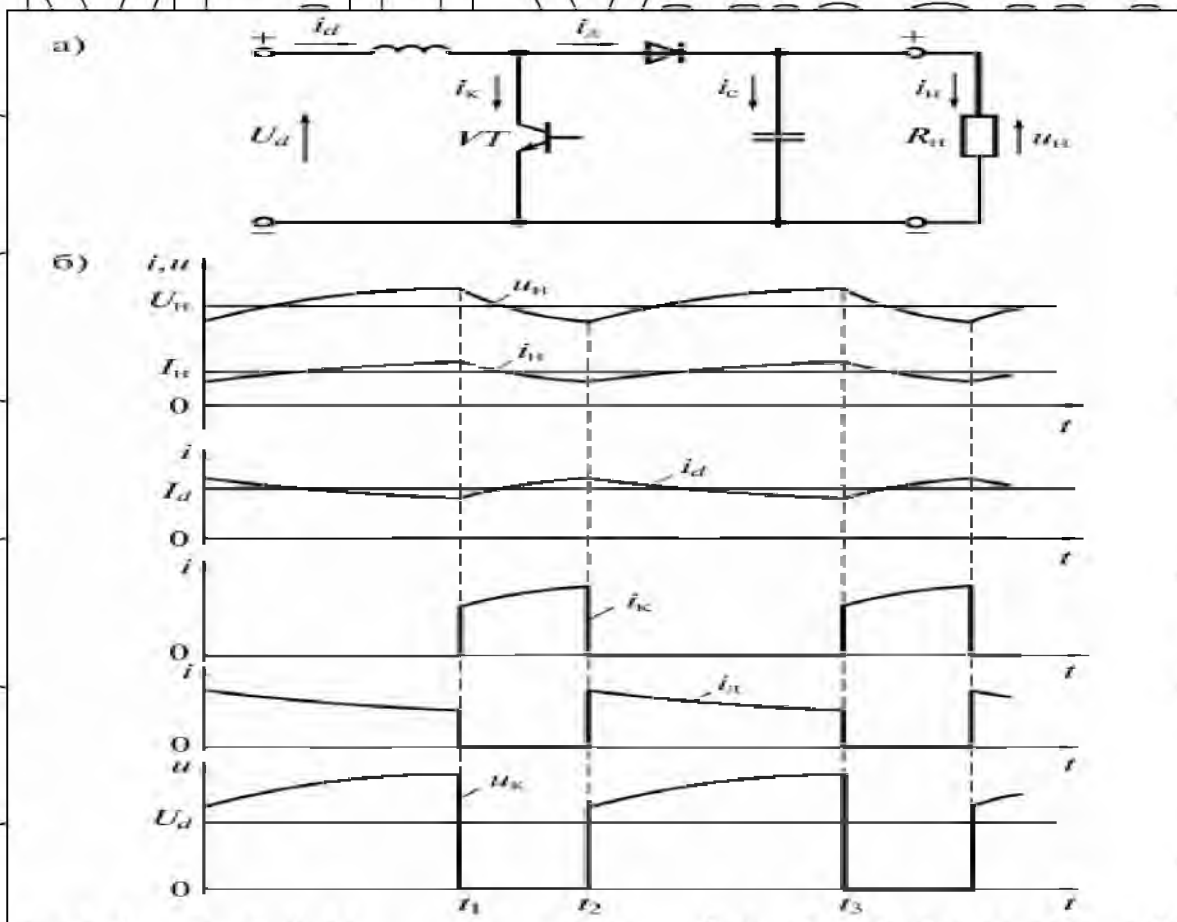


Рисунок 4. Схема підсилюючого ППН (а) та діаграми напруг і струмів,



що ілюструють його роботу (б)

# НУБІП України

З урахуванням вірності рівняння потужностей на вході та виході (див. 1.

4)

# НУБІП України

$$U_H = \frac{1}{1-\gamma} U_d \quad (1.10)$$

Тоді рівняння регулюючої характеристики у відносних одиницях

# НУБІП України

$$K_i = \frac{U_H}{U_d} = \frac{1}{1-\gamma} \quad (1.11)$$

З формули (1.11) випливає можливість нескінченного зростання напруги

під навантаженням. Однак із-за збільшення втрат в реакторі (без втрат це не обходиться) при збільшенні  $\gamma$  неможливо отримати дуже високу напругу.

# НУБІП України

Цільове збільшення напруги максимум в 3...4 рази. Контрольні характеристики показані на рисунку 3.

Зовнішні особливості цього ППН дуже м'які.

# НУБІП України

Слід зазначити, що ця схема має гіршу продуктивність. Він різко зменшується зі збільшенням коефіцієнта перетворення напруги  $K_i$ .

Розгляньте можливість запуску програми. У момент часу  $t_1$  вмикається транзистор VT, сила струму через індуктивність L зростає. У момент часу  $t_2$

транзистор вимикається, і завдяки запасеній в індуктивності енергії струм

# НУБІП України

протікає по ланцюгу L, C, VD. В результаті конденсатор C заряджається на ділянці  $t_2-t_3$ , і сила струму зменшується. За час  $t_3$  процеси повторюються. На

ділянці  $t_3-t_4$  одночасно з запасом енергії в індукторі відобувається зарядка конденсатора до опору навантаження. Рівняння нормативної характеристики

# НУБІП України

$$K_i = \frac{U_H}{U_d} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \quad (1.12)$$

у відносних одиницях

Тут у відносний час ввімкненого стану транзистора.

З формули (1. 12) випливає можливість нескінченного збільшення напруги на навантаженні. Однак, через ріст втрат в реакторі (він не є ідеальною індуктивністю) при збільшенні  $\gamma$  отримати більшу напругу неможливо.

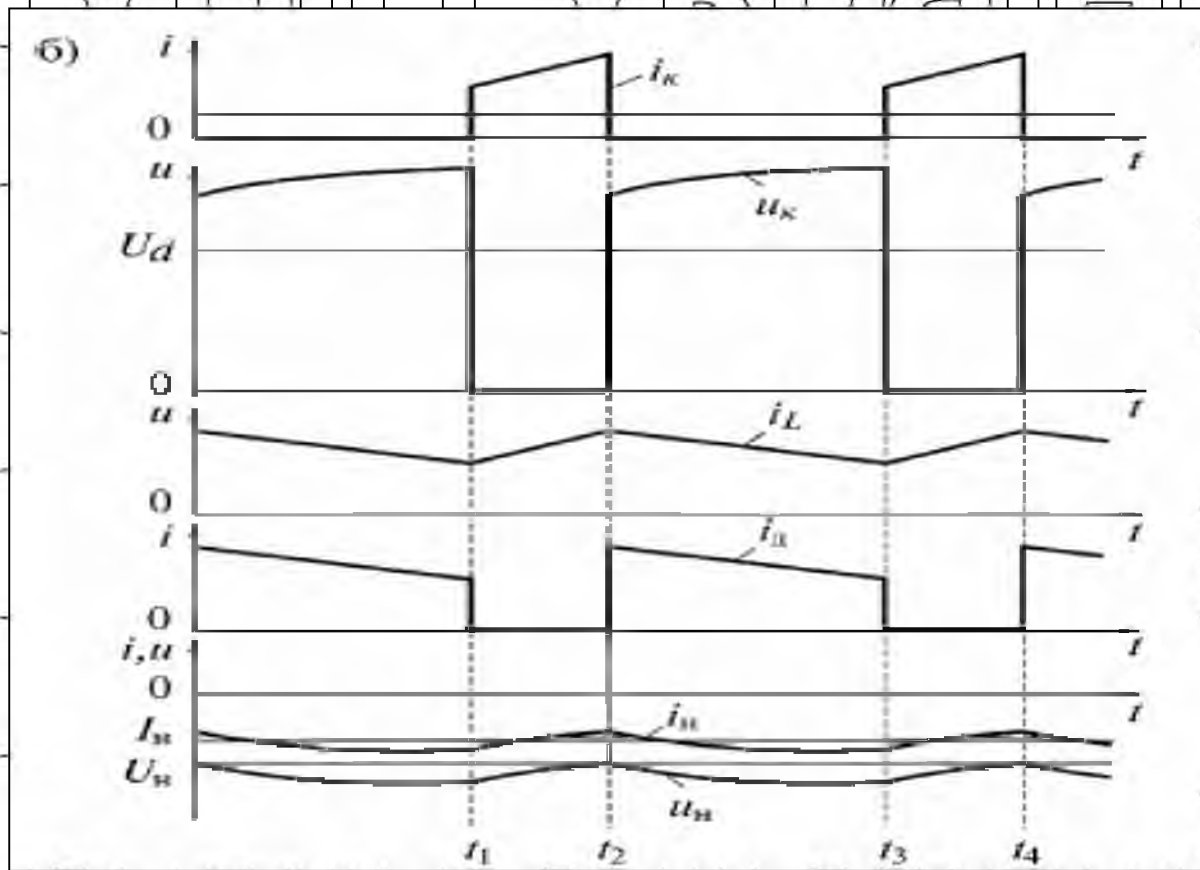
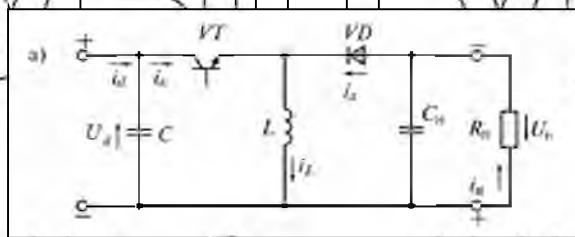


Рисунок 5. Діаграми напруг та струмів, що описують роботу ППН

Ця діаграма має м'яку зовнішню характеристику. Необхідно відмітити, в цій схемі низький ККД. Він різко падає з ростом коефіцієнту перетворення напруги  $K_u$  інвертуючого ППН.

#### 2.4 Загальні відомості про геометричний підхід



Частотний перетворювач — електронний пристрій для зміни частоти електричного струму (напруги). Він перетворює вхідну синусоїдальну напругу

постійної частоти та амплітуди на вихідну імпульсну напругу змінної частоти та амплітуди за допомогою ШІМ (широтно-імпульсної модуляції). Таким

чином, шляхом поступового збільшення частоти і амплітуди напруги, що подається на обмотки статора електродвигуна, можна забезпечити плавне регулювання частоти обертання вала електродвигуна. Перетворювач частоти -

це пристрій, який використовується для забезпечення безперервного

керування процесом. Зазвичай перетворювач частоти здатний контролювати швидкість і крутний момент асинхронних і/або синхронних двигунів.

Частотний перетворювач забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, а також дозволяє змінювати напрямок обертання двигуна.

Сьогодні більша частина всієї електроенергії, виробленої в світі, використовується електродвигунами. Перетворення електричної енергії в

механічну здійснюється за допомогою електродвигунів потужністю від одного вата до кількох десятків мегават. Тому такий пристрій, як частотний

перетворювач, є досить актуальним. В асинхронному електродвигуні ustalена

частота обертання ротора  $n_2$  відрізняється від частоти обертання магнітного поля  $n_1$  на величину ковзання  $S$ . У той же час частота обертання магнітного поля  $n_1$  залежить від частоти напруги живлення.

При подачі на обмотку статора електродвигуна трифазної напруги з частотою  $f$  створюється обертове магнітне поле. Таким чином, частота

обертання ротора асинхронного двигуна  $n_2$  залежить від частоти напруги живлення  $f$ , на цій залежності заснований метод регулювання частоти.

Змінюючи частоту  $f$  на вході двигуна з інвертором, регулюємо частоту обертання ротора.

Схема будь-якого перетворювача частоти складається з силової і керуючої частини. Силова частина перетворювачів зазвичай виконується з тиристорів або транзисторів, що працюють в режимі електронних ключів.

Керуюча частина реалізована на цифрових мікропроцесорах і забезпечує керування силовими електронними ключами, а також вирішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист). Частотний перетворювач відображає на цифровому дисплеї основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність, крутний момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача та ін.

## 2.5. Трифазний матричний перетворювач частоти

На сьогоднішній день актуальною є задача побудови систем з асинхронним електроприводом, тому ведеться постійний розвиток різноманітних систем з метою підвищення точності керування цими асинхронними двигунами. Частотні перетворювачі найкраще працюють як керуючий пристрій.

Принцип інваріантності в системах керування пояснюється наступним чином: якщо в системі автоматизації передбачається компенсація впливів завад на задані координати, то така система є інваріантною, тобто не залежить від цих впливів. Так, наприклад, у саморегульованих системах функція якості керування може змінюватися під впливом параметричних або зовнішніх збурень, тоді, компенсуючи вплив цих збурень, можна досягти стаціонарності функції якості керування та забезпечити роботу системи при екстремальні умови.

Частотний перетворювач з широтно-імпульсним регулюванням (ППЗ ШІМ) знижує пускові струми в 4-5 разів. Він забезпечує плавний пуск асинхронного двигуна і керує приводом відповідно до заданої формули співвідношення напруга/частота. Частотний перетворювач забезпечує економію електроенергії до 50%. Є можливість включити реверс зв'язків між

суміжні приводи, тобто самонастроювання обладнання під завдання і зміна умов роботи всієї системи. Принцип дії перетворювача частоти.

Частотний перетворювач з ШИМ є інвертором подвійного перетворення.

Спочатку напруга мережі 220 або 380 В випрямляється доданим вхідним мостом, потім згладжується і фільтрується за допомогою конденсаторів. Це

перший етап трансформації. На другому етапі ШИМ-последовність певної частоти та частоти створюється з постійної напруги за допомогою мікросхем керування та перемикачів IGBT вихідного моста. На виході перетворювача

частоти випромінюються пучки прямокутних імпульсів, але завдяки

індуктивності обмоток статора асинхронного двигуна вони інтегруються і в кінцевому підсумку перетворюються в напругу, близьку до синусоїди.

Критерії вибору частотних перетворювачів. Вибір за функціями. Кожен

виробник намагається забезпечити конкурентну перевагу на ринку. Перше

правило забезпечення максимальних продажів – це низька ціна. Тому

виробник прагне включити в свій продукт тільки необхідні функції. А решта пропонується як варіант. Перед покупкою частотного перетворювача

визначтеся, які функції вам потрібні. Варто вибрати пристрій, який в базовій

версії має більшість необхідних вам функцій. За способом управління відразу

відбракуйте ті перетворювачі, які не підходять за потужністю, типом

виконання, переважувальною здатності і т. д. Залежно від типу управління,

виберіть, що вибрати, скалярне або векторне управління. Більшість сучасних

частотних перетворювачів реалізують векторне керування, але такі частотні

перетворювачі дорожчі, ніж частотні перетворювачі зі скалярним керуванням.

Векторне керування забезпечує більш точне керування за рахунок зменшення

статичної похибки. Скалярний режим підтримує лише постійне

співвідношення між вихідною напругою та вихідною частотою, але для

вентиляторів, наприклад, цього достатньо. За потужністю. Якщо потужність

обладнання приблизно однакова, то вибирайте перетворювачі тієї ж фірми з

потужністю максимальної потужності навантаження. Таким чином, ви

гарантуєте взаємозамінність і спрощуєте обслуговування обладнання. Бажано,

щоб сервісний центр обраного частотного перетворювача знаходився у вашому місті. Відповідно до напруги в мережі. Завжди вибирайте перетворювач з максимально широким діапазоном низьких і високих напруг.

Справа в тому, що у випадку з домашніми мережами саме слово «стандарт» викликає лише сміх крізь сльози. Якщо знижена напруга швидше за все призведе до відключення перетворювача частоти, то підвищена напруга може спричинити вибух електролітичних конденсаторів мережі та несправність входу пристрою. За гарантійним терміном. Гарантійний термін

опосередковано дозволяє оцінити надійність перетворювача частоти.

Звичайно, вам доведеться вибрати частотний перетворювач з тривалим періодом роботи. Деякі виробники залишають за собою окремі випадки поломки, на які не поширюється гарантія. Завжди уважно читайте

документацію та шукайте в Інтернеті огляди моделей обладнання та виробників. Це допоможе зробити правильний вибір. Витратьте гроші на якісні послуги та навчання персоналу.

Більшість сучасних перетворювачів частоти побудовані за схемою подвійного перетворення. Вони складаються з таких основних частин: ланка постійного струму (некерований випрямляч), силовий імпульсний інвертор і

система керування. Ланка постійного струму складається з некерованого випрямляча та фільтра. Змінна напруга живильної мережі буде перетворюватися в ній на постійний струм.

Трифазний силовий імпульсний інвертор складається з шести транзисторних ключів. Кожна обмотка електродвигуна з'єднана відповідною шпункою з плюсовою і негативною клемою випрямляча. Інвертор перетворює випрямлену напругу в трифазну змінну напругу необхідної частоти й амплітуди, яка подається на обмотки статора електродвигуна.

Силкові транзистори IGBT використовуються як перемикачі у вихідних каскадах інвертора. У порівнянні з тиристорами вони мають більш високу частоту перемикання, що дозволяє видавати синусоїдальний вихідний сигнал з мінімальними спотвореннями.

Електродвигун підключають по черзі до позитивного і негативного полюсів випрямляча. Тривалість цих станів припадає на період ШІМ за синусоїдальним законом. При високих (зазвичай 2...15 кГц) тактових частотах ШІМ в обмотках електродвигуна протікають синусоїдальні струми

завдяки їх фільтруючим властивостям. Таким чином, форма кривої вихідної напруги є біполярною послідовністю високочастотних прямокутних імпульсів. Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, тривалість (ширина) імпульсів в період вихідної частоти АІН модулюється за синусоїдальним законом. Форма кривої вихідного струму (струму в обмотках асинхронного електродвигуна) майже синусоїдальна. Вихідна напруга інвертора може регулюватися двома способами: амплітудою (AR) за рахунок зміни вхідної напруги  $U_w$  і шириною імпульсу (ШИМ) за рахунок зміни

програми перемикання вентилів V1-V6 при  $U_w = \text{const}$ . Другий спосіб отримав широке поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази (мікропроцесори, транзистори IGBT). При широтно-імпульсній модуляції форма струмів в обмотках статора асинхронного двигуна наближається до синусоїдальної завдяки фільтруючим властивостям самих обмоток. Таке керування дозволяє отримати високий ККД перетворювача і еквівалентно аналоговому управлінню з використанням частоти та амплітуди напруги.

Перетворювач частоти - це пристрій, який використовується для забезпечення безперервного керування процесом. Зазвичай перетворювач частоти здатний контролювати швидкість і крутний момент асинхронних і/або синхронних двигунів. Частотний перетворювач забезпечує плавний пуск і зупинку двигуна, а також дозволяє змінювати напрямок обертання двигуна.

Сьогодні більша частина всієї електроенергії, виробленої в світі, використовується електродвигунами. Перетворення електричної енергії в механічну здійснюється електродвигунами потужністю менше ват на кілька десятків мегават. Тому такий пристрій, як частотний перетворювач, є досить актуальним. В асинхронному електродвигуні ustalена частота обертання

ротора  $n_2$  відрізняється від частоти обертання магнітного поля  $n_1$  на величину ковзання  $S$ . У той же час частота обертання магнітного поля  $n_1$  залежить від частоти напруги живлення. При подачі на обмотку статора електродвигуна трифазної напруги з частотою  $f$  створюється обертове магнітне поле. Таким

чином, частота обертання ротора асинхронного двигуна  $n_2$  залежить від частоти напруги живлення  $f$ , на цій залежності заснований метод регулювання частоти. Змінюючи частоту  $f$  на вході двигуна з інвертором, регулюємо частоту обертання ротора. Схеми будь-якого перетворювача частоти

складається з силової і керуючої частин. Силова частина перетворювачів

зазвичай виконується з тиристорів або транзисторів, що працюють в режимі електронних ключів. Керуюча частина реалізована на цифрових мікропроцесорах і забезпечує керування силовими електронними ключами, а

також вирішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист). Частотний перетворювач відображає на цифровому

дисплеї основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність, крутний момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача та ін.

Завдяки перевагам перетворювачів з чітко визначеним ланцюгом

постійного струму можна призначати широкий діапазон вихідних частот, як вище, так і нижче частоти мережі. Високошвидкісні, середньо- і низькошвидкісні приводи будуються за схемою інвертора з ланкою постійного

струму. Така схема дозволяє проектувати точні електроприводи, що мають широкий і надширокий діапазон регулювання швидкості. Це означає, що така

схема може бути використана для великого класу відносно простих електроприводів з невисокими вимогами до діапазону регулювання і швидкості. Недоліком перетворювачів з ланкою постійного струму є

необхідність подвійного перетворення електричної енергії, що знижує ККД,

збільшує втрати енергії та погіршує масо-габаритні характеристики перетворювача. Іншим недоліком є наявність в ланцюзі постійного струму потужної батареї конденсаторів великої ємності (в схемах з АН) або

потужного дроселя з високою індуктивністю (в схемах з АДС). Саме ці елементи погіршують вагогабаритні показники. Крім того, електролітичні конденсатори істотно знижують надійність такого типу перетворювача. У випадку перетворювачів частоти з прямим підключенням (без ланки постійного струму) їх основними перевагами є:

- досить високий ККД, який досягається одноразовим перетворенням електроенергії в перетворювачі; - можливість обміну енергією між двигуном та електричною мережею. Завдяки такій можливості перетворювач може працювати як в режимі руху та гальмування, так і з рекуперацією енергії в мережу;

- такі перетворювачі частоти мають можливість отримання досить низьких частот вихідної напруги перетворювача частоти. Це забезпечує плавну роботу двигуна на низьких оборотах; Недоліки ДППЗ пов'язані з простотою їх конструкції. У таких перетворювачах є обмеження на максимальну вихідну частоту. Максимальна вихідна частота не повинна перевищувати 70% частоти мережі. Ще однією перешкодою для широкого використання БНФ є низький коефіцієнт потужності і несинусоїдальність вихідної напруги. Висока складність схем керування обумовлює використання БНФ в тихохідних синхронних і асинхронних електроприводах середньої і великої потужності.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових елементів - закритих GTO - тиристорів, або біполярних IGBT - транзисторів з ізольованим затвором. Він складається з вхідного емнісного фільтра CF і шести IGBT - транзисторів V1-V6, з'єднаних зустрічно - паралельно діодам зворотного струму D1-D6. За рахунок по чергового перемикання вентилів V1-V6 за заданим системою керування алгоритмом постійна вхідна напруга  $V_v$  перетворюється у змінну вихідну напругу прямокутного імпульсу. Через керовані ключі V1-V6 протікає активна складова асинхронного струму електродвигуна, через діоди D1-D6 - реактивна складова струму.

# НУБІП України

При дослідженнях на частотах від 10 до 40 Гц векторне керування має перевагу: жорсткість механічної характеристики вища ніж при скалярному керуванні. При моментах навантаження, що складають половину критичного моменту при векторному керуванні, жорсткість механічної характеристики при скалярному законі керування дещо вища. Зауважимо, що при частоті 50 Гц явну перевагу має скалярне керування - воно забезпечує найкращу жорсткість у всьому діапазоні навантажень та більший критичний момент.

# НУБІП України

При частотах, які вищі за 50 Гц жоден із законів керування не дає явних переваг - критичний момент падає прямо пропорційно заданій частоті обертання.

# НУБІП України

Аналізуючи робочі характеристики системи у вигляді залежності коефіцієнта потужності двигуна від корисної потужності на валу, можна сказати, що найвище значення коефіцієнта потужності зберігається при векторному керуванні у діапазоні номінальної потужності, причому коефіцієнт потужності зростає із зменшенням заданої частоти керування для діапазону частот від 10 до 50 Гц, а для діапазону від 60 до 100 Гц він падає.

# НУБІП України

Максимальне значення коефіцієнт потужності становить близько 0,9 при частоті 10 Гц та потужності близько 50 Вт. Розглядаючи коефіцієнт потужності системи як функцію корисної потужності на валу можна стверджувати, що на всьому діапазоні робочих потужностей він досягає значень від 0,6 до 0,75.

# НУБІП України

При роботі на частотах від 60 до 100 Гц коефіцієнт потужності залишається майже однаковим в усьому діапазоні. На нижчих частотах явними перевагами володіє скалярне керування, яке дозволяє отримати вищий коефіцієнт потужності у діапазоні потужностей від низьких до номінальних.

# НУБІП України

Отже, однією з явних переваг системи «перетворювач частоти - АД» є майже постійний коефіцієнт потужності системи у всьому діапазоні корисних потужностей та частот керування. Векторне керування забезпечує менші

# НУБІП України



струми двигуна на всьому діапазоні частот та потужностей порівняно із скалярним. Це якісно впливає на тепловий режим роботи двигуна.

Для оцінки економічної ефективності від застосування перетворювачів частоти в кожному разі необхідно організувати встановлення приладів обліку електричної енергії та провести виміри електроспоживання до установки ПЧ і після його встановлення. Крім установки ПЧ потрібно провести всі необхідні регулювання і настройки в роботі системи.

Найважливішим показником в конкуренції на ринку сьогодні є співвідношення якість - ціна. Потім розглядаються і інші показники, такі як

габарити, дизайн, наявність сервісної служби тощо, але на першому місці стоїть якість. При побудові перетворювачів частоти для асинхронних двигунів використовуються сучасні керовані напівпровідникові прилади високої

надійності (біполярні транзистори з ізольованим затвором - IGBT - транзистори). Елементи силової електроніки в основному і визначають сьогодні якість і цнові показники, у структурі ціни вони становлять сьогодні до 70 % від вартості ПЧ.

Економія коштів при застосуванні частотно-регульованого електроприводу складається з наступних складових:

- економія споживання електроенергії;
- використання замість двохшвидкісного електродвигуна дешевшого, одношвидкісного асинхронного електродвигуна;

- збільшення міжремонтного періоду роботи електродвигуна і як наслідок скорочення експлуатаційних витрат;

- підтримання оптимального режиму роботи установки, яке здійснюється за допомогою точного регулювання швидкості обертання валу двигуна. При цьому досягається підвищення якості продукції та зменшення кількості браку.

Перетворювач частоти - це пристрій, призначений для перетворення змінного струму (напругу) однієї частоти в змінний струм (напругу) іншої

частоти. Вихідна частота в сучасних перетворювачах може змінюватися в широкому діапазоні і бути як вище, так і нижче частоти живильної мережі.

Схема будь-якого перетворювача частоти складається із силової і керуючої частин. Силова частина перетворювачів зазвичай виконана на тиристорах або транзисторах, які працюють в режимі електронних ключів.

Керуюча частина виконується на цифрових мікропроцесорах і забезпечує управління силовими електронними ключами, а також рішення великої кількості допоміжних завдань (контроль, діагностика, захист).

Перетворювачі частоти, застосовувані в регульованому електроприводі, залежно від структури та принципу роботи силової частини розділяються на два класи:

- перетворювачі частоти з явно вираженим проміжною ланкою постійного струму.

- перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком ( без проміжної ланки постійного струму).

Кожен з існуючих класів перетворювачів має свої переваги й недоліки, які визначають область раціонального застосування кожного з них.

Поряд з перерахованими недоліками перетворювачів з безпосереднім зв'язком, вони мають певні переваги. До них відносяться:

- практично найвищий ККД щодо інших перетворювачів (98,5% і вище);
- здатність працювати з великими напругами і струмами, що робить можливим їх використання в потужних високовольтних приводах;

- відносна дешевизна, незважаючи на збільшення абсолютної вартості за рахунок схем управління і додаткового обладнання.

Подібні схеми перетворювачів використовуються в старих приводах, в нових конструкціях їх практично не розробляються. Найбільш широке застосування в сучасних частотно-регульованих приводах знаходять

перетворювачі з явно вираженим ланкою постійного струму. Для формування синусоїдального змінного напруги використовуються автономні інвертори. В якості електронних ключів в інверторах застосовуються замикаються

тиристорів GTO і їх вдосконалені модифікації GCT, IGCT, SGCT, і біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT.

Головним достоїнством тиристорних перетворювачів частоти, як і в схемі з безпосереднім зв'язком, є здатність працювати з великими струмами і напругами, витримуючи при цьому тривале навантаження й імпульсні впливи.

Перетворювачі частоти на тиристорах в даний час займають домінуюче становище у високовольтному приводі в діапазоні потужностей від сотень кіловат і до десятків мегават з вихідною напругою 3 - 10 кВ і вище. Проте їх ціна на один кВт вихідної потужності найбільша в класі високовольтних

перетворювачів. До недавнього минулого перетворювачі частоти на GTO становили основну частку і в низьковольтному частотно-регульованому приводі. Але з появою IGBT транзисторів відбувся «природний відбір» і сьогодні перетворювачі на їхній базі загально визнані лідери в області низьковольтного частотного регулювання.

Тиристор є напівкеруваними приладами: для їх включення досить подати короткий імпульс на керуючий вивід, але для вимикання необхідно або прикласти до нього зворотну напругу, або знизити комутований струм до нуля.

Для цього в тиристорному перетворювачі частоти потрібна складна і громізка система управління.

Біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT відрізняються від тиристорів повною керованістю, проста неенергоємна система управління, найвища робоча частота.

Біполярні транзистори з ізольованим затвором IGBT відрізняються від тиристорів: повною керованістю, проста неенергоємна система управління, найвища робоча частота.

Внаслідок цього перетворювачі частоти на IGBT дозволяють розширити діапазон керування швидкості обертання двигуна, підвищити швидкість приводу в цілому. Для асинхронного електроприводу з векторним керуванням

перетворювачі на IGBT дозволяють працювати на низьких швидкостях без датчика зворотного зв'язку.

Застосування IGBT з більш високою частотою перемикання в сукупності з мікропроцесорною системою управління в перетворювачах частоти знижує рівень вищих гармонік, характерних для тиристорних перетворювачів. Як

наслідок менші додаткові втрати в обмотках і магнітопроводі електродвигуна, зменшення нагрівання електричної машини, зниження пульсацій моменту й виключення так званого «крокування» ротора в області малих частот.

Знижуються втрати в трансформаторах, конденсаторних батареях, збільшується їх термін служби та ізоляції проводів, зменшуються кількість помилкових спрацьовувань пристроїв захисту й погрішності індукційних вимірювальних приладів.

Перетворювачі на транзисторах IGBT в порівнянні з тиристорними перетворювачами при однаковій вихідній потужності відрізняються меншими габаритами, масою, підвищеною надійністю в силу модульного виконання електронних ключів, кращого тепловідведення з поверхні модуля і меншої кількості конструктивних елементів. Вони дозволяють реалізувати більше повний захист від кидків струму і від перенапруги, що істотно знижує ймовірність відмов і пошкоджень електроприводу.

На даний момент низьковольтні перетворювачі на IGBT мають більш високу ціну на одиницю вихідної потужності, внаслідок відносно складності виробництва транзисторних модулів. Однак за співвідношенням ціна/якість, виходячи з перерахованих достоїнств, вони явно виграють у тиристорних перетворювачів, крім того, протягом останніх років спостерігається неухильне зниження цін на IGBT модулі.

Головною перешкодою на шляху їх використання у високовольтному приводі із прямим перетворенням частоти і при потужностях вище 1 - 2 МВт на даний момент є технологічні обмеження. Збільшення комутованої напруги і робочого струму приводить до збільшення розмірів транзисторного модуля, а також вимагає більш ефективного відведення тепла від кремнієвого кристала.

Оскільки більшість сучасних перетворювачів частоти побудовано за схемою подвійного перетворення, то саме вони будуть підлягати розгляду. Вони складаються з наступних основних частин: ланки постійного струму (некерованого випрямляча), силового імпульсного інвертора і системи управління.

Ланка постійного струму складається з некерованого випрямляча і фільтра. Змінна напруга мережі живлення перетвориться в ньому на напругу постійного струму.

Силовий трифазний імпульсний інвертор складається з шести транзисторних ключів. Кожна обмотка електродвигуна підключається через відповідний ключ до позитивного і негативного виводів випрямляча. Інвертор здійснює перетворення випрямленої напруги в трифазну змінну напругу потрібної частоти і амплітуди, яке прикладається до обмоток статора електродвигуна. У вихідних каскадах інвертора в якості ключів використовуються силові IGBT - транзистори. У порівнянні з тиристорами вони мають більш високу частоту перемикання, що дозволяє виробляти вихідний сигнал синусоїдальної форми з мінімальними спотвореннями.

Узагальнена структура перетворювача частоти зображена на рисунку 6.

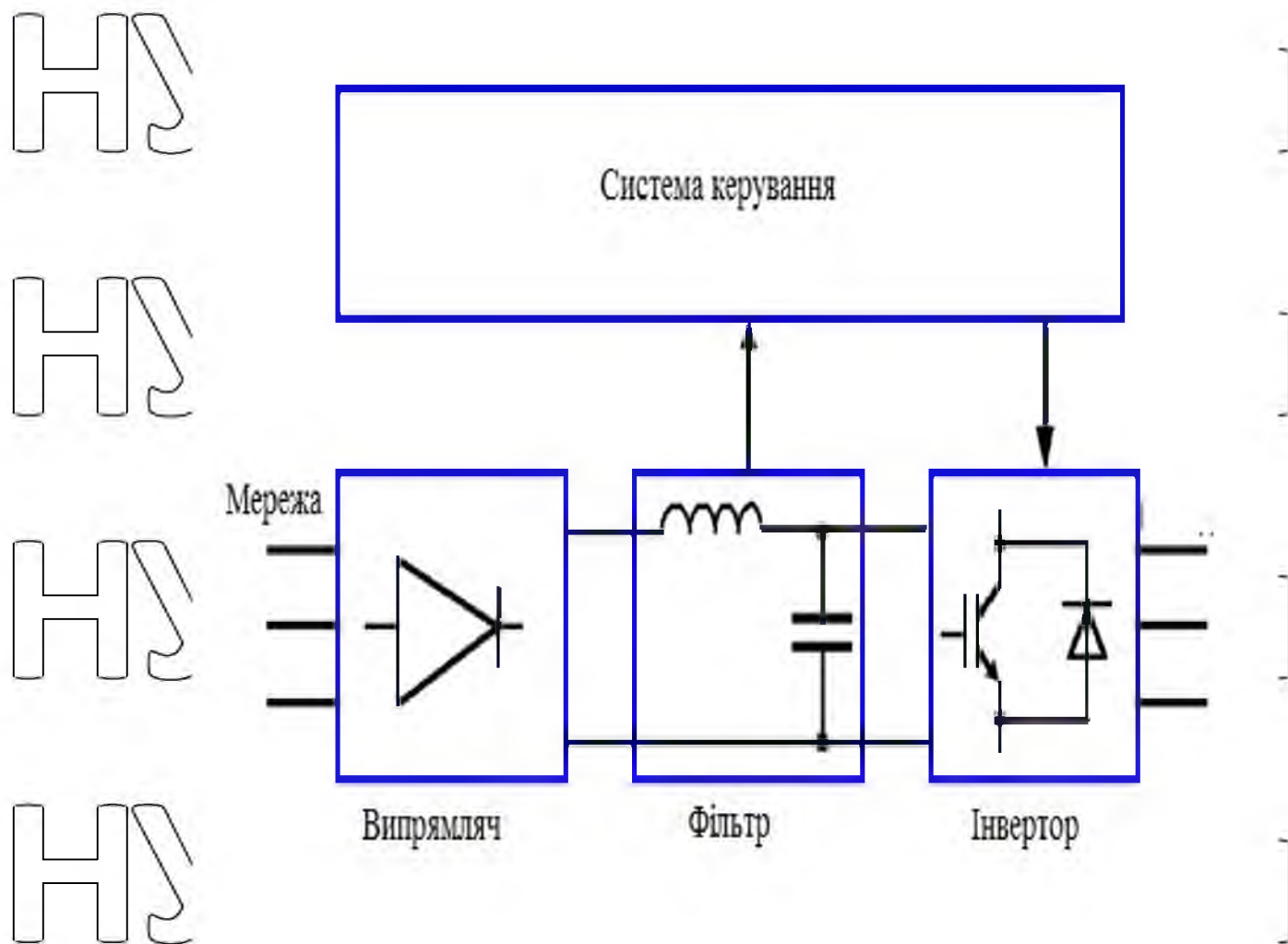


Рисунок 6 – Узагальнена структурна схема перетворювача частоти

Більшість перетворювачів частоти мають подібну структуру, тому достатньо розглянути одну принципову схему перетворювача частоти, для того щоб мати уяву про роботу перетворювачів частоти взагалі. На рисунку 10 приведена принципова електрична перетворювача частоти, виконана за схемою Ларіонова.

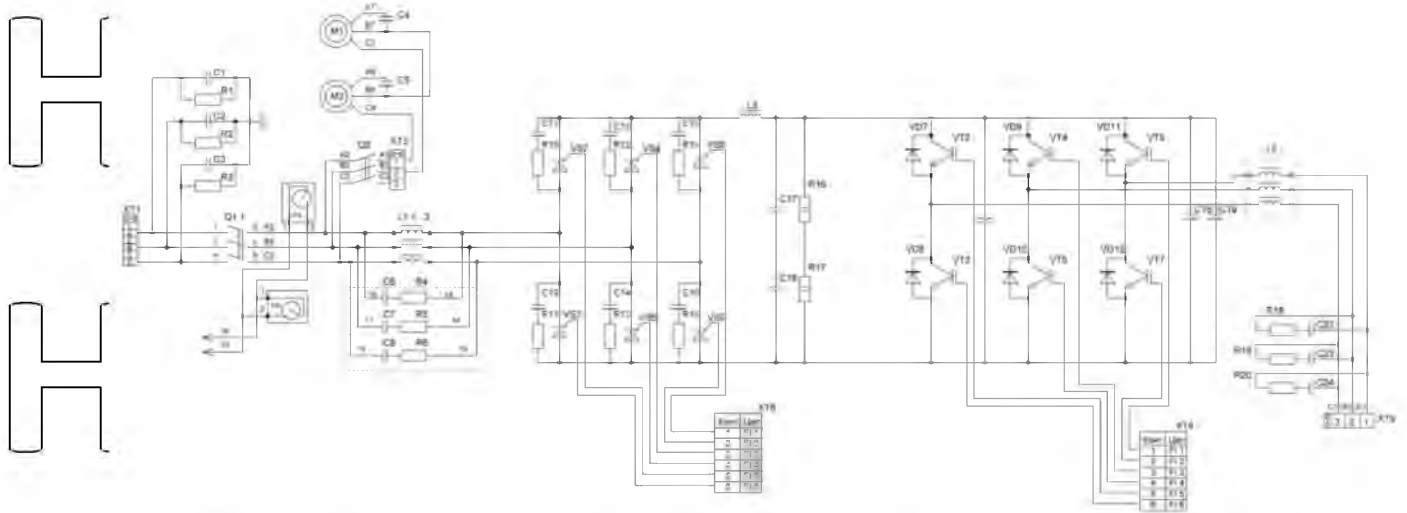


Рисунок 7 – Принципова електрична схема перетворювача частоти

На початку схеми знаходиться перемикач Q1, який вмикає і вимикає перетворювач. Геркони FA встановлені для захисту передавача від високих струмів короткого замикання. Коли поточне задане значення досягається, геркон вимикається і подає достатню потужність, щоб відкрити оптрон V1. Розмикання оптрона V1 призводить до появи стабілізованої напруги (VD2, VD3) і випрямленої напруги (VD4) на клеммах XP1 і XP2. Система захисту відключає перетворювач від мережі. Для охолодження випрямляча і інвертора передбачено два вентилятори M1 і M2.

Важливим елементом схеми є мережевий реактор. Мережевий дросель виконує захисну функцію, як по відношенню до самого перетворювача, так і до мережі живлення. Це двонаправлений буфер між нестабільною мережею живлення (провали і перенапруги) і перетворювачем частоти - джерелом вищих гармонік (5, 7, 11, 13, 17). Вищі гармоніки спотворюють синусоїду напруги мережі, збільшуючи втрати потужності машин і електричних пристроїв, що живляться від мережі, а також можуть призвести до некоректної роботи електронних пристроїв, що живляться від цієї мережі. Мережевий дросель для вищих гармонік має високий опір і пригнічує їх вплив на мережу живлення. Мережевий дросель захищає частотний перетворювач у разі короткого замикання на його виході, обмежуючи швидкість наростання

струму короткого замикання та постійного струму короткого замикання, сприяючи успішній роботі струмового захисту інвертора. Виробники частотних перетворювачів рекомендують встановлювати мережеві дроселі при потужності джерела живлення  $500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  і більше і в 10 разів перевищує потужність перетворювача частоти. Або, під час синусоїдального спотворення напруги живлення, такі навантаження, як тиристорні перетворювачі або потужні перетворювачі частоти, живляться від тієї ж мережі живлення.

Після випрямлення напруга повинна бути відфільтрована від змінної складової. Для цього встановлюється згладжує дросель L3, так як реактивні елементи мають підвищену стійкість до змінного струму. У колі постійного струму перетворювача частоти встановлені згладжувальні дроселі (див. рис. 1). Основне їх призначення - підвищення коефіцієнта потужності перетворювача частоти. Згладжуючий дросель ефективніше пригнічує 5-ту і

7-му гармоніки, а лінійний дросель — 11-ту і вище, так що оптимальний результат досягається при спільному використанні лінійних і згладжуючих дроселів. Випрямлену напругу необхідно знову зробити змінною, але вже з заданою частотою. Для цих цілей використовується автономний інвертор напруги. На вході інвертора напруги встановлені конденсатори C17, C18 для

виключення впливу на роботу пристрою внутрішнього опору джерела та забезпечення комутації силових ключів при незмінній напрузі, а також зворотну провідність у джерелі живлення.

При запиранні транзисторів внаслідок зміни полярності ЕРС самоіндукції індуктивності навантаження, струм навантаження буде прагнути зберегти свої величину та напрямок. Для того, щоб забезпечити його протікання, виключаючи при цьому виникнення перенапруг, транзистори VT2, VT3, VT4, VT5, VT6, VT7 шунтують діодами відповідно VD7, VD8, VD9, VD10, VD11, VD12.

На виході інвертора встановлений дросель двигуна L3. Вихідна напруга інверторів являє собою послідовність прямокутних імпульсів з регульованою шириною і частотою. Швидкість наростання імпульсів напруги дуже висока,



що створює загрозу для ізоляції електродвигуна. Обмеження швидкості наростання напруги і, таким чином, зниження ризику пошкодження ізоляції двигуна досягається встановленням дроселя двигуна між двигуном і інвертором.

Існують симетричні та асиметричні методи управління ключами.

Якщо діагональні мостові транзистори вмикаються і вимикаються одночасно, то такий спосіб управління є управлінням смосіб. При цьому напруга на навантаженні завжди біполярна і використовуються або два транзистора, або два діода.

Якщо транзистори не вмикаються одночасно, то управління називається незбалансованим. При цьому напруга навантаження завжди однопольярна. Таким чином, при несиметричному у регулюванні має місце одна полярна модуляція.

Асиметричне управління широко поширене і чергується.

Існує альтернативне керування з характеристиками, подібними до традиційного асиметричного керування.

На малюнку 7 показана схема оборотного АТФ, яка працює в конкретному двигуні. Часові діаграми, що ілюструють його роботу з симетричним керуванням, показані на малюнку 8.

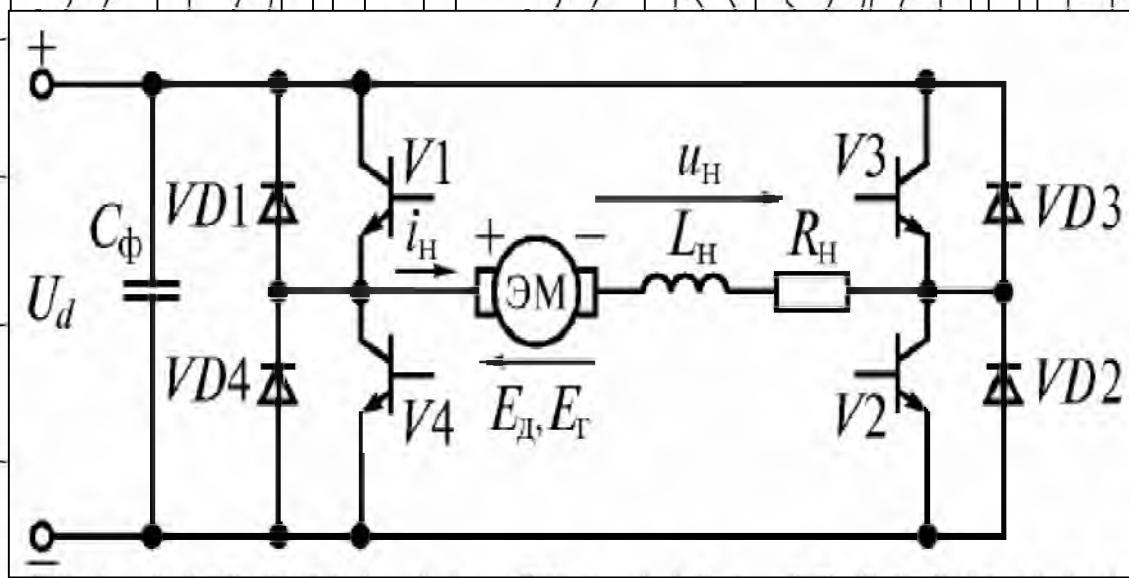


Рисунок 8. Схема реверсивного ППН, що працює на якорі двигуна

На рисунку 8 а показано напругу на навантаженні. В момент  $t_1$  при ввімкненні транзисторів  $V_1, V_2$  струм зростає під дією напруги  $U_d$  в ланцюгу «+» джерела живлення,  $V_1, EM, L_n, R_n, V_2$ , «-» джерела живлення. Полярність

ПЕДС двигуна ЕД показано на рисунку 12. В момент  $t_2$  при вимкненні транзисторів  $V_1, V_2$  струм починає протікати за рахунок енергії збереженої в індуктивності навантаження, по контуру  $L_n, R_n, VD_3$ , «+» джерела живлення, «-» джерела живлення,  $VD_4, EM$ .

Після переходу на гальмування електрорушійна сила генератора  $E_G = E_D$ , тому що швидкість не може бути змінена відразу і силу струму необхідно змінити в протилежному напрямку. Після подачі сигналу гальмування керуючі імпульси знімаються з  $V_1$  і  $V_2$  і подаються на  $V_3$  і  $V_4$ . Але транзистори не вмикаються, тому що за рахунок енергії, накопиченої в індуктивному струмі, струм продовжує текти через  $VD_4, VD_3$ . Індуктивність генератора мала, тому струм швидко падає до нуля. Генератор не живить джерело живлення, оскільки його ЕРС  $E_G$  менша за ЕРС джерела живлення. Тому для відновлення енергії потрібна додаткова електрорушійна сила. 12 ілюструє встановлений режим під час с. В цей момент  $t_3$  активні транзистори  $V_3$  і  $V_4$  і струм різко

зростає через замикання в ланцюзі «+» джерела живлення  $V_3, R_n, L_n, EM, V_4, "-"$ . При цьому електромагнітне поле джерела живлення та електромагнітне поле електричної машини працюють узгоджено. Сила струму в колі навантаження зростає в протилежному напрямку і досягає значення постійного струму ланцюга. У момент часу  $t_4$  транзистори  $V_3, V_4$  вимкнені, але струм тече в одному напрямку за рахунок перемикання узгодженого поля електромагнітного генератора і поля електромагнітної самоіндукції в колі  $L_n, L_n, EM, VD_1$ , потужність «+», потужність «-»,  $VD_2, R_n$ . Енергія повертається до джерела живлення.

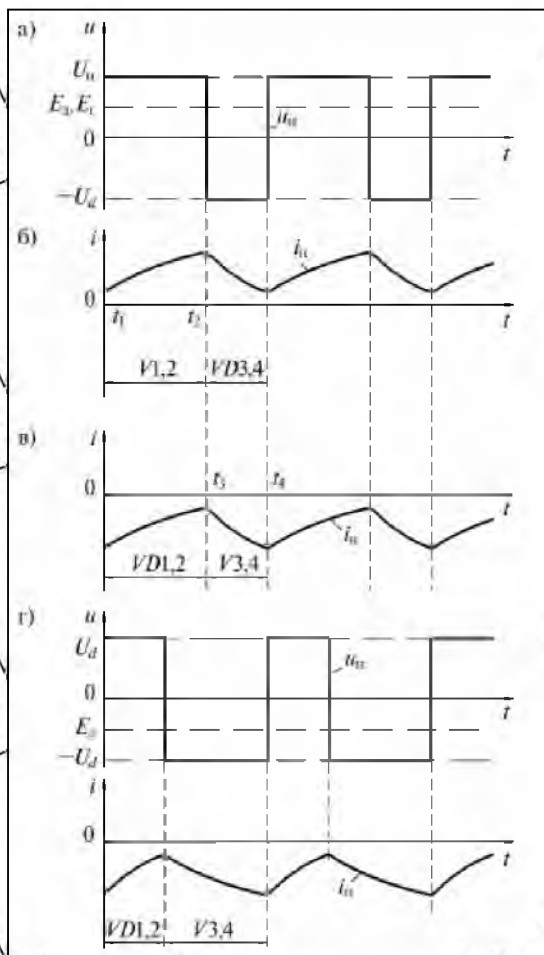


Рисунок 9 Діаграми напруг та струмів, що ілюструють роботу ПЧД двигуна при симетричному управлінні: напруга на навантаженні (а), струм в навантаженні в рухомому режимі (б), струм на навантаженні при гальмуванні (в), напруга на навантаженні та струм після реверса (г).

При симетричному управлінні під час рекуперації необхідно то вживати енергію від джерела, то повертати її назад, але в більшій кількості.

За рахунок рекуперації двигун гальмується,  $E_1$  зменшується до нуля, а  $\gamma_{3,4}$  зростає. При  $\gamma_{3,4} > 0,5$  починається розгін двигуна в протилежному напрямку. Тим часом діаграми рисунку 12 г ілюструють напругу на навантаженні і струм в навантаженні після реверсу та розгону двигуна до тієї ж швидкості.

Перетворювач частоти — це напівпровідниковий перетворювач, який перетворює енергію змінного струму однієї частоти в енергію змінного струму іншої частоти.

Існують різні схеми статичних перетворювачів частоти (ПЧ), кожна з яких відповідає певним вимогам до потужності, діапазону регулювання швидкості двигуна, ефективності, керованості тощо. Переважну більшість найпопулярніших схем можна розділити на два класи: ПЧ з прямим підключенням і ПЧ з зв'язком непрямого струму. Принцип роботи інвертора з прямим підключенням до мережі полягає в тому, що напруга електромережі

безпосередньо подається на обмотки статора двигуна через клапани, коли вони відкриті. Частота напруги на фазах двигуна регулюється послідовністю спрацьовування вентилів, а амплітуда - зміною кута їх спрацьовування.

Перевагою ПЧ з прямим підключенням є одноразове перетворення енергії, що забезпечує високий ККД. До недоліків можна віднести обмежений (до  $0,4 f_1$ ) діапазон регулювання частоти, а також наявність великої кількості вентилів і складної системи їх керування. Завдяки малому діапазону регулювання частоти такі інвертори використовуються в електроприводах з малим діапазоном регулювання швидкості.

Для електроприводів з великим діапазоном регулювання швидкості використовується інвертор з проміжним ланцюгом постійного струму. У таких інверторах напруга мережі змінного струму спочатку випрямляється, а потім знову перетворюється в напругу змінного струму, але з необхідною регульованою частотою і амплітудою. Перетворювачі частоти ланки постійного струму постачаються з керованим і некерованим випрямлячем.

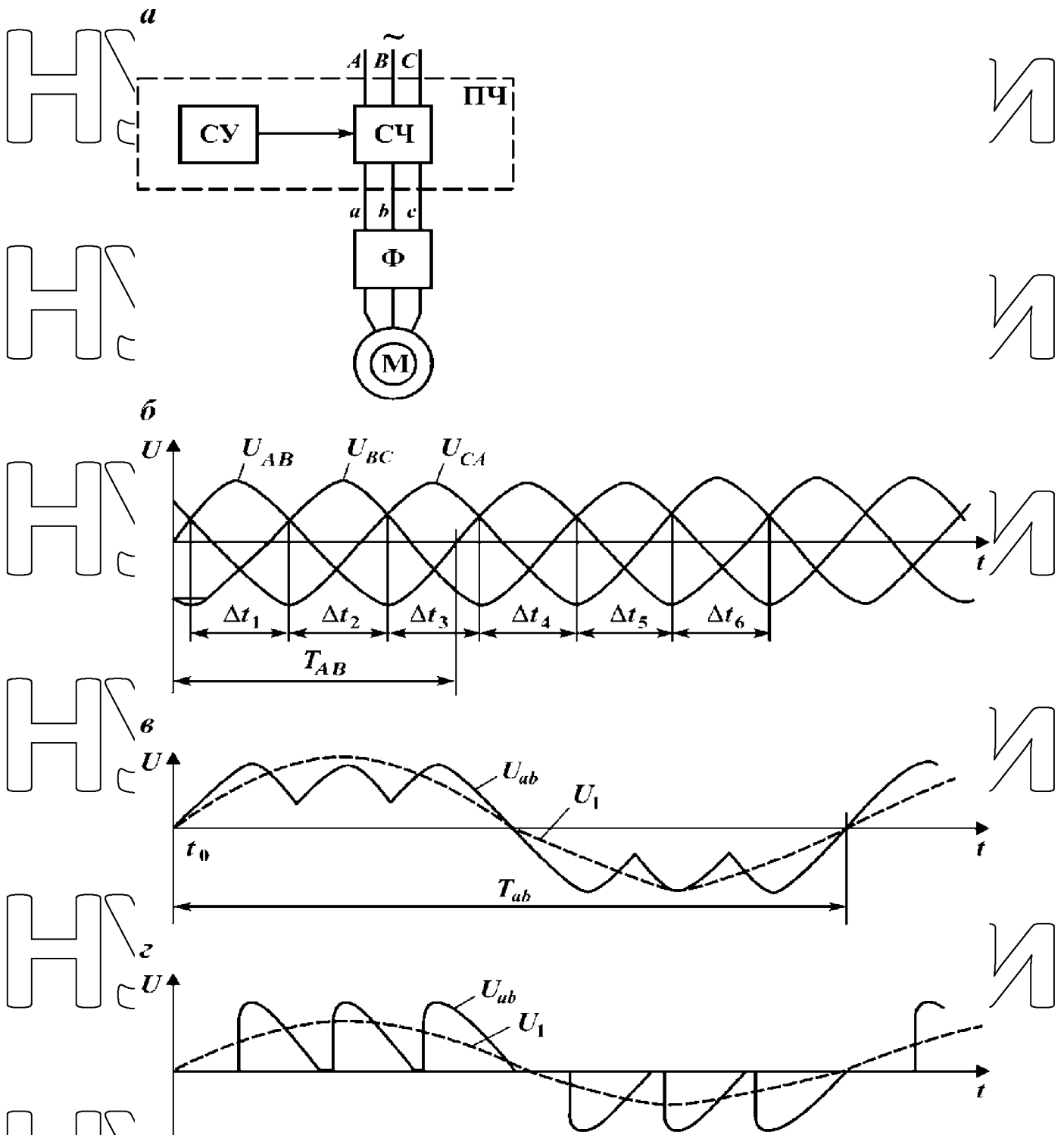
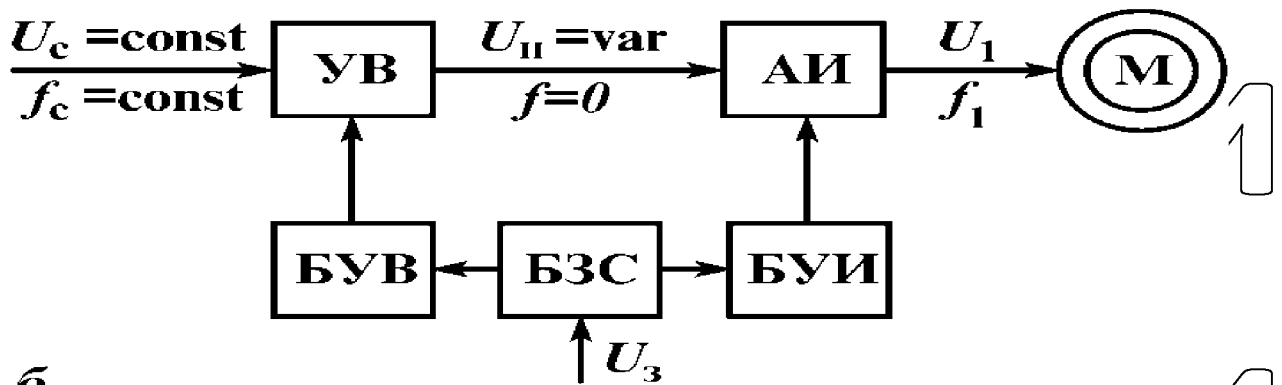


Рисунок 10) Схема перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком з мережею (а). Графіки напруг мережі живлення (б), напруг на виході перетворювача при кутах відмикання тиристорів  $\alpha = 0$  (в) і  $\alpha \neq 0$  (г)

Функціональна схема ПЧ з керованим випрямлячем показана на рис. 14а. На вхід керованого випрямляча УВ надходить змінна напруга мережі  $U$  з частотою  $f_c$ . На виході УВ напруга мережі перетворюється в напругу  $U$

постійного струму, значення якого визначається сигналом управління, що надходять на УВ від блоку управління випрямлячем БУВ. Вихід УВ безпосередньо пов'язаний зі входом інвертора АІ, який перетворює надходить на його вхід напруга постійного струму в напругу змінного струму. Причому частота  $f_1$  вихідної напруги  $U_1$  залежить від керуючого сигналу, що надходить на інвертор АІ від блоку управління інвертором буі. Керуючі сигнали, що надходять на БУВ і буі, формуються в блоці завдання швидкості БЗС напругою  $U_3$ , відповідним заданої швидкості.

**a**



**б**

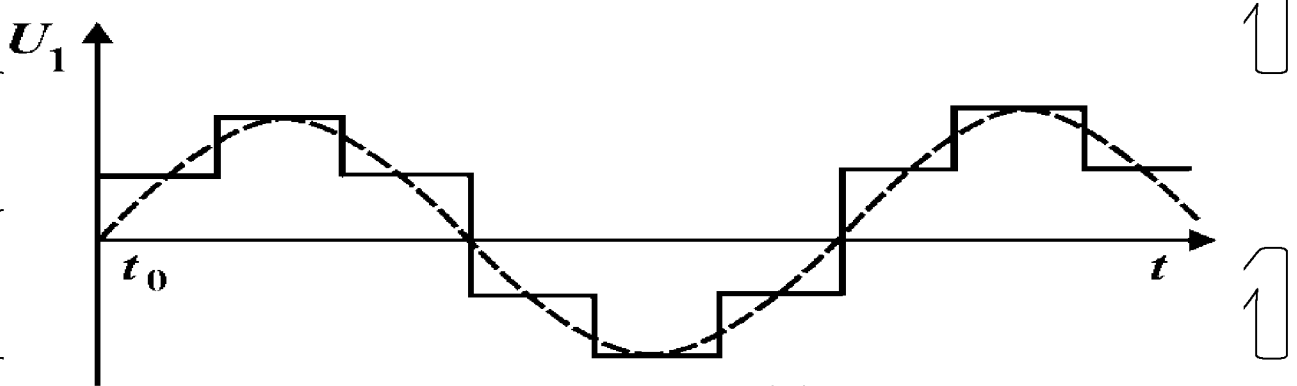


Рисунок 11. Схема перетворювача частоти з проміжною ланкою

постійного струму (а). Графік (б) напруги на виході перетворювача

Таким чином, на статорні обмотки двигуна надходить напруга, амплітуда якого формується керуванням випрямлячем, а частота - інвертором, тобто можна незалежно регулювати частоту і амплітуду напруги живлення, що є суттєвою перевагою.

Схема випрямляча вибирається з умови забезпечення вимог: з регулювання вихідної напруги; впливу на джерело змінної напруги, що живить ПЧ; допустимого рівня пульсацій випрямленої напруги та ін.

При харчуванні інвертора від промислової мережі випрямляч найчастіше виготовляють за трифазною мостовою схемою. Для зменшення пульсацій напруги на його виході встановлено фільтр, основне завдання якого максимально знизити напругу вищих гармонік з мінімальним ослабленням першої (основної) гармоніки вихідної напруги. Існує багато різних фільтрів, і структури фільтрів АІN і АІТ відрізняються. Якщо автономний інвертор виконаний за схемою АІN, то фільтр повинен бути ємнісним, а коли інвертор виконаний за схемою АІТ - індуктивним.

Гармонічний вміст вихідної напруги інвертора при використанні ШІМ мінімізується, якщо використовується синусоїдальна модуляція. При цьому роль вихідних фільтрів у забезпеченні синусоїдальної напруги зводиться до мінімуму, оскільки відносний вміст вищих гармонік дуже малий.

Основними обмеженнями у застосуванні методу ШІМ є складність систем керування ключовими елементами. Крім того, необхідні повністю керовані ключові компоненти, здатні працювати на високих частотах, тобто з невеликими перервами включення / вимикання. Такі технічні рішення стали практично здійсненними лише нещодавно – з появою дуже швидкодіючих ключових компонентів (IGBT тощо) і мікропроцесорних пристроїв керування.

# НУБІП України

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Навколишнє побутове, промислове та природне середовище таїть у собі різні потенційні загрози для людини, серед яких особливе місце займає ризик ураження електричним струмом. Електрика використовується людьми дуже широко, і з плином часу і у зв'язку з досягненнями науково-технічного прогресу сфера застосування електрики постійно розширюється, а разом з цим зростає і ризик заподіяння шкоди людям. Будинок сучасної людини наповнений різноманітними електроприладами та обладнанням, тому питання про те, як надати першу допомогу при ураженні електричним струмом, сьогодні є дуже актуальним.

Електротравмою називають ураження електричним струмом, патологічні зміни нервової системи, внутрішніх органів і зовнішніх покривів, а також психіки людини, викликані впливом електричного струму. Шкода, спричинена електричним струмом, може бути різною і залежить від того, як він проходить через тіло та енергії, яка буде перетворена під час розряду.

Вплив електрики на організм людини різний, ураження електричним струмом може викликати легке відчуття болю без будь-яких функціональних або органічних змін у тканинах і органах, але також може спричинити серйозні опіки, включаючи обвуглювання або опіки окремих частин тіла, що може спричинити втрату свідомості. , смерть Перша допомога при ураженні електричним струмом також важлива, оскільки в багатьох випадках є шанс врятувати життя і здоров'я потерпілого, якщо вчасно вжити всіх необхідних заходів.

Електричний струм може вразити людину безпосередньо з будь-якої частини електромережі з пошкодженою ізоляцією, вологою ізоляцією, але також може «вразити» сторонні предмети, випадково вдарившись об предмети. Струм високої напруги може пробиватися через землю або повітря, іноді на значну відстань, це коли кабель високої напруги розривається і падає



на землю. Найбільш небезпечним вважається змінний струм напругою понад 250 В, силою 0,1 А і частотою 50 Гц, однак не можна сказати, що менший струм не небезпечний для життя: летальний результат і важкий стан таке ураження електричним струмом може завдати шкоди здоров'ю. Слід зазначити, що наслідки ураження електричним струмом багато в чому залежать від стану організму та його реактивності в момент аварії.

Надання першої допомоги при ураженні електричним струмом відбувається в певній послідовності.

1. Необхідно усунути вплив на потерпілого шкідливих і небезпечних для життя і здоров'я факторів: усунути дію електричного струму, загасити запалений одяг, вийняти його з водитощо.

2. Необхідно терміново оцінити стан потерпілого.

3. Необхідно встановити характер заподіяної потерпілому шкоди, яка становить максимальну небезпеку для його життя.

4. Швидко скласти послідовність дій, які будуть виконані для порятунку потерпілого.

5. Необхідно взяти всіх необхідних заходів для збереження життя та здоров'я потерпілого, попередньо оцінивши їх у порядку невідкладності. Це

може бути відновлення дихання, можливо штучне дихання, непрямий масаж серця для відновлення роботи серця, зупинка кровотечі, допомога при переломах, перев'язка тощо.

6. До прибуття кваліфікованої медичної допомоги необхідно підтримувати основні життєві функції постраждалого.

7. Транспортування потерпілого до лікарні або виклик швидкої допомоги.

Особа, яка надає першу допомогу, повинна бути спокійною, бажано - мати певні навички надання першої допомоги, необхідно якнайшвидше встановити стан потерпілого та розробити порядок надання допомоги. У випадках, коли потерпілий знаходиться без свідомості, необхідно стежити за його диханням, якщо мова западає, спробувати висунути вперед нижню

щелепу. Якщо відчувається пульс, але судорожне дихання буває рідко, необхідна термінова допомога: негайно зробити штучне дихання. При відсутності пульсу і дихання, шкіра синюшна, штучне дихання слід супроводжувати непрямим масажем серця.

Штучне дихання «з рота в рот» необхідне для надходження достатньої кількості повітря в легені потерпілого. Для цього людина лягає на тверду пряму поверхню, звільняється від тісного одягу (розстібає сорочку, знімає краватку), у роті можуть бути сторонні тіла, що утруднюють дихання (блювотні маси, протези тощо). ), їх необхідно видалити.

Потім необхідно максимально закинути голову потерпілого, підняти корінь язика, звільнивши дихальні шляхи. Зробивши вдих, потрібно прикрити своїм ротом рот потерпілого і енергійно видихнути, пропихуючи повітря в легені людини. При цьому грудна клітка повинна підніматися. Штучне дихання необхідно проводити до тих пір, поки потерпілий не почне дихати самостійно.

Заземлення електрообладнання.

За призначенням заземлення поділяють на три види - робоче заземлення, захисне заземлення, блискавкозахист.

До експлуатаційного заземлення відноситься заземлення нейтралі силових трансформаторів і генераторів - глухе або через дугогасильний реактор.

Захисне заземлення виконується, перш за все, для забезпечення безпеки людей.

Блискавкозахист заземлення використовується для направлення струму блискавки в землю від блискавковідводів і блискавковідводів (стрижнів або тросів).

Захисне заземлення повинно виконувати своє призначення протягом усього року, а заземлення і блискавкозахист - тільки в грозові періоди.

Призначення захисного заземлення. Захисне заземлення призначене для усунення ризику ураження електричним струмом у разі дотику до металевих частин електрообладнання, що знаходиться під напругою. Принцип роботи

захисного заземлення полягає в зниженні до безпечного рівня напруги дотику і кроку, викликаних коротким замиканням на корпусі електроприладів. Це

досягається шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання через низький опір заземлювача, а також вирівнюванням потенціалів основи, на якій стоїть людина, і заземленого обладнання шляхом підвищення потенціалу

основи до рівня заземлене обладнання.

Захисне заземлення — це паралельне включення в електричне коло заземлювального пристрою зі значно меншим опором  $R_z \ll R_r$  (рис. 3.3 4.6).

У мережах напругою до 1000 В опір заземлення не повинен перевищувати 4 Ом, напругою понад 1000 В - не більше 0,5 Ом.

Захисне заземлення застосовують в електроустановках напругою до 1000 В змінного струму з ізольованою нейтраллю або з ізольованим виводом джерела однофазного струму, а також в електроустановках напругою до 1000 В постійного струму, мережі з ізольованою середньою точкою.

Заземлення установок полягає в з'єднанні їх металевих частин (як правило, не під напругою) із землею за допомогою заземлювача, який має низький опір поширенню струму.

Заземлювальний пристрій складається із заземлювачів, заземлювачів і провідників, що з'єднують електроустановки із заземлювачами.

За розташуванням заземлювачів відносно заземлюваного обладнання заземлювачі поділяють на виносні та контурні. Заземлювачі дистанційного заземлювача розташовують на відстані від заземленого обладнання.

Контурний заземлювач забезпечує більш високий ступінь захисту, оскільки заземлювачі розташовані по контуру всіх заземлюваних пристроїв.

На практиці заземлення відбувається в такій послідовності:

- Вибирається заземлювач (штучний або природний);

- Розраховано пристрій заземлення;

- окремі електроди (заземлювачі) об'єднуються в один загальний заземлювач;

- Корпуси електроустановок підключаються до заземлювального пристрою;

- Підготовлено документацію щодо введення в експлуатацію заземлювача.

При виборі заземлювача часто використовують природні заземлювачі, якими

служать трубопроводи, прокладені в землі і мають хороший контакт із

землею, часто використовують сталеві труби ліній електропередач. При

будівництві промислових будівель в якості природних заземлювачів можна

використовувати металеві каркаси будівель.

# НУБІП України

## ВИСНОВКИ

Розглядаються варіанти підключення високовольтних двигунів до електромереж.

# НУБІП України

За допомогою: прямого підключення до електромережі через високовольтну комірку з вакуумним вимикачем; підключення до мережі через пристрій плавного пуску та підключення через частотний

# НУБІП України

перетворювач. Серед цих схемних рішень звертають увагу на недоліки умов перевантаження пускового струму по відношенню до номінальних значень електродвигуна; включення двигуна на максимальну швидкість частіше одного разу на годину; обмежений термін служби вакуумних камер;

# НУБІП України

швидкість двигуна не регулюється. Звертається увага на спосіб з'єднання за допомогою перетворювача частоти, для якого розглянуто схемні рішення з'єднання перетворювачів частоти з високовольтним електродвигуном; застосування перетворювача частоти низької напруги з використанням підвищувального та ступінчастого -перетворювачі; Перетворювач частоти середньої напруги. Розглянуті рішення схем дозволяють отримати плавну

# НУБІП України

синусоїдальну вихідну напругу і, як наслідок, підвищити стійкість системи керування двигуном; час перехідних процесів можна порівняти з характеристиками розгону двигуна при досягненні заданої швидкості. Однак

# НУБІП України

при цьому типі підключення висвітлюються недоліки, пов'язані з високими струмами в зоні.

«Підвищувальний трансформатор-електродвигун», що призводить до великих прогинів в системі аж до виходу з ладу перетворювача частоти.

# НУБІП України

Використовуючи схемне рішення установочного перетворювача частоти, можна: отримати вихідну напругу заданої величини з урахуванням необхідної кількості комірок елемента; заміна пошкодженого в середку шунтуванням без зупинки роботи перетворювача частоти; застосування законів регулювання електродвигуна в широкому діапазоні частот.

Проведений аналіз і представлена інформація дозволяють зробити висновки щодо питань, які обговорюються в цьому дослідженні.

Отримані результати можна представити у вигляді частуєчних положень і рекомендацій: - розроблені засоби дослідження дозволяють оперативно реєструвати всі механічні та експлуатаційні характеристики системи з частотно-регульованим асинхронним двигуном в повністю автоматичному режимі. Стенд універсальний і дозволяє перевіряти всі асинхронні двигуни максимальною потужністю 0,4 кВт і номінальним струмом до 3 А; -

встановлено, що для досягнення найкращого результату ефективного

впровадження перетворювачів частоти недостатньо знати максимальний момент навантаження та задану частоту обертання, а необхідно проаналізувати фактори, що впливають на характеристики. - при розробці

систем керування необхідно враховувати те, що існують режими роботи, ефективність яких вища, ніж у номінальному режимі; - для підвищення

ефективності побудови системи керування необхідно передбачити можливість перемикання керування з векторного на скалярне і навпаки; - у побутовому та промисловому обладнанні впровадження частотного

електроприводу підвищить ефективність роботи за рахунок зменшення втрат

при роботі в неномінальних режимах елементів системи (наприклад, зміна ККД компресора залежно від частоти його обертання та тиску, який необхідно створити).

## Список літератури

1. Шкінь О.М., Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П. Шляхи енергозбереження в системах господарсько-питного водопостачання на прикладі Чернігівського водопроводу / Водне господарство України, № 2 (104), 2013. – С. 18-22.

2. Хомуцькая Т. П. Энергосберегающие технологии в системах подачи и распределения воды / Сб научных трудов "Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства". – Рязань, 2016. – № 10. – С. 246-252.

3. Перетворювач частоти : Стаття про перетворювачі частоти. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency\\_changer](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_changer) (дата звернення: 2.06.2019).

4. Преобразователи частоты со звеном постоянного тока : Стаття про перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму URL: <http://eprivod.com/preobrazovateli-chastoty-so-zvenom-postoyannogo-toka> (дата звернення 10.06.2019).

5. Частотные преобразователи с непосредственной связью: Стаття про безпосередні перетворювачі частоти URL: <http://eprivod.com/chastotnyepreobrazovateli-s-neposredstvennoj-svyazyu> (дата звернення 10.06.2019).

6. Соїч А.В. Електронна система контролю тиску в мережі водопостачання : канд. бак. : Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, 2018. 100 с.

7. Ryan M.J., Lorenz R.D., R. De Doncker Modeling of multileg sinewave inverters: a geometric approach: technical journal. USA : IEEE Trans. Ind. Electron., № 6, 2009. pp. 1183–1191. 94

8. Петергер Ю.С., Соболев О.В. Применение геометрического подхода к анализу процессов в матричных преобразователях : наук. -тех. журнал. Київ : Технічна електродинаміка, № 5, 2011. 33–36 с.

9. Жуйков В.Я., Миколаєць Д.А. Застосування геометричного підходу для трифазного силового активного фільтру: наук.-тех. журнал. Київ: Технічна електродинаміка, №5, 2018. 35–38 с.

10. Мелешкин В.Н., Шапаева С.Н. Анализ и синтез алгоритмов управления ключами в матричном конверторе: тех. журнал. Магнитогорск: 96 Труды IV Международной (XI Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП2004, №1, 2014. 337–339 с.

11. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока: учебник. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.

12. Blaabjerg F., Casadei D., Klumpner C., Matteini M. Comparison of two current modulation strategies for matrix converters under unbalanced input voltage conditions: technical journal. USA: IEEE Trans. on Industrial Electronics, №2, 2012. pp. 289–295.

13. Casadei D., Serra G., Tani A.A. general approach for the analysis of the input power quality in matrix converters: technical journal. Baveno, Italy: Proc. IEEE-PESC, 2016. pp. 1128–1134.

14. Casadei D., Serra G., Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance: technical journal., Orlando, Florida: Proc. of IEEE-IECON, 2015. pp. 457–462.

15. Casadei D., Serra G., Tani A. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance: technical journal. USA: IEEE Trans. on Industrial Electronics, №3, 2018. pp. 401–411.

16. Nielsen P., Casadei D., Serra G., Tani A. Evaluation of the input current quality by three different modulation strategies for SVM controlled matrix converters with input voltage unbalance: technical journal. Delhi, India: Proc. of IEEE-PEDES, 2016. pp. 794–800.

17. Михальський В.М., Соколов В.М., Чопик В.В., Шаповал І.А., Артеменко М.Ю. Формування вхідного струму матричного перетворювача в умовах спотворення напруги живлення: наук.-технічний збірник. Київ: Технічна електродинаміка, №3, 2016. 33–25 с.



18. Власов К.П., Анашкин А.С. Теорія автоматичного керування: навч. посібник св. Петербург: Ст. Петербурзький державний гірський інститут ім П.В. Плеханов, 2003. 103 с.95

19. Воронов А.А., Кім Д.П., Лохін В.М. Теорія автоматичного керування: Навч. Московська інструкція: Вища ш. , 1986. 504 с.

20. Петергеря Ю.С., Соболев О.В. Побудова інваріантного матричного перетворювача системи керування – асинхронний двигун на основі геометричного підходу : техн. журнал. Київ: Електроніка і зв'язок, №10, 2001.140-143 с.21.

Аракелян А.К., Кокорін Н.В. Электропривод з матричним перетворювачем : техн. журнал. Москва: Електричество, № 10, 2008. 57-60 с. 22.

Аракелян А.К., Кокорін Н.В. Matrix Converter Safe Key Switching Комбінований алгоритм: тех. журнал. М.: Електричество, № 11, 2019.52-56 с.

23. Сидоров С.Н. Матричний перетворювач частоти - скалярний об'єкт керування: техн. журнал. Петербург: Силова електроніка, №3, 2019.31-35 с.

24. Ільїнський Н.Ф., Москаленко В.В. Електричний привід. Збереження енергії та ресурсів: підручник для студ. вищих навчальних закладів Москви. : Академія, 2008.208 с.

25. Белов Г.А., Ільїн І.В. Вплив вхідного фільтра на динаміку імпульсного перетворювача: Техн журнал. Москва: Електричество, № 12, 2003, 59-67 с.26.

Жуков П.В., Медведєв В.А. Застосування двоосьового перетворювача частоти Siemens SIMODRIVE 611U на підйомно-накопичувальній ділянці зварювального конвеєра агрегатно-кузовного виробництва ВАТ «АВТОВАЗ» : техн. журнал.

Тольятті: Проблеми електротехніки, енергетики та електротехніки, № 1, 2018.

192-196 с. 27. Виноградов А.Б. Новые алгоритмы пространственно-векторного управления матричным преобразователем частоты : тех. журнал. Москва : Електричество, №3, 2018. 41-52 с.