

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих
комплексів

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри


«12» 06

Костенко Д. В.
2026 р.

Кваліфікаційна робота

на здобуття рівня вищої освіти

бакалавр

на тему Дослідження енергетичних характеристик

асинхронного електропривода при частотному керуванні

Виконав: студент 4367ст3 групи


(підпис)

Калічинський О. М.

Керівник роботи:

К.Т.Н., ДОЦЕНТ


(підпис)

(посада, науковий ступінь, вчене звання)
Волянський С. М.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма Електромеханіка та електроенергетика

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми
«22» 2026 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття рівня вищої освіти бакалавр**

Студенту Калічинському Олегу Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження енергетичних характеристик асинхронного електропривода при частотному керуванні

Керівник роботи к.т.н., доцент Волянський С. М.
Затверджені наказом ректора № _____ від «__» _____ 2026 р.

2. Термін виконання роботи 09 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи напруга 220В, частота мережі 50Гц, діапазон регулювання вихідної частоти 5-150Гц, двигун асинхронний з КЗ ротором, вихідна напруга 3х380В.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів) загальні відомості про механізм та вимоги до електроприводу; аналіз автоматизованого електропривода; розробка математичної моделі електроприводу; охорона праці та навколишнього середовища

5. Перелік презентаційного матеріалу

1. Схема блока живлення і мереженого фільтру.
2. Схема блока процесора.
3. Схема блока автономного інвертора.
4. Схема блока клавіатури і блока індикації.
5. Блок-схема перетворювача частоти.
6. Блок-схема роботи програмного ШІМ.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання на ДП.	15.09.2025 р.	
2	Рубіжний контроль. Чернові варіанти розділів та розширеного змісту ПЗ	10.02.2026 р.	
3	Рубіжний контроль. Готовий розширений зміст ПЗ, спецрозділів, 1-3 розділи ПЗ. Розрахунки.	27.03.2026 р.	
4	Рубіжний контроль. Чернетка повної пояснювальної записки, презентації та доповіді.	08.05.2026 р.	
5	Кафедральний захист. Готова, зшита ПЗ, підписана студентом, керівником. Готова презентація та доповідь укр. мовою.	05.06.2026 р.	
6	Подання документів на захист.	09.06.2026 р.	
7	Захист ДП	15.06.2026 р. – 27.06.2026 р.	

Здобувач


(підпис)

Калічинський О. М.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Волянський С. М.
(прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	7
1. Принципи керування швидкістю асинхронного електропривода....	10
Параметри асинхронного двигуна при зміні частоти та напруги.....	13
1.2. Принципи частотного керування.....	15
1.3. Широтно-імпульсна модуляція напруги у перетворювачах частоти.....	19
1.4. Особливості двигунів для регульованого електроприводу.....	23
2. Перетворювачі частоти та принципи їх побудови.....	29
2.1. Перетворювачі з АІС на SCR-тиристорах.....	34
2.2. Перетворювачі з АІС на GTO і SGCT-тиристорах.....	37
2.3. Перетворювачі з АІН на IGBT-тиристорах.....	39
3. Розробка лабораторного стенда.....	41
Вибір центрального процесора.....	41
Опис схеми.....	46
3.2.1. Блок живлення.....	46
3.2.2. Блок процесора.....	47
3.2.3. Блок автономного інвертора.....	48
3.2.4. Блок індикації і клавіатури.....	49
3.2.5. Програмне забезпечення.....	51
Конструкція механічної частини стенда.....	54
Можливості що до подальшого розвитку стенда.....	55
4. Охорона праці.....	57
4.1. Вступ.....	57
4.2. Основні поняття у галузі охорони праці, їх терміни та визначення.....	58
4.3. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників що виникають при експлуатації розробленого устаткування.....	61
4.4. Розрахунок захисного заземлення.....	62

Висновки.....	70
Список використаної літератури.....	71
Додатки.....	73

Анотація

Дана кваліфікаційна робота присвячена розробці та виготовленню діючого зразка блоку частотного керування асинхронним двигуном стандартної серії потужністю до 500 Вт. На підставі аналізу технології процесу керування асинхронними двигунами, а також порівняння характеристик існуючих перетворювачів частоти провідних вітчизняних та закордонних виробників. Розглянуті теоретичні питання по темі роботи, та приведені описи схем і засобів керування діючим зразком. На базі перетворювача частоти розроблений стенд для дослідження електричних та динамічних характеристик асинхронного двигуна при частотному управлінні.

В роботі також розглядаються питання охорони праці робітників.

Ключові слова: асинхронний двигун, перетворювач частоти, частотне керування широтно-імпульсна модуляція.

Abstract

This qualification project is devoted to the development and fabrication of a working prototype of a frequency control unit for a standard-series induction motor with a power rating of up to 500 W. Based on an analysis of the technology for controlling induction motors, as well as a comparison of the characteristics of existing frequency converters from leading domestic and foreign manufacturers, the paper examines theoretical issues related to the topic and provides descriptions of the circuits and control mechanisms of the working prototype. A test bench based on the frequency converter was developed to study the electrical and dynamic characteristics of an induction motor under frequency control.

The paper also addresses issues related to worker safety.

Keywords: induction motor, frequency converter, frequency control, pulse-width modulation.

Вступ

Упровадження енергозберігаючих технологій сьогодні — це не дань моді, особливо для нашої країни і враховуючи наш нинішній економічний стан. Енергозберігаючих технологій багато, ефективність їх залежить від багатьох чинників. [17]

Сьогодні, коли понад 60% електроенергії, що виробляється в світі, споживається електричними приводами, проблема енергозбереження найтіснішим чином пов'язана з ефективністю електродвигунів. От чому таке актуальне створення енергозберігаючих систем з частотним управлінням для асинхронних трифазних двигунів.

Асинхронні двигуни (АД) завдяки своїй надійності, дешевизні і високим масогабаритним характеристикам знаходять широке застосування для самих різних приводів потужністю від 100 Вт до 100 кВт. Чим більше потужність використовуваного електродвигуна, тим вище вимоги до енергетичних характеристик самого приводу [11]. Так, для приводів потужністю більше 1 кВт серйозну роль виконує критерій енергозбереження, який залежить від принципу формування живлячої напруги і алгоритму управління АД. Частотне керування асинхронним двигуном здійснюється за допомогою автономних інверторів, які формують трифазну живлячу напругу із заданими амплітудою і частотою з постійної напруги з виходу некерованого випрямляча. У загальному вигляді система формування трифазної напруги складається з некерованого випрямляча, згладжуючого фільтру і автономних інверторів і має назву перетворювача частоти.

Досвід індустріально розвинених країн показує, що при ефективній технічній політиці питання про те, куди направляти капіталовкладення — на

збільшення виробництва електроенергії або на енергозбереження, в переважній більшості випадків розв'язується на користь інвестицій в енергозбереження.

За даними консалтингової групи ARCAdvisoryGroup (США), в 2004 році світовий ринок регульованих електроприводів оцінювався приблизно в 2,5 млрд USD і в найближчі декілька років ростиме щорічно на 5,3%. Передбачається, що за п'ять років в індустріально розвинених країнах співвідношення нерегульованого і регульованого електроприводу складе 1:1. В Україні регульований електропривод складає поки не більш 1,5–2% всього ринку приводів.

Створення силових напівпровідникових приладів з новими властивостями і характеристиками дозволило здійснювати перетворення електричної енергії у формах, найзручніших для її електромеханічного перетворення, що відкрило широкі можливості для створення технічно довершених регульованих електроприводів. А використання досягнень мікропроцесорної і комп'ютерної техніки принципово змінило елементну базу, функціональні можливості і «інтелект» систем управління електроприводами.

Розглянемо можливості, які дають нам перетворювачі частоти (ПЧ), правильніше говорити про частотно-регульований електропривод асинхронних електродвигунів. Можливості, що відкриваються при використанні перетворювача частоти як регулюючого пристрою для електроприводу, виконаного на асинхронному електродвигуні, безмежні. Однією з головних тенденцій розвитку сучасного електроприводу є використання його в цілях збереження енергетичних ресурсів і екології.

Слід зазначити, що використання перетворювачів частоти як регульований електропривод створює свої переваги за рахунок автоматичної зміни параметрів системи залежно від умов роботи механізму і найбільший ефект досягається коли умови роботи часто міняються і межі змін достатньо широкі.

При цьому ефект від роботи електроприводу визначається зниженням витрати електроенергії і підвищенням якості регульованого технологічного параметра, який найчастіший і визначає якість продукції. При такому варіанті використання ПЧ питома вартість перетворювача на 1 кВт потужності максимальна і рішення про установку ПЧ, як правило, приймається з потреби регулювання технологічних параметрів, хоча розрахунки показують, що складова економії електроенергії часто дозволяє окупити витрати на установку ПЧ менш ніж за 1 рік і далі приносити чисту економію.

Система регульованого електроприводу управляється мікроконтролером з достатньо складним програмним забезпеченням, що дозволяє задавати параметри регулювання залежно від необхідних умов роботи механізму. В зв'язку з цим розширюється область застосування регульованого електроприводу не тільки в сферах високих технологій, але і там, де до теперішнього часу традиційно використовувався простий нерегульований електропривод з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором. При цьому важливим стає підвищення енергетичної ефективності існуючих електроприводів, що дозволяють вирішувати технологічні задачі при мінімальних витратах.

Необхідно навчитися економно витрачати енергоресурси, чого можна добитися, вкладаючи засоби в енергозбереження, це дозволить знизити витрати енергоспоживання на 30—40%. А розвивати генеруючі потужності, не розв'язавши проблеми економного використання енергії, означає продовжувати збільшувати втрати ресурсів країни.

1. Принципи керування асинхронним електроприводом

В даний час більшість керованих електроприводів будуються на базі асинхронних електродвигунів і перетворювачів частоти, де перетворювач частоти виконаний по схемі: некерований випрямляч — автономне кероване інвертування напруги; тобто, спочатку електрична енергія мережі перетворюється в постійний струм, а потім інвертування створює трифазний електричний струм змінної частоти. Розрізняють два основні принципи управління перетворювачами частоти. [6]

До першого типу відноситься система скалярного управління, часто званої частотним управлінням, основною задачею якої є формування фазних напруг на підставі заданих значень амплітуди і частоти, одержуваних шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) інвертування, оминаючи яких і є трьох фазна напруга для живлення асинхронного електродвигуна. Даний принцип є найпростішим способом реалізації частотного управління і, за низьку вартість, широко використовується для приводу механізмів, що не пред'являють високих вимог до якості регулювання швидкості. В першу чергу це відноситься до електроприводів насосів, вентиляторів, компресорів. Даний клас механізмів володіє широкими потенційними можливостями енерго- і ресурсозберігання, які успішно реалізуються при упровадженні вказаного типу перетворювачів.

До другого типу систем управління відноситься система векторного управління, забезпечуюча характеристики асинхронного електроприводу, близькі до характеристик приводу постійного струму. Ці властивості системи досягаються за рахунок розділення каналів регулювання потокозчеплення і швидкості обертання електродвигуна, не досяжного при використуванні скалярного керування. При побудові вказаних систем використовується векторне

представлення фізичних величин. Перетворювачі, що використовують даний принцип управління, мають порівняно високу вартість і застосовуються в механізмах з підвищеними вимогами до якості регулювання швидкості, наприклад, приводи в верстатах, ліфтах, кранах. Хоча за наявності хороших датчиків зворотного зв'язку: датчиків положення, швидкості, в великому числі випадків, з цими задачами можуть справитися і перетворювачі скалярного принципу управління. Слід також відзначити, що існує чітка тенденція до відмови від датчиків швидкості і розробці алгоритмів визначення стану двигуна по зміряних фазних струмах і напругах, що веде до зниження вартості і підвищення надійності системи.

Новим напрямом у області розробки високоякісних систем управління є системи з прямим управлінням моментом [18]. Основна ідея управління полягає у тому, що на кожному кроці розрахунку визначається оптимальний стан інвертування напруги по значенню моменту і потоку статора, з системи виключається широтно-імпульсний модулятор, як окрема ланка. Система реалізує векторне регулювання швидкості, математичний апарат якого заснований на диференціальних рівняннях динаміки асинхронного двигуна і векторних співвідношеннях. Метод однаково коректний як для перехідних, так і для сталих процесів, що істотно підвищує динамічний діапазон роботи системи, приводить, наприклад, до відсутності провалів швидкості при скачках навантаження. Задача контура швидкості — задати миттєве положення вектора струму, необхідне для підтримки заданої швидкості. Задача контура струму — забезпечити реальне положення і амплітуду вектора струму рівними заданим значенням.

Момент перемикання інвертування не прив'язаний до періоду ШІМ, а залежить від реальної помилки вектора струму. Визначаючим в роботі контура є критерій вибору стану інвертування при перемиканнях і дозволяє:

- мінімізувати частоту перемикачів інвертування при малій амплітуді помилки;
- зменшити короткочасно виникаючу велику струмову помилку за мінімальний час при мінімальній кількості комутацій інвертування.

Даний метод управління струмом має істотні переваги в порівнянні з ШІМ управлінням. Він дозволяє будувати швидкісні системи, що миттєво реагують на обурюючі дії, і одночасно розсіювати менше енергії в силових ключах в порівнянні з методом ШІМ. Наприклад, заявлено, що привід відпрацьовує 100%-й стрибок завдання на момент за час, що не перевищує 2 мс, що є природною межею асинхронного двигуна. В більшості випадків ПЧ з таким типом управління дозволяє відмовитися від датчика швидкості, оскільки вбудований обчислювач швидкості оцінює частоту обертання валу двигуна 40000 разів в секунду з точністю 2 об/хвл.

Досвід роботи показує, що в переважній більшості вирішуваних на сьогоднішній день задач, досить перетворювача частоти з скалярним принципом управління і ШІМ модуляцією інвертування [19].

1.1 Параметри асинхронного двигуна при зміні частоти та напруги

Пониження напруги при номінальній частоті призводить до зменшення струму холостого ходу і магнітного потоку, а значить, і до зменшення втрат в сталі [11]. Величина струму статора, як правило, підвищується, коефіцієнт потужності збільшується, а ККД декілька падає. Обертаючий момент двигуна зменшується, оскільки він пропорційний квадрату напруги $M \equiv U_1^2$ (рис. 1.1.1 б).

Із зменшенням напруги мережі частота обертання ротора знижується (ковзання збільшується). Напруга U_1 впливає на значення максимального моменту M_{max} , а також на перевантажувальну здатність двигуна $\lambda = M_{max} / M_{nom}$. Так, якщо напруга U_1 знизилася на 30%, тобто $U_1 = 0,7U_{1nom}$, то максимальний момент асинхронного двигуна зменшиться більш ніж удвічі:

$$M'_{max} = 0.7^2 M_{max} = 0.49 M_{max}.$$

На скільки ж зменшиться перевантажувальна здатність двигуна? Якщо, наприклад, при номінальній напрузі мережі перевантажувальна здатність, то при пониженні напруги на 30% перевантажувальна здатність двигуна:

$$\lambda' = M'_{max} / M_{nom} = 0.49 M_{max} / M_{nom} = 0.49 \cdot 2 = 0.98,$$

тобто двигун не в змозі нести навіть номінальне навантаження.

При підвищенні напруги понад номінальну і номінальній частоті двигун перегрівається через збільшення втрат в сталі. Обертаючий момент двигуна росте, величина ковзання зменшується. Струм холостого ходу збільшується, а коефіцієнт потужності погіршується. Струм статора при повному навантаженні

може зменшитися, а при малому навантаженні може збільшитися унаслідок збільшення струму холостого ходу (рис. 1.1).

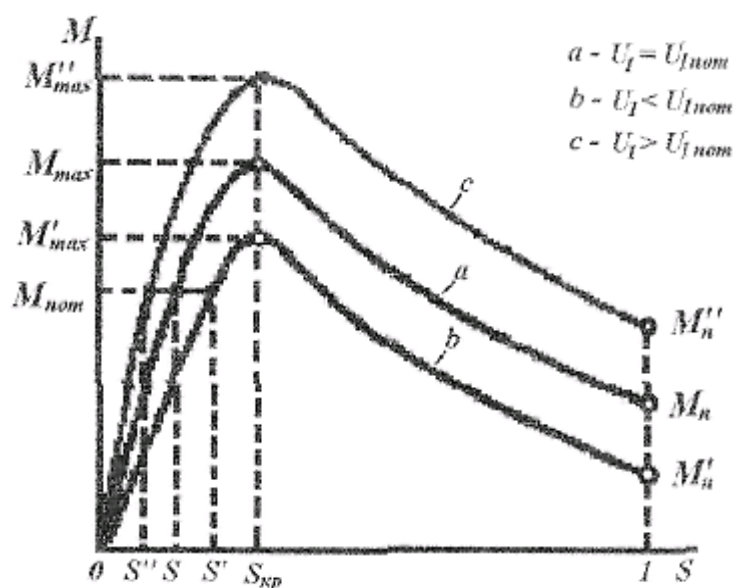


Рисунок 1.1 – Вплив зміни напруги на механічну характеристику двигуна.

При зменшенні частоти і номінальній напрузі збільшується струм холостого ходу, що приводить до погіршення коефіцієнта потужності [11]. Струм статора звичайно зростає. Збільшуються втрати в міді і стали статора, охолодження двигуна декілька погіршується унаслідок зменшення частоти обертання. із зміною частоти змінюватиметься і максимальний момент :

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

$$f_1 = \omega_1 p / (2\pi)$$

При підвищенні частоти мережі і номінальній напрузі зменшується струм холостого ходу і обертаючий момент.

1.2 Принцип частотного керування

Асинхронний двигун живиться від мережі змінного струму, як правило, трифазної. Трифазна система обмоток створює магнітне поле, що обертається, з кутовою швидкістю обертання

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_n}, \quad (1)$$

де f – частота живлячої мережі, p_n – число пар полюсів.

Магнітне поле, що обертається, перетинає витки обмоток ротора. Якщо швидкість обертання ротора відрізняється від швидкості обертання поля, то в роторній обмотці починає індукватися струм, який, взаємодіючи з полем статора, створює момент. В результаті двигун має механічну характеристику, зображену на рис. 1.2.

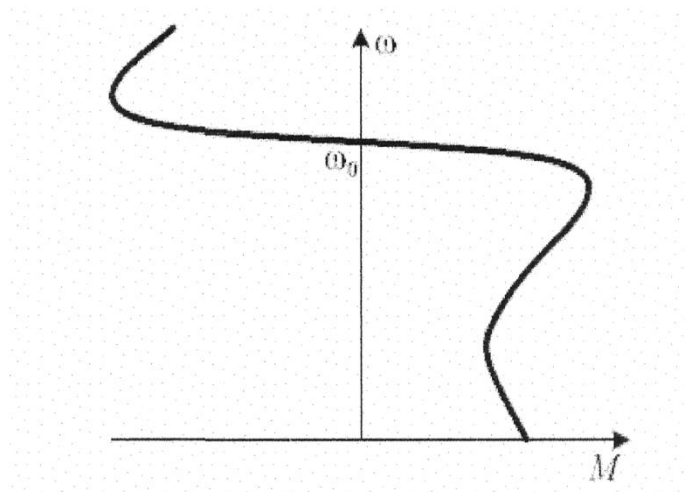


Рисунок 1.2 – Механічна характеристика АД.

Як видно з характеристики, швидкість на робочій ділянці несильно відрізняється від швидкості холостого ходу [11], і стає ясно, що ефективно

регулювати швидкість обертання двигуна можна, змінюючи частоту обертання поля статора або частоту живлячої мережі.

Залишається відкритим питання: як міняти живлячу напругу?

Як правило, двигун працює на коліні кривої намагнічування, як показано на рис. 1.3. Тоді стає зрозуміло, що збільшення потоку приведе до різкого зменшення струму, зниження – до збільшення моменту [11].

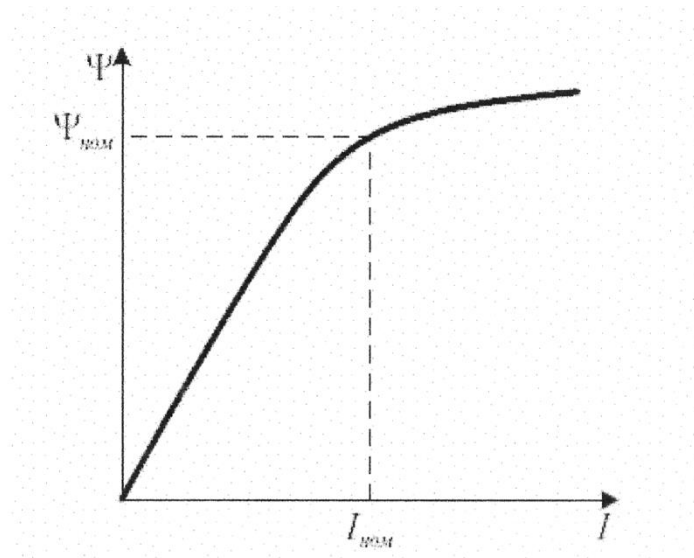


Рисунок 1.3 – Крива намагнічування двигуна.

Рівняння електричної рівноваги для однієї фази можна записати таким чином:

$$u_{a1} = i_{a1} \cdot R_1 + \frac{d\Psi_{a1}}{dt}. \quad (2)$$

Якщо зігнорувати падінням напруги на активному опорі фази статора, то рівняння спроститься:

$$u_{a1} = \frac{d\Psi_{a1}}{dt}. \quad (3)$$

Фазна напруга змінюється згідно із законом:

$$u_{a1} = U_{\max} \cdot \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

Якщо тепер прирівняти праві частини рівнянь (3) і (4), то вийде вираз:

$$\frac{d\Psi_{a1}}{dt} = U_{\max} \cdot \sin \omega_0 t, \quad (5)$$

який після інтегрування прийме вигляд:

$$\Psi_{a1} = -\frac{U_{\max}}{\omega_0} \cdot \cos \omega_0 t \quad \text{чи} \quad \Psi_{a1} = -\frac{U_{\max}}{2\pi f} \cdot \cos(2\pi f t). \quad (6)$$

З одержаного виразу видно, що амплітуда потоку фази прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна частоті, тому для підтримки постійності потоку потрібна зміна напруги пропорційне зміні частоти. Такий закон регулювання напруги у функції частоти називається $U / f = \text{const}$.

Якщо підставити у формулу (2) значення напруги для малої швидкості обертання, то елемент iR - складової оборотно-пропорційно збільшується по відношенню до напруги, що прикладається. Ця обставина приводить до істотного зменшення потоку на малих частотах і, відповідно, зменшення моменту [6]. Для забезпечення здатності навантаження по моменту близької до номінальної у всьому діапазоні швидкостей обертання застосовують

iR - компенсацію, тобто завищення напруги щодо закону $U / f = const$ як показано на рис .1.4.

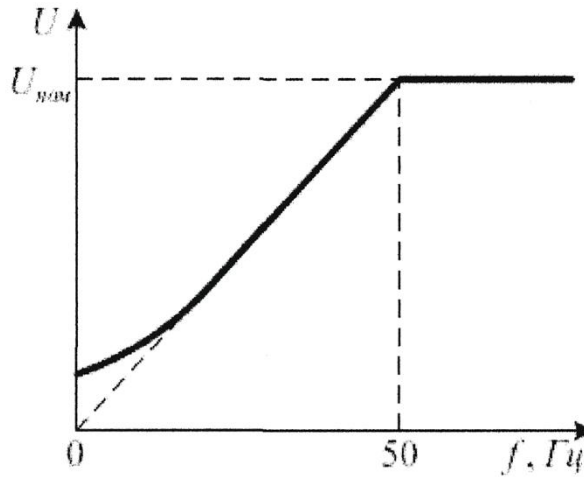


Рисунок 1.4 – Закон регулювання $U / f = const$ в перетворювачах частоти.

У області малих частот напругу живлення збільшують по відношенню до лінійного закону. У області високих частот напруга живлення доходить до номінального значення і далі своє зростання припиняє. Збільшувати його більше номінального не можна, оскільки під цей рівень напруги розраховується ізоляція двигуна при проектуванні.

Цей же закон зміни напруги можна одержати і іншими способами – з формули $E = 44.4 \Phi f w_{об} k$, або залежності критичного моменту від напруги і швидкості обертання.

1.3. Широтно-імпульсна модуляція напруги у перетворювачах частоти

Перетворювач частоти живиться від мережі змінного струму через випрямляч.

Випрямлена напруга заряджає ємнісний фільтр і формує ланку постійного струму, до якого підключене трифазне інвертування напруги. Для простоти замінено випрямляч і ємнісний фільтр джерелом постійної напруги (рис. 1.5).

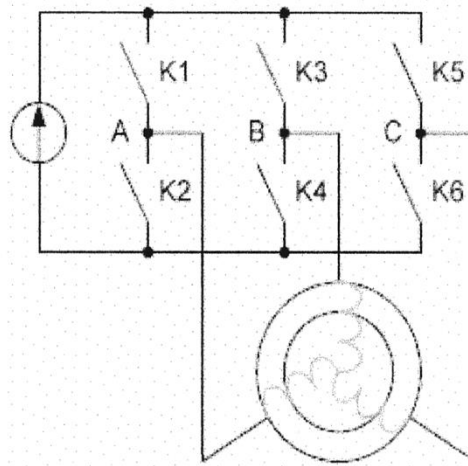


Рисунок 1.5 – Принципова схема інвертування напруги з підключеним двигуном.

Інвертування має шість ключів, в трьох стійках, підключених до трьох фаз двигуна [6].

Ключі в стійці діляться на верхній і нижній. Верхній ключ при замиканні підключає фазу до позитивної шини ланки постійного струму, а нижній ключ до негативної.

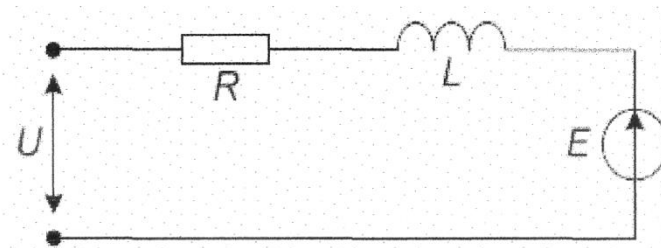


Рисунок 1.6 – Спрощена електрична схема фази двигуна.

Рівняння, відповідно схемі спрощеної моделі фази (рис. 1.6) виходить наступним:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + E. \quad (1.4.7)$$

Перетворимо рівняння, щоб одержати передавальну функцію ланки:

$$U - E = i(R + Lp), \quad (1.4.8)$$

$$\frac{1}{R + Lp} = \frac{i}{U - E}, \quad (1.4.9)$$

$$W(p) = \frac{1/R}{1 + Tp}, \quad (1.4.10)$$

де $T = \frac{L}{R}$ постійна часу фази двигуна.

Одержана аперіодична або інерційна ланка, яка є найпростішою фільтруючою ланкою. Якщо частота перемикачів силових транзисторів в інвертуванні буде істотно більше за частоту зрізу фази двигуна, то фаза ефективно фільтруватиме напругу [10], що прикладається до неї, в одержуваний у фазі струм, як показано на рис. 1.7.

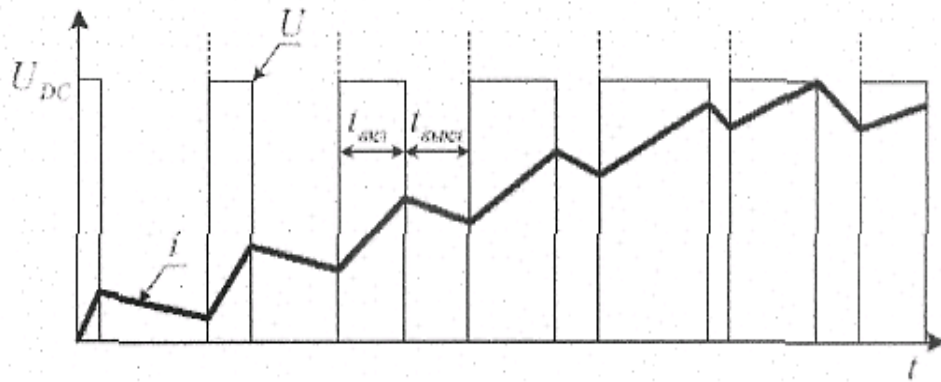


Рисунок 1.7 – Фільтрація струму у фазі при ключовій роботі інвертування в режимі ШІМ.

Інтервал часу знаходження ключа в провідному стані по відношенню до періоду широтно-імпульсної модуляції називають скважністю $\gamma = \frac{t_{\text{вкл}}}{T_{\text{ШІМ}}}$.

Якщо скважність ключа в кожній фазі міняти по синусоїдальному закону, то так само мінятимеся й середнє значення напруги фази на періоді (рис .1.8).

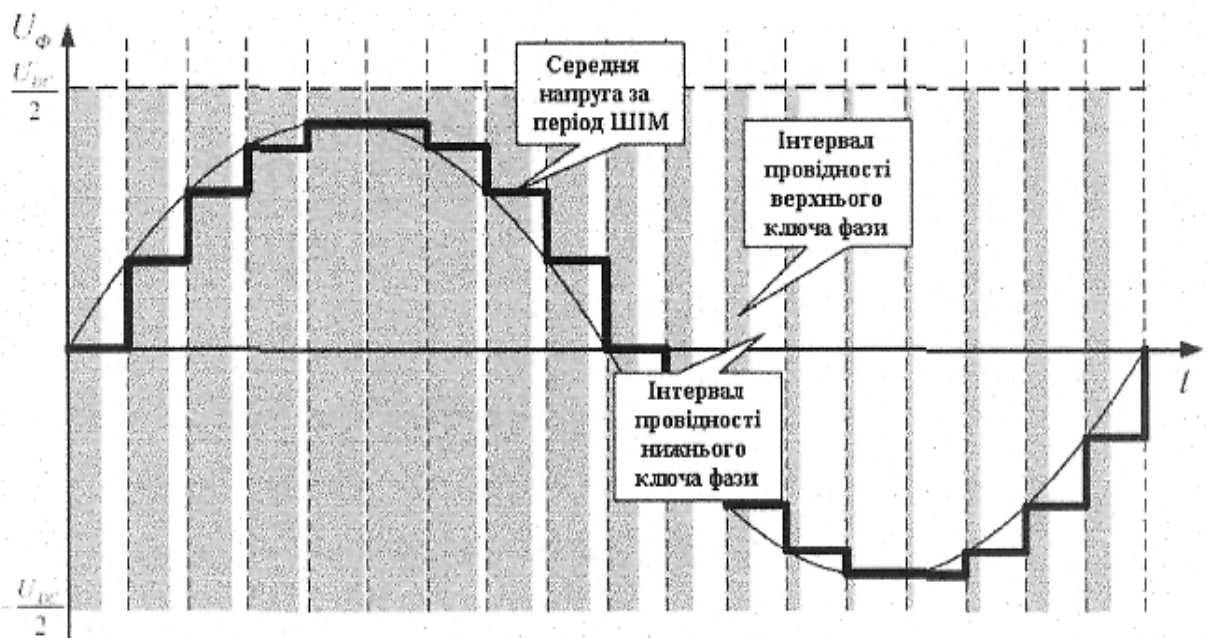


Рисунок 1.8 – Зміна напруги фази при зміні скважності.

Застосування інверторів з широтно-імпульсною модуляцією напруги дозволяє досягати ККД перетворювача частоти більше 95% [10], що було б неможливе при використанні транзисторів в лінійному (а не ключовому) режимі.

1.4. Особливості двигунів для регульованого електроприводу

Регульовані електроприводи завойовують області застосування нерегульованих як для забезпечення технологічних характеристик, так і з метою енергозбереження [17]. Причому перевага віддається саме машинам змінного струму, асинхронним (АД) і синхронним (СД), оскільки вони мають кращі масогабаритні показники, вищу надійність і термін служби, простіше в обслуговуванні і ремонті. Навіть в такій традиційно «колекторній» області, як електричний транспорт, машини постійного струму поступаються місцем частотно-регульованим змінного струму, і це визнано генеральним напрямом розвитку тягового електроприводу на найближчі десятиліття.

У 2002 р. На європейському ринку із загального числа регульованих приводів було продано 68% частотних приводів змінного струму, 15% – приводів постійного струму, інше склали неелектричні приводи (гідравлічні і ін.). Підраховано, що зараз процентне співвідношення регульованих і нерегульованих приводів в Україні на порядок менше, ніж в Європі, Японії і Північній Америці.

У частотно-регульованих приводах традиційно і найчастіше продовжують використовуватися нерегульовані двигуни загального застосування, розраховані на живлення від промислової мережі і на роботу з постійною швидкістю обертання ротора. У деяких публікаціях і рекламних матеріалах це навіть представлено як достоїнство частотно-регульованих приводів. Наприклад в механізмах головного руху верстатів пропонується використовувати асинхронні двигуни потужністю до 55 кВт в діапазоні регулювання швидкості обертання до 30000 об/хв. Та звичний двигун не працюватиме при таких швидкостях! Фірма АВВ, наприклад, дозволяє

експлуатувати свої 2- і 4-полюсні АД в частотних приводах з максимальною швидкістю обертання 6000 об/хв.

У іншому проспекті на ШИМ-перетворювачі з IGBT-транзисторами затверджується, що вони не «вимагають підбору спеціальних двигунів, а у вихідній напрузі відсутні вищі гармоніки»; у діапазоні частот 0-120 Гц і при напрузі до 7200 В привід здатний працювати при температурі оточуючої серед: до 400 °С. Фантастичні можливості!

За деякими оцінками[18], використання звичних серійних АД в частотному приводі приводить до зниження КПД і вимагає завищення їх встановленої потужності на 15,5-20% при роботі в сталих режимах і до 40-45% – в динамічних режимах. Через вищі гармоніки напруги і струму на виході перетворювача частоти (ПЧ) на 5-6% зростають втрати в двигуні.

Провідні розробники і виробники електричних машин і електроприводів одностайні у тому, що для частотного регулювання потрібні спеціальні двигуни. Створити універсальний, відповідний для всіх випадків життя частотно-регульований двигун не можна. Оптимальним він може бути тільки для кожного конкретного поєднання закону регулювання і способу управління, діапазону регулювання частоти і характеру навантаження: постійної, обернено пропорційної швидкості обертання ротора, вентиляторної і випадкової, із заданими характеристиками вірогідності, тобто в ідеалі двигуни треба б диференціювати по типах виробничих механізмів, природно, підраховувавши економічну доцільність такого підрозділу. Вона, звичайно, залежатиме від масовості (об'ємів) застосування.

Також немає поки що ясності, чим повинні відрізнятися двигуни змінного струму, живлені від перетворювачів – джерел напруги і джерел струму. Частотно-струмовому приводу потрібні свої власні двигуни.

Ще на початку 1990-х років американський Інститут інженерів електриків і електронщиків (IEEE) поставив задачу розробити промислові стандарти на асинхронні двигуни, керовані ПЧ.

Отже чим частотно-регульовані АД повинні відрізнятися від традиційних?

1. Форма пазів ротора. Унаслідок «м'якого» частотного пуску на роторі не потрібні глибокі пази. При проектуванні таких двигунів взагалі не слід ставити задачу забезпечення кратностей пускового і максимального моментів, бо вони виходять автоматично в замкнутій системі регулювання. Управляючи частотою і напругою, можна регулювати не тільки швидкість обертання, але і ковзанням, тобто мінімізувати втрати в роторі. А векторне управління дозволяє підтримувати таку величину реактивної складової струму статора, при якій коефіцієнт потужності і ККД найбільші. Взагалі, якщо оптимально спроектувати машину для частотного регулювання, у неї можна одержати на 25% більшу потужність, ніж у звичної того ж об'єму, або зменшити об'єм при тій же потужності. Співвідношення активних матеріалів перерозподіляється у бік збільшення провідникових. Глибокі пази в серійному АД мають на 15-25% надмірної площі при роботі в сталому номінальному режимі. Цей резерв в частотно-регульованому приводі можна використовувати для зменшення активного опору ротора, тобто і робочого ковзання, і індуктивного опору розсіяння (для збільшення корисного моменту). Ширші пази мають на 15-25% менше індуктивного розсіяння.

2. Число пар полюсів. Швидкість обертання виробничого механізму визначається частотою живлення двигуна, кількістю його пар полюсів і передавальним чистому редуктора. Необхідну швидкість обертання можна забезпечити при різних поєднаннях цих трьох величин.

При пошуку оптимального повинні враховуватися:

- діапазон регулювання частоти і вартість ПЧ;
- доцільність використання редуктора і його вартість;
- вартість АД і споживаної енергії за час експлуатації приводу.

Сучасні єдині серії АД мають машини з максимальним числом полюсів – 12. Є спроби виготовлення АД для частотно-регульованого приводу ліфта і рольгангів з 20 парами полюсів. Напевно, рекордне для АД з короткозамкненим ротором кількість полюсів 32 мають машини Сафоновського заводу електромашинобудування на потужності 30 і 75 кВт. Тільки завдяки завищеній масі (1,9 і 2,7 т відповідно) у них прийнятні енергетичні показники: $\cos \varphi = 0,57-0,65$, ККД 84-88%.

3. Номінальна напруга двигуна. Відомо, якщо в регульованому приводі застосувати серійний двигун, без спеціальних заходів йому часто не дістає напруги на виході ПЧ. Отже, з метою спрощення системи логічно припустити, що двигун для комплектного частотного приводу можуть бути розраховані на нестандартну напругу основної гармоніки на виході ПЧ. Оптимальну величину цієї напруги повинні рекомендувати фахівці з перетворювальної техніки. Схоже, що тільки консерватизм і недолік економічних розрахунків дотепер не дозволяють електромашинобудівникам випускати двигуни на нестандартні напруги.

4. Синусоїдальність напруги і струму двигуна. Вважається, що ПЧ тим краще, чим більшу синусоїдальність напруги або струму в двигуні він забезпечує. Ця вимога знову ж таки йде від серійних двигунів, в конструкціях яких передбачається ряд заходів, що забезпечують синусоїдальність поля в повітряному зазорі (розподіл обмотки по пазях, укорочення її кроку і скіс пазів, а в СД ще і профілізація полюсів). А чи потрібно все це робити в частотно-регульованих машинах і чи обов'язкова для них синусоїдальність струму? Дослідження дають на це негативні

відповіді. Це відразу ставить проблему оптимізації обмоток статора частотно-регульованих двигунів, критерії проектування яких повинні відрізнятися від традиційних.

Використовування обмоток характеризує коефіцієнт сумісності, під яким розуміється відношення середньої густини енергії поля в зазорі за період зміни струму при чисто гармонійних тимчасових і просторових функціях, і з урахуванням обох типів гармонік. Існують такі поєднання тимчасових і просторових кривих, при яких використання обмотки не поступається синусоїдальним. Пошуки в цьому напрямі ще далеко не вичерпані.

5. Охолодження. Через низьку ефективність власних вентиляторів при роботі на малих частотах двигуни повинні бути забезпечені автономними вентиляторами-наїзниками з своїм приводом. Це необхідно для охолодження як активних частин, так і підшипників.

6. Перенапруження. ШИМ-комутація сучасних ПЧ викликає хвильові перехідні процеси і імпульсні перенапруження в системі ПЧ-двигун. Характер процесів і величина перенапружень залежать від крутизни фронтів живлячих імпульсів, індуктивних і ємностних параметрів системи. Несприятлива величина перенапружень в обмотці статора досягає подвійного значення амплітуди поступаючих імпульсів і навіть більше. Для захисту від них треба не тільки використовувати фільтри, але і підсилювати ізоляцію хоча б початкових витків обмотки, правильно вибирати довжину і конструкцію кабелю між ПЧ і двигуном, заземлення.

Високочастотна комутація в ПЧ обумовлює появу підшипникових струмів в двигуні, природа, шкідливі наслідки (підвищений знос підшипників) і способи боротьби з якими ще вимагають дослідження. Деякі фірми (наприклад АВВ) вже пропонують використовувати в частотно-

регульованих АД підшипники з ізолюваним внутрішнім або зовнішнім кільцем, з керамічними кульками і інші заходи. Підшипники з діелектричним покриттям випускаються і в Росії.

7. Підшипники. Якщо двигун працюватиме в зоні дуже високих швидкостей обертання, цим умовам повинні відповідати його підшипники, їх мастило, ущільнення і балансування ротора.

8. Шуми і вібрації. Вентиляційний шум двигунів має дві складові: аеродинамічну і структурну (від механічних вібрацій). При регулюванні швидкості обертання віброакустичні показники, природно, змінюються, причому в діапазонах низьких швидкостей переважає структурна, а високих – аеродинамічна. Значення швидкостей і величини діапазонів залежать від числа полюсів двигуна.

Розробники і виробники в різній мірі враховують розглянуті вище особливості регульованих двигунів змінного струму, хоча всі допускають використання в частотних приводах звичних серійних машин з пониженням їх номінальної потужності в середньому на 15%.

2. Перетворювачі частоти та принципи їх побудови

Більшістю провідних електротехнічних фірм особлива увага надається розробкам перетворювачів з регульованою вихідною частотою. Не дивлячись на відмінності в технічній політиці фірм в цій області, що пов'язане з достатньо гострою конкуренцією, необхідністю проведення дорогих досліджень і т.п., в цілому можна виділити деякі тенденції загального підходу до створення електроприводів з перетворювачами з регульованою вихідною частотою [10]:

- забезпечення електромагнітної сумісності автономного інвертора і асинхронного двигуна, що дозволяє використовувати стандартні двигуни практично без їх розвантаження по потужності;

- оптимізація параметрів «вентиля», що складається з силових напівпровідникових приладів, що особливо важливо при застосуванні приладів нового типу (IGBT, GTO, IGCT, SGCT);

- діагностика вентильного устаткування перетворювача, забезпечуюча превентивний контроль силових схем;

- вдосконалення функцій мікропроцесорного контролера;

- розширення можливостей (опцій), що надаються замовнику для різних технологічних застосувань частотно-регульованого електроприводу (насоси, вентилятори, компресори, конвейєри);

- вдосконалення тест-контролю елементів устаткування і вихідного контролю перетворювачів частоти;

- застосування нових конструкційних матеріалів, оптоелектроніки, вдосконалення системи охолодження силових напівпровідникових приладів;

- забезпечення електромагнітної сумісності перетворювачів з системою електропостачання і відповідності показників якості електроенергії діючим стандартам.

Двухланкове перетворення

Як відомо, частотне управління є найекономічнішим способом плавного регулювання частоти обертання асинхронного двигуна [17]. Він у всьому діапазоні регулювання працює з малою величиною ковзання ротора (малими втратами ковзання), зберігає високий коефіцієнт корисної дії (ККД) і хорошу «жорсткість» механічних характеристик.

Найбільше застосування для широкодіапазонного регулювання частоти обертання асинхронних двигунів одержали двухланкові ПЧ. Такі пристрої перетворюють електроенергію живлячої мережі в електроенергію з необхідними значеннями напруги, струму і частоти в два етапи [18]. На першому за допомогою випрямляча відбувається перетворення струму і напруги мережі з частотою 50 Гц в постійні струм і напругу. На другому етапі постійні струм і напруга перетворюються в змінні, але вже з новими, потрібними для забезпечення бажаного режиму роботи електродвигуна значеннями струму, напруги і частоти.

Це перетворення здійснюється спеціальними пристроями – автономними інверторами. Інвертор має таку назву тому, що його робота не пов'язана безпосередньо з живлячою мережею. Автономний інвертор може працювати, наприклад, і від акумуляторної батареї, а не тільки від мережевого випрямляча.

Не дивлячись на уявну громіздкість такого методу перетворення, ККД двухланкових ПЧ виявляється досить високим – 96,5–98,5%. Це обумовлено ефективністю вживаних силових напівпровідникових приладів в ключовому режимі роботи.

Автономне інвертування напруги

Якщо автономне інвертування одержує живлення від джерела напруги, тобто від джерела з малим внутрішнім опором (акумуляторна батарея, випрямляч з фільтром ємності), то на його виході при перемиканні силових напівпровідникових «ключів» може бути одержана змінна напруга у формі послідовності різнополярних прямокутних імпульсів.

Перша гармоніка такої послідовності повинна відповідати необхідному значенню вихідної напруги. В цьому випадку для навантаження – асинхронного електродвигуна – інвертор також є джерелом з малим внутрішнім опором, тобто джерелом напруги. Таке інвертування називається автономним інвертуванням напруги (АІН).

Автономне інвертування струму

Якщо інвертування одержує живлення від джерела з великим внутрішнім опором – джерела струму, наприклад, мережевого випрямляча з індуктивним фільтром (струм в індуктивності фільтру не може змінюватися стрибком), то при перемиканні «ключів» на виході інвертора може бути сформований змінний струм у вигляді послідовності різнополярних прямокутних імпульсів струму.

Перша гармоніка такої послідовності повинна відповідати необхідному значенню вихідного струму. В цьому випадку для навантаження інвертор є джерелом з великим внутрішнім опором, тобто джерелом струму. Таке інвертування називається автономним інвертуванням струму (АІС).

Сумісність перетворювача і двигуна

Відмінності в технічних рішеннях таких фірм, як ABB, Siemens, Allen-Bradley, Toshiba, Mitsubishi, Robicon, Ansaldo, Alstom, ESTEL, GE, Hyundai, пропонуючих споживачам ПЧ і прагнучих забезпечити свою присутність на ринку, визначають доцільність проведення аналізу їх продукції і в першу чергу вживаних автономних інверторів. Адже в переважній більшості випадків вони повинні сполучатися з серійними асинхронними двигунами.

Одним з найважливіших критеріїв при оцінці ефективності автономних інвертувань є забезпечення їх електромагнітної сумісності із стандартними асинхронними двигунами. Будучи джерелом вищих гармонік, вони впливають як на втрати в двигуні і його допустиме навантаження, так і на ізоляцію статора. Ця обставина є особливо важливою, і його потрібно враховувати при виборі типу інвертора і відповідно ПЧ для стандартних асинхронних двигунів, що мають обмежені запаси по ізоляційній міцності. У системі «ПЧ – асинхронний двигун» можна використовувати будь-який стандартний двигун, але необхідно враховувати зниження допустимого моменту унаслідок додаткових втрат через вищі гармоніки в струмі автономного інвертора і погіршення умов охолодження самовентильованих двигунів при роботі в діапазоні регулювання частоти обертання.

Це обмеження не так критично для частотно-регульованих електроприводів турбомеханізмів з квадратичною характеристикою моменту опору, оскільки в цьому випадку при зниженні частоти обертання активно знижується струм навантаження двигуна [19].

Електрична дія вихідної напруги інвертора на ізоляцію статора залежать від топології АІН і АІС і алгоритмів керування. Радикальне рішення, що найефективніше забезпечує електромагнітну сумісність інвертора і електродвигуна практично без розвантаження останнього, – застосування

широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при управлінні інвертуванням. ШІМ дозволяє сформувати квазісинусоїдальний струм в асинхронному двигуні з сумарними нелінійними викривленнями (total harmonic distortion) $THD \leq 5-6\%$. Хоча круг раціональних технічних рішень і схем ПЧ з автономними інверторами струму і напруги в цілому визначився, процес їх вдосконалення безперервно продовжується. З одного боку, їх характеристики значною мірою визначають техніко-економічні показники електроприводу в цілому, з іншої – істотний вплив на цей процес надає поява на ринку нових компонентів. Нарешті, такий важливий чинник, як застосування комп'ютерного керування і спеціалізованих мікропроцесорних контролерів, дозволяє формувати нові споживацькі характеристики регульованого електроприводу.

2.1. АІС на SCR-тиристорах.

Російська схема

Першими на початку 80-х років були створені ВПЧ, що містять автономні інвертори струму на SCR-тиристорах. Перемикання тиристорів в таких АІС забезпечується введенням тим або іншим способом додаткової ЕРС в контур комутації. Як джерело такий ЕРС в цих інвертуваннях використовують конденсатори [18].

Схема на мал. 2.1 розроблена у ВНІЕ більше 20 років тому і є базовою для ПЧ серії ЕТВА, вживаних в частотно-регульованих електроприводах. Промислове виробництво таких перетворювачів було освоєне Талліннським електротехнічним заводом (в даний час фірма ESTEL). Основне обмеження цього інвертування – комутаційні піки у вихідній напрузі і відносний великий вміст вищих гармонік в інвертованих струмі і напрузі.

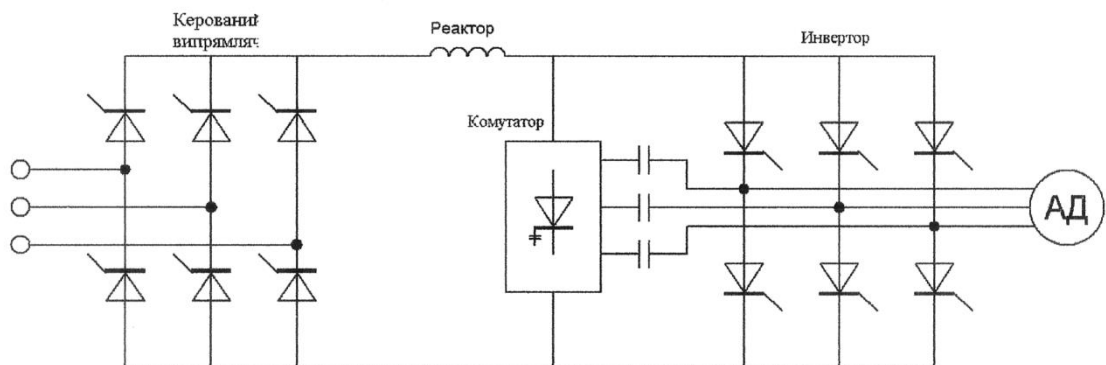


Рисунок 2.1 – Російська схема.

Осцилограма на мал. 2.2, знята на електроприводі ЕТВА живильного насоса ТЕС, ілюструє форми струму у фазі і лінійної напруги статора асинхронного двигуна при частоті 32 Гц.

Слід зазначити, що, не дивлячись на «примусову» конденсаторну комутацію в цій схемі АІС, комутаційний пік напруги формується в два етапи.

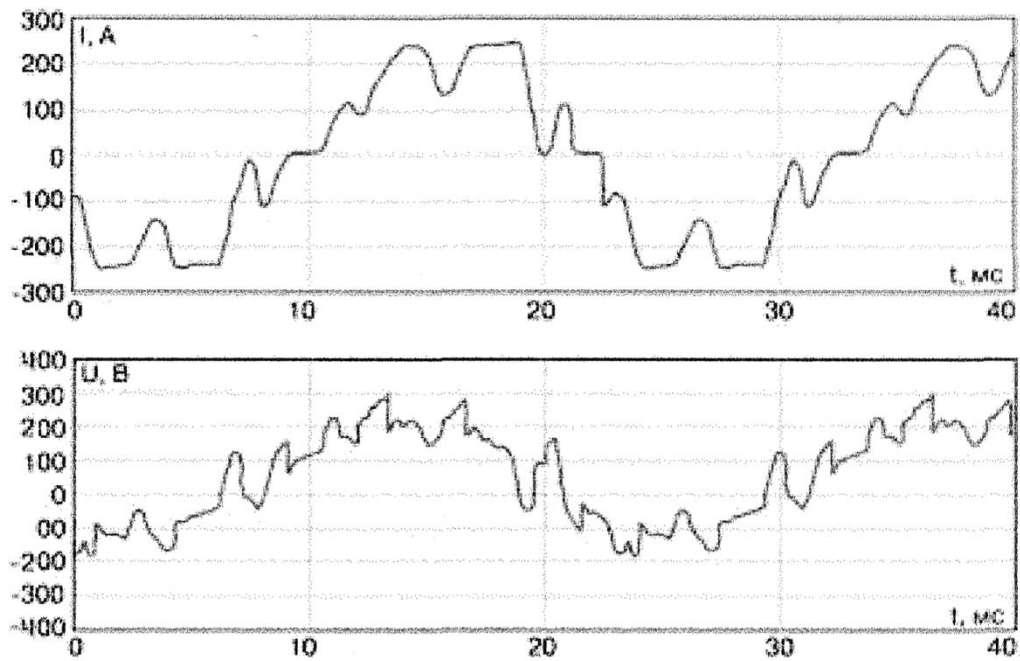


Рисунок 2.2 – Осцилограма, що знята на електроприводі ЕТВА.

Амплітуда напруги, що прикладається до статора двигуна, завантаженого на 90–95%, не перевершує 1,25 амплітуди номінальної лінійної напруги, що дозволяє використовувати серійні асинхронні двигуни з навантаженням не більш $0,9 U_{\text{ном}}$.

Американська схема

Схема АІС на мал. 2.3 була запропонована фірмою Ross Hill (США). Такі перетворювачі випускалися також компаніями Hill Gracham, Англія (Imvar) і Ansaldo, Італія (Silcovert H).

АІС з паралельними конденсаторами має достатньо «гладкі» форми вихідних струму і напруги (осцилограма на мал. 2.4 знята при номінальному навантаженні електроприводу).

Комутація в АІС також здійснюється за допомогою конденсаторів, але їх роль інша – забезпечити «природну» комутацію тиристорів, що можливе, якщо вихідний струм інвертування випереджає вихідну напругу.

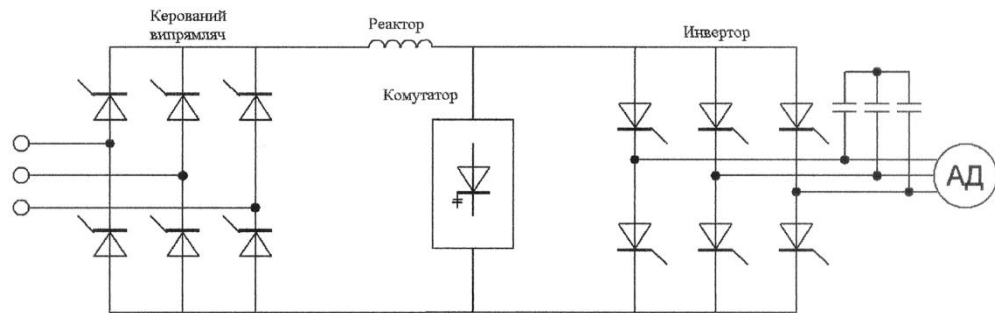


Рисунок 2.3 – Американська схема.

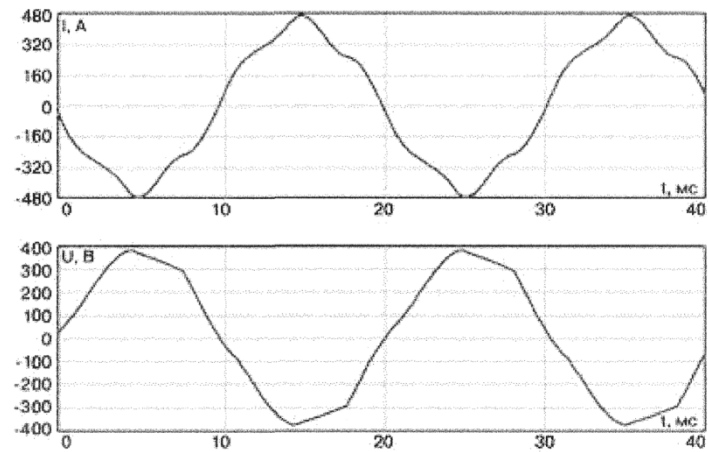


Рисунок 2.4 – Осцилограма, що знята при номінальному навантаженні електропривода.

Оскільки асинхронний двигун є активно-індуктивним навантаженням, паралельні конденсатори компенсують індуктивний характер навантаження, забезпечуючи перемикання тиристорів в режимі «природної» комутації. Проте ця компенсація можлива в певному діапазоні частот електроприводу. Звичайно паралельні конденсатори вибирають так, щоб забезпечити випереджаюче фазове зрушення струму для діапазону вихідної частоти інвертування приблизно 20–50 Гц. При менших частотах умови комутації погіршуються і для її забезпечення використовується вузол примусової комутації (комутатор) [10].

Комутатор забезпечує режим «Multi-swith» (переривання струму) від пускових частот аж до частоти 20–25 Гц, замикає ланку постійного струму і даючи тиристорам інвертору відновити замикаючі і управляючі властивості.

Електроприводи на основі таких схем у високовольтних перетворювачах частоти з АІС на SCR-тиристорах дотепер привертають споживачів, перш за все через відносно невисоку вартість.

2.2 АІС на GTO-та SGCT- тиристорах

Номенклатура силових повністю керованих напівпровідникових приладів, вживаних в автономних інвертуваннях напруги сучасних ВПЧ, достатньо широка[1].

Це такі прилади як:

- симетричні тиристори GTO в АІН перетворювачі ALPSA VDM 7000 фірми Alstom;
- асиметричні комутаційні тиристори з інтегрованим управлінням IGCT в АІН перетворювачі ACS-1000 і фірми ABB;

Лідером у виробництві і збуті ПЧ на GTO-тиристорах є фірма Allen-Bradley (Канада), з початку 90-х років виробляючи серію 1557 MV з повітряним і рідинним охолодженням тиристорів. В даний час перетворювачі з ШІМ-АІС виробляє також фірма Hyundai (Ю. Корея).

На рис. 2.5 приведена типова схема ПЧ на основі АІС з ШІМ. Інші схеми відрізняються тільки схемами керованого випрямляча.

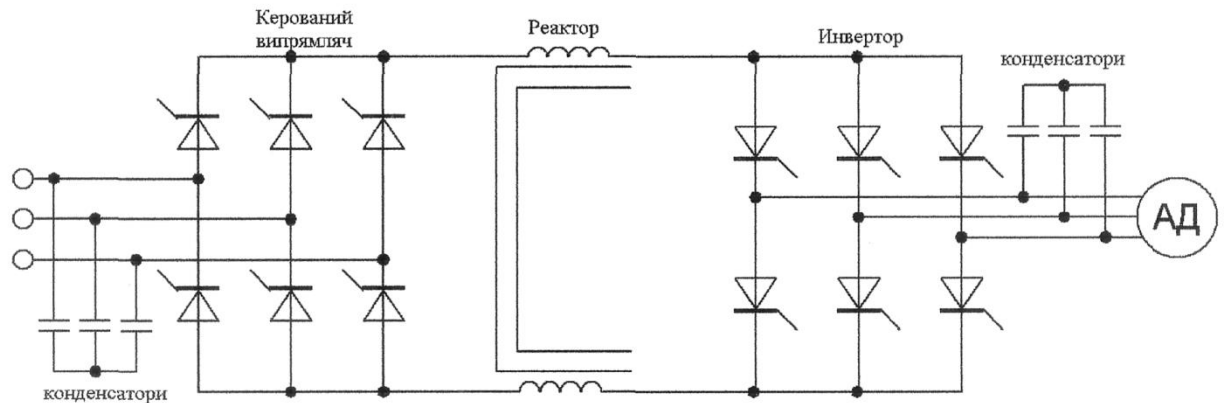


Рисунок 2.5 – Типова схема ПЧ на основі АІС з ШІМ.

Застосування ШІМ дозволило одержати близькі до синусоїдальної форми інвертуються струму і напруги, оскільки конденсаторний фільтр на виході інвертора, поглинаючи високочастотні гармоніки, забезпечує формування в двигуні квазісинусоїдальних струму і напруги.

Наступну модифікацію ВПЧ з ШІМ-АІС Power Flex 7000 Allen-Bradley виконала на симетричних комутаційних тиристорах з інтегрованим управлінням – SGCT. Вища частота модуляції (440–1000 Гц в порівнянні з 200–225 Гц у GTO-тиристорів) дозволила ще більше наблизити форми інвертуються струму і напруги до синусоїдальної і добитися значення $THD \leq 5-6\%$.

Осцилограма на рис. 2.6 ілюструє форми струму й напруги на виході АІС перетворювача Power Flex 7000 при роботі на асинхронний двигун.

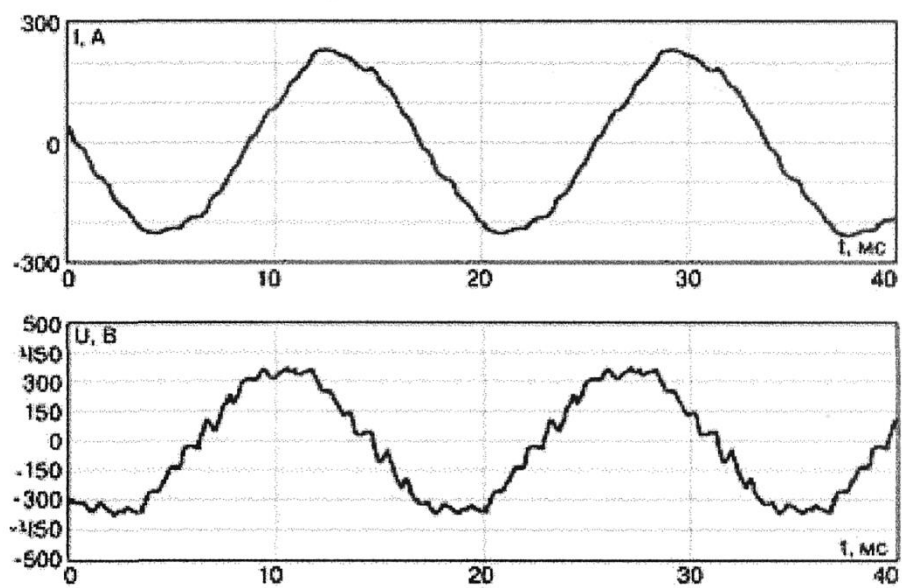


Рисунок 2.6 – Форми струму і напруги на виході АІС.

2.3. Перетворювачі з АІН на IGBT - транзисторах

Біполярні транзистори з ізольованим управляючим електродом IGBT використовуються в ПЧ з АІН Simovert MV фірми Siemens, Perfect Harmony і New Baby фірми Robicon, Tosvert-MV фірми Toshiba, Innovation Medium і Innovation SeriesH фірми General Electric, Meltrac F 500 HV і Tmdrive-MV фірми Mitsubishi Electric.

Особливість ПЧ з АІН – формування вихідної напруги у вигляді прямокутних імпульсів високої крутизни, визначуваної частотою перемикання напівпровідникових приладів (IGBT). Унаслідок наявності індуктивностей в кожній фазі навантаження енергія, запасена в ній, при відключенні останньої від джерела живлення через зворотні діоди розподіляється на інші фази [16], тобто трифазні інвертування володіють властивістю регенерації реактивної енергії відключеної (комутуючої) фази, яка йде на живлення двох інших фаз.

Перетворювачі на основі розглянутого (рис. 2.7) АІН випускаються фірмами ABB і Siemens потужністю до 5000кВт.

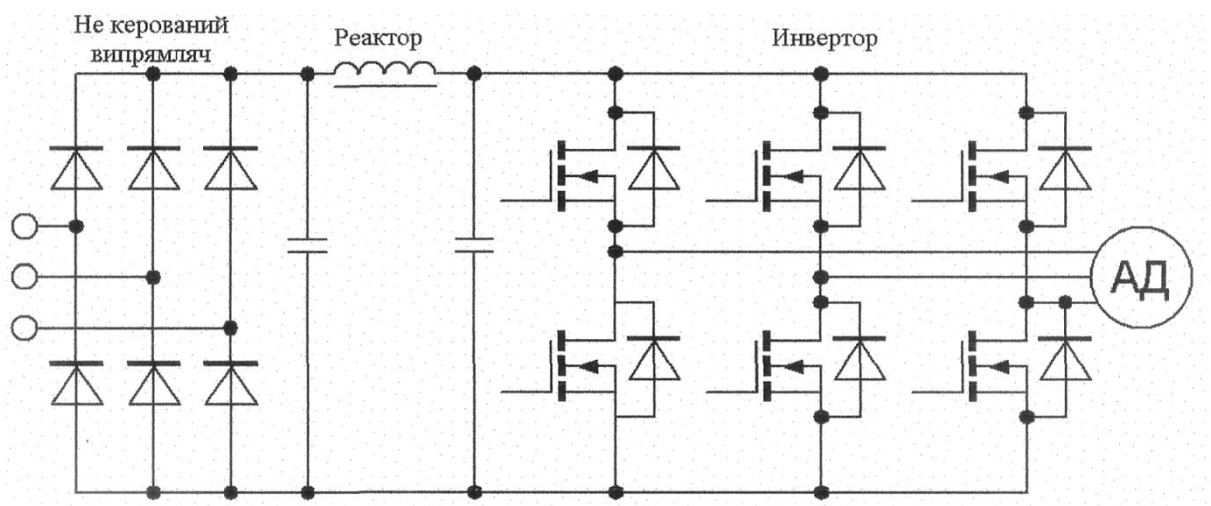


Рисунок 2.7 – Принципова схема перетворювача з АІН.

Завдяки практично синусоїдальній формі вихідної напруги (осцилограми на рис 2.8), такі ПЧ поєднуються із стандартними загальнопромисловими асинхронними двигунами без установки спеціальних фільтрів на виході, що дозволяє використовувати двигуни практично без розвантаження.

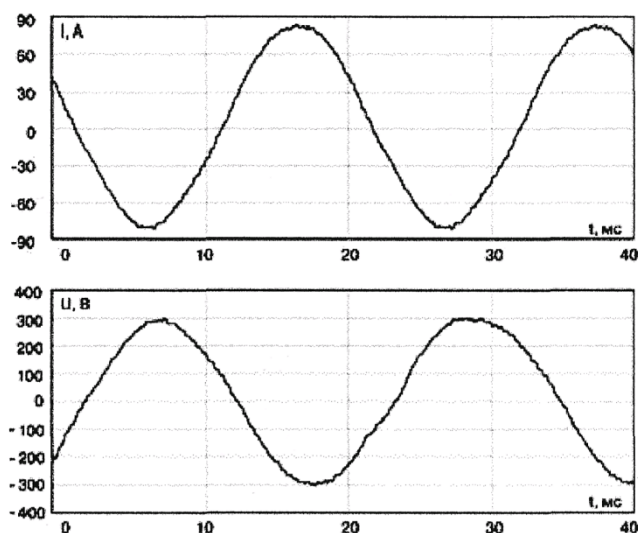


Рисунок 2.8 – Осцилограма вихідної напруги ПЧ.

Перетворювачі на транзисторах IGBT в порівнянні з тиристорним перетворювачами при однаковій вихідній потужності відрізняються меншими габаритами, масою, підвищеною надійністю через модульне виконання електронних ключів, кращого теплоодводу з поверхні модуля і меншої кількості конструктивних елементів.

Вони дозволяють реалізувати повніший захист від кидків струму і від перенапруження, що істотно знижує вірогідність відмов і пошкоджень електроприводу.

На справжній момент низьковольтні перетворювачі на IGBT мають вищу ціну на одиницю вихідної потужності, унаслідок відносної складності виробництва транзисторних модулів. Проте по співвідношенню ціна/якість, виходячи з перерахованих достоїнств, вони явно виграють у тиристорних перетворювачів, крім того, впродовж останніх років спостерігається неухильне зниження цін на IGBT модулі.

3. Розробка лабораторного стенда

3.1 Вибір центрального процесора

При виборі слід керуватися такими критеріями як функціональність, доступність, надійність, вартість і підтримка фірми виробника [1]. Проте, в даний час випускається порівняно не великий асортимент спеціалізованих процесорів для застосування в системах частотного керування асинхронними двигунами, і деякі моделі просто не доступні. Такі мікросхеми випускають фірми Hitachi, Motorola, і інші (які в Україні доступні виключно в промислових масштабах).

Мікроконтролери фірм Hitachi, Motorola мають паралельне програмування, що не дозволяє їх швидко інтегрувати без спеціалізованих засобів відладки, до того ж, немає доступного програмного забезпечення.

Слід зауважити, що в 2004 році, фірмою Atmel був впроваджений у виробництво спеціалізований мікроконтроллер AT90PWM3 [4]. Цей мікроконтроллер насамперед призначений для застосування в силовій електроніці, зокрема для частотного і векторного керування асинхронними двигунами. Але, на цей момент, роботу з цим контроллером можна провести суто теоретично, так, як ці мікросхеми в Україні також поки не доступні.

Виходячи з вищесказаного, приймаємо як центральний процесор мікроконтроллер сімейства AVR виробництва фірми Atmel. Ці контроллери мають високу надійність, порівняльно не високу вартість, є доступними і порівняно з іншими фірмами мають найвищу технічну підтримку.

У 1997 році, фірмою Atmel було анонсовано принципово новий напрям восьми бітових мікроконтроллерів під назвою - AVR. У 2003 році, фірма перейшла на нову технологію виготовлення кристала, переробила ядро процесора і концепцію номенклатури мікросхем, що випускаються. Ці

мікроконтролери на справжній момент мають краще співвідношення ціна-продуктивність, також, вони є «найшвидшими» контролерами широкого вжитку що випускаються в світі. Приріст продуктивності забезпечений не тільки за рахунок конвеєрної структури ядра (команда типу реєстр-реєстр виконується за один такт генератора), але і за рахунок відходу від класичної архітектури (відсутній акумулятор), завдяки чому ефективність програмного коду зростає (на різних програмах) від 2-х до 10-і раз.

Тому, враховуючи високу продуктивність контролерів серії AVR, яка дозволяє реалізувати широтно-імпульсну модуляцію програмним методом, величезний набір вбудованих периферійних пристроїв, а також широкомасштабну технічну підтримку фірми виробника, і беручи за увагу той факт, що ця дипломна робота виконує роль дослідницького стенду, приймаємо мікроконтроллер - ATMega16.

8-розрядні мікроконтролери широкого застосування з 16 Кілобайтами внутрішньої системно-програмованої Flash пам'яті ATMega16 має наступні особливості:

- 8-розрядний високопродуктивний AVR мікроконтроллер з малим споживанням;
- Прогресивна RISC архітектура:
 - 130 високопродуктивних команд, більшість команд виконується за один тактовий цикл;
 - 32 8-розрядних робочих реєстра загального призначення;
 - Повністю статична робота;
 - Продуктивність наближається до 16 MIPS (при тактовій частоті 16 МГц);

- Вбудований 2-цикловий перемножувач;
- Незалежна пам'ять програм і даних:
 - 16 Кілобайт внутрішньої системно-програмованої Flash пам'яті (In-System Self-Programmable Flash);
 - Забезпечує 1000 циклів стирання/запису;
 - Додатковий сектор завантажувальних кодів з незалежними бітами блокування;
 - Внутрішньосистемне програмування вбудованою програмою завантаження;
 - Забезпечений режим одночасного читання/запису (Read-While-Write);
 - 512 байт EEPROM;
 - Забезпечує 100000 циклів стирання/запису;
 - 1 Кбайт вбудованої SRAM;
 - Програмоване блокування, що забезпечує захист програмних засобів користувача;
- Інтерфейс JTAG (сумісний з IEEE 1149.1):
 - Можливість сканування периферії, відповідна стандарту JTAG;
 - Розширена підтримка вбудованої відладки;
 - Програмування через JTAG інтерфейс: Flash, EEPROM пам'яті, перемичок і бітів блокування;

– Вбудована периферія:

- Два 8-розрядні таймери/лічильники з окремим попереднім дільником, один з режимом порівняння;
- Один 16-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником і режимами захоплення і порівняння;
- Лічильник реального часу з окремим генератором;
- Чотири канали PWM (ШИМ);
- 8-канальний 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач;
- 8 несиметричних каналів;
- 7 диференціальних каналів (тільки в корпусі TQFP);
- 2 диференціальні канали з програмованим посиленням в 1, 10 або 200 крат (тільки в корпусі TQFP);
- Байт-орієнтований 2-водний послідовний інтерфейс;
- Програмований послідовний USART;
- Послідовний інтерфейс SPI (що веде/відомий);
- Програмований сторожовий таймер з окремим вбудованим генератором;
- Вбудований аналоговий компаратор;

– Спеціальні мікроконтролерні функції:

- Скидання по подачі живлення і програмований детектор короткочасного зниження напруги живлення;

- Вбудований RC-генератор, що калібрується;
- Внутрішні і зовнішні джерела переривань;
- Шість режимів зниженого споживання: Idle, Power-save, Power-down, Standby, Extended Standby і зниження шумів ADC;
- Виводи I/O і корпуси:
 - 32 програмовані лінії введення/виводу;
 - 40-вивідний корпус PDIP і 44-вивідний корпус TQFP;
- Робочі напруги:
 - 2,7 - 5,5 В (ATmega16L);
 - 4,5 - 5,5 В (ATmega16);
- Робоча частота:
 - 0 - 8 МГц (ATmega16L);
 - 0 - 16 МГц (ATmega16);

Блок-схема ATmega16 наведена у додатку 1.

Розташування виводів ATmega16 наведене у додатку 2.

Вибір цієї мікросхеми як управляючого процесора дозволяє реалізувати поставлену задачу в короткий термін і має великий запас на майбутнє (вимірювання струмів, напруг, реалізація регулятора, тахометра і т.д.).

3.2 Опис схеми

Функціонально схема розбита на 4-е блока:

- Блок живлення і мережний фільтр;
- Блок процесора;
- Блок силового інвертора;
- Блок індикації і клавіатури;

Окремою, але невід'ємною частиною йде програмне забезпечення.

3.2.1. Блок живлення

Схема блока живлення наведена у додатку 3.

Блок живлення складається з знижувального трансформатора, випрямних силових діодів, фільтра мереженої напруги і схеми захисту. Всі перераховані компоненти закріплені в основі корпусі і сполучені монтажним дротом.

Змінна напруга 220 вольт, через мережевий вимикач, (вимикач включений) поступає на плавку вставку F1 після чого йде на знижувальний трансформатор Tr1 з виходу якого живляться блок процесора та блок перетворювача) і випрямляч. Струмообмежувальний резистор R1 перешкоджає надмірному кидку струму у момент подачі живлення на випрямляч (при зарядці конденсаторів). Резистор R2 включений паралельно високовольтним конденсаторам C1, C2 і забезпечує їх розряд після виключення живлення (розряд до безпечної напруги відбувається приблизно за 10 секунд). Робоча напруга випрямляча складає 310 вольт, цією напругою живиться блок силового інвертора.

3.2.2. Блок процесора

Блок процесора виконаний на окремій платні. Головним пристроєм є однокристальна мікроЕОМ ATMeg16-PI (DD1). Не задіяні виводи мікроконтроллера виведені на окремі роз'єми. Причому, при створенні схеми, навмисне не були задіяні виводи, що надають широкі альтернативні функції, такі як - вхід аналого-цифрового перетворювача, зовнішні переривання, вхід таймера-лічильника та інші. Таке рішення дозволяє надалі розширити функціональні можливості частотного перетворювача, не вдаючись до істотних доробок, як апаратної частини, так і програмної.

Безпосередньо на платі процесора виконаний випрямляч (D4-D7) і параметричний стабілізатор напруги живлення з ланцюгами фільтрації (C3, C4, DA1), який формує 5 вольт постійного струму.

Кварцовий резонатор BQ1 і фазозсувні конденсатори C1, C2 включені по типовій схемі [4]. Резистор R1 і конденсатор C11 захищають контроллер від збоїв унаслідок наведень на вході Reset. Блокувальні конденсатори C9, C10, встановлені в максимальній близькості від виводів контроллера, шунтують високочастотні пульсації на шині живлення, виникаючі при роботі контроллера.

Для зв'язку з персональним комп'ютером задіяні виводи 14, 15 DD1 по альтернативну функцію - універсальний послідовний інтерфейс. Ланцюги R15-R18, VT1, VT2 і VD1, VD2 забезпечують індикацію наявності обміну. DD2 включена по типовій схемі, є перетворювачем рівня RS232 в TTL і необхідна для узгодження рівнів напруги між виводами контроллера і COM-портом комп'ютера.

Паралельний порт «С» DD1(виводи 22-29) виведений окремою 8-і розрядною шиною, яка підключена до входів трьох паралельних регістрів DD4-DD6. Таке рішення дозволяє економити виходи контроллера і обійтися без додаткових ключів, так, як здатність навантаження регістрів KP555IP22 складає

40 міліампер на вивід [довідник Шило]. Тому, світлодіоди та оптрони підключені до виводів регістрів безпосередньо через обмежуючі струм резистори. Входи дозволу виводу регістрів (вив. 1-3) об'єднані і підключені до контролера, таким чином, виключається помилковий вивід в блок інвертора при перехідних процесах виникаючих у момент подачі живлення.

Роз'єм XV1 необхідний для підключення програматора (послідовне, внутрішньосхемне програмування) і має типову (рекомендовану фірмою Atmel схему розключення виводів).

Схема блоку процесора наведена у додатку 4, а малюнок друкованої плати у додатку 5.

3.2.3. Блок автономного інвертора

Блок інвертора функціонально можна розбити на три вузли: оптична гальванічна розв'язка, вузол драйвера і силові ключі.

Оптична розв'язка є додатковим вузлом захисту не тільки модуля процесора, але і персонального комп'ютера, що підключається до частотного перетворювача [14]. Річ у тому, що вживана в даному проекті мікросхема драйвера IR2130 (DD1) не достатньо надійна, є багато випадків її пробою, на цей момент існує більш допрацьована IR2135 (що має аналогічну розводку ніжок), але на жаль вона поки не доступна. Надалі, рекомендується замінити встановлену IR2130 на IR2135, у зв'язку з цим, DD1 встановлена на панельку.

Мікросхема IR2130 є драйвером 6-ти ключів (IGBT або MOSFET), що має три виходи для управління нижніми ключами моста і три виходи для ключів з плаваючим потенціалом управління [15]. У ній передбачений захист по струму, який вимикає всі ключі і видає сигнал помилки FAULT, коли сигнал на виводі ITRIP перевищує 0,5 В. Це зручно для розробника, оскільки організація такого захисту вимагає від нього лише правильного визначення величини

резистора датчика. Входи драйвера узгоджуються з ТТЛ логікою, що дозволяє управляти ним за допомогою мікроконтролерів з 5-В живленням без додаткових перетворювачів рівня. Окрім цього, у IR2130 є вбудований підсилювач струму навантаження, і скидання тригера помилки здійснюється при подачі на всі входи управління неактивного рівня. Допустима напруга на інверторі, з яким працює мікросхема, складає 600 В. В даний час фірмою INTERNATIONAL RECTIFIER виробляються аналогічні драйвери з робочою напругою 1200 В (IR2230).

Драйвер інвертора DD1 включений по типовій, рекомендованій виробником схемі [5].

Діоди D13 - D18 шунтують резистори затворів R4-R9. Це дозволяє значно знизити динамічні втрати при виключенні.

За невелику номінальну потужність електропривод живиться від мережі змінного струму 220 В, при цьому для трифазного моста, як силові ключі, включені транзистори IRF740 (VT1-VT6). Через них можна пропустити потужність до 5 КВт. При більших потужностях треба переходити на живлення від трифазної мережі 380 В і використовувати IGBT транзистори.

Схема блоку автономного перетворювача наведена у додатку 6, а малюнок друкованої плати у додатку 7.

3.2.4. Блок індикації і клавіатури

Блок індикації і клавіатури складається з двох окремих плат, плати індикації і плати клавіатури.

На платі індикації розташовані п'ять восьми сегментних світлодіодних матриць, включених по схемі динамічної індикації, чотири з яких використовуються для відображення поточного значення параметра (частоти,

коефіцієнта Костенко, часу розгону-гальмування), а п'ята для індикації підміну в якому відбувається настройка в даний момент. На платі також знаходяться вісім резисторів для обмеження струму сегментів індикаторів і чотири світлодіоди. Два світлодіоди жовтого свічення використовуються для індикації наявності обміну даними з комп'ютером (RXD, TXD), один, червоний, для відображення стану струмового захисту (ERR) і зелений відображає наявність мережевої напруги (PWR).

На платі клавіатури розміщені вісім кнопок, які виконують наступні функції:

Кнопки $\leftarrow \rightarrow$ призначені для зміни положення курсора (на індикаторі відображається знаком «кома»). Кнопки $\uparrow \downarrow$ змінюють значення, відміченого в даний момент курсором, сегменту у велику або в меншу сторону на одиницю, а кнопка “Enter” для підтвердження зроблених змін. Кнопки “Ran” і “Stop” призначені для пуску і зупинки двигуна відповідно, а кнопка “Reset” для перезавантаження мікропроцесора зі встановленими за умовчанням параметрами на випадок введення неприпустимих значень коефіцієнтів і частот. Обидві плати оформлені в чорно-білому, зручному для очей оператора варіанті, забезпечені відповідними написами і винесені на лицьову панель перетворювача частоти.

Схеми блоку індикації наведено у додатку 8 а малюнок друкованої плати у додатку 9. Схеми блоку клавіатури наведено у додатку 10 а зображення друкованих плат наведено у додатку 11.

Схема з'єднань між блоками наведено у додатку 12.

3.2.5. Програмне забезпечення

Опис програми

Програма написана на мові Асемблера (мнемонічне представлення інструкцій) і побудована за принципом пакетного програмування. Основною задачею при створенні програми ставилося мінімальне завантаження процесорного часу, щоб була можливість подальшої модернізації.

При запуску мікроконтролера, по вектору переривання 0x0 викликається підпрограма ініціалізації RESET. У цій підпрограмі відбувається визначення рівня стека, повне очищення СОЗП (статичного оперативного запам'ятовуючого пристрою), визначення напрямку портів введення/виведення, конфігурація периферійних пристроїв, таких як таймер/лічильник «0», УСАП (універсальний синхронно/асинхронний порт).

Після завершення ініціалізації, починає виконуватися програма головного циклу MainLoop. Ця програма циклічна, і виконується завжди, за винятком обробників переривання. По суті справи, ця програма є примітивною операційною системою, яка аналізуючи ознаки (програмні прапори), запускає на виконання у фоновому режимі службові підпрограми, такі як:

SkanKey – програма обробник сканування клавіатури;

OutToLeds – програма динамічної індикації, забезпечує безперервний вивід дешифрованої (графічної) інформації на семисегментні світлодіоди індикатори;

CalcKostenko – програма викликається відразу після SkanKey і забезпечує перерахунок часових інтервалів для забезпечення правила Костенко, залежно від константи, що вводиться.

AccDess – програма що забезпечує функцію розгону/гальмування. Для цього, в ній відбувається відстежування поточного режиму роботи частотного перетворювача, перерахунок тимчасових інтервалів, перевід в черговий режим, наприклад, розгін > робота > гальмування > виключення інвертування.

Управління інвертуванням здійснюють дві програми TIM0_OVF SetPhase. Причому, SetPhase відповідає за включення силових ключів, а TIM0_OVF (обробник переривання по переповнюванню таймера/лічильника 0) за витримку часових інтервалів і виключення силових ключів. Установка відповідних часових інтервалів для кожного сегменту періоду, включення ключів реалізоване табличним методом (таблиця 3.2.1.). Елемент таблиці, для кожного сегменту вибирається за допомогою покажчика.

Решта підпрограм несе допоміжну функцію і викликається з програм описаних вище. Всі підпрограми рясно забезпечені коментарями і додаткового пояснення не потребують.

Повний текст програми з коментарями наведено у додатку 1#4.

Driver									
cp	7	6	5	4	3	2	1	0	mp
			c-	B-	a-	c+	B+	a+	
cp	mp	cp	mp		c+	B+	a+		
a		B							

Приклад розпаковки таблиці у програмний регістр Driver.

Де: а, в, с – номери часового інтервалу;

$c = 6 - a + v$;

ср – старший регістр;

мр – молодший регістр.

Driver – програмний регістр розміщений у СОЗП відповідає за поточний стан силових ключів драйвера інвертора.

Таблиця 3.2

Силові ключі драйвера інвертора

	а		в		3	2	1	0
	ср	мр	ср	мр				
	7	6	5	4				
0	0	1	1	1		0	1	0
1	1	0	1	1		0	1	0
2	1	1	1	0		1	1	0
3	1	1	0	1		1	1	0
4	1	0	0	1		1	0	0
5	0	1	1	0		1	0	0
6	0	1	1	1		1	0	1
7	1	0	1	1		1	0	1
8	1	1	1	0		0	0	1
9	1	1	0	1		0	0	1
10	1	0	0	1		0	1	1
11	0	1	1	0		0	1	1

3.3 Конструкція механічної частини стенда

Механічна частина стенду складається з шасі (два металевих кута 45х45 довжиною 600 мм. з'єднаних паралельно двома металевими смугами методом зварювання, з установчими отворами), асинхронного двигуна АИР63А2 потужністю 0,37 кВт., та швидкістю обертання 1385 об/хв. встановленого на шасі через віброзахистні гумові прокладки і закріпленого чотирма болтами М8х45, та генератора П12М потужністю 0,44 кВт. та швидкістю обертання 1500 об/хв., з'єданого з двигуном за допомогою муфти та приєднаного до шасі чотирма болтами М8х35. Цей агрегат змонтовано на нижній (окремій) частині лабораторного стенду.

Двигун підключено до перетворювача частоти, який змонтовано на верхній (зовнішній) панелі лабораторного стенду, трижильним кабелем. Сам перетворювач приєднано до живлячої мережі через авто вимикач, також змонтований на верхній панелі, з струмом вимикання 6 А. Зображення механічної частини стенду наведено у додатку 13.

Генератор використовується для створення регульованого (контрольованого) моменту на валу двигуна, який вираховується зі струму поєднаного через вимірювач до регульованого навантаження.

3.4. Можливості що до подальшого розвитку стенда

При виконанні даного дипломного проекту на жаль не вдалося закінчити стенд повністю. Проте дана тема вкрай цікава та достатньо об'ємна і може стати темою ще одного дипломного проекту.

Як вже указувалося в 3.2.2. При створенні схеми, навмисне не були задіяні виводи, що надають широкі альтернативні функції, такі як - вхід аналого-цифрового перетворювача, зовнішні переривання, вхід таймера-лічильника та інші. Таке рішення дозволяє надалі розширити функціональні можливості частотного перетворювача, не вдаючись до істотних доробок, як апаратної частини, так і програмної.

Обв'язавши стенд датчиками, і використовуючи можливості мікропроцесора можна за допомогою виходу на персональний комп'ютер (універсальний послідовний інтерфейс), доробки програми верхнього рівня одержати повнофункціональний стенд для зняття електричних і механічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором керованого від частотного перетворювача.

Як датчики можна використовувати, наприклад: для датчика швидкості обертання валу двигуна - магнітокеровані датчики Холла, або з невеликою доробкою валу, оптопару; для датчика струму (загального, на вході в автономний інвертор) можна використовувати прецизійні резистори низького опору з дільником напруги, а для датчика струму по кожній фазі - індуктивні датчики; оскільки вимірювання моменту на валу двигуна напряду, а не за допомогою перерахунку струму в ланцюзі генератора навантаження, набагато точніше - можна поставити між двигуном і генератором безконтактний тензометричний вимірювач моменту, і в парі з датчиком обертів можна напряду вимірювати потужність і порівнювати її з розрахунковою.

Особливо привертає можливість, за допомогою ПК одержувати дані про хід роботи у вигляді наочних, і зручних для порівняння результатів, графіків і таблиць з подальшим виведенням їх на друк.

У перспективі планується проведення на даному стенді наступних лабораторних робіт:

- 1) Визначення енергетичних параметрів двигуна ($a = \frac{\Delta n_{c_u}}{\Delta n_{V_H}}$, $i_0(m)$, і інших)

при частотному управлінні експериментальним шляхом.

- 2) Встановлення можливих варіантів частотного регулювання.

- 3) Зняття електромеханічних характеристик АД при різних частотах і постійній напрузі.

- 4) Зняття електромеханічних характеристик АД при різних законах частотного управління.

- 5) Зняття механічних характеристик АД за тих же умов.

- 6) Зняття різних характеристик двигуна $\eta(m)$, $\cos \varphi(m)$, $n(m)$.

Висновки

Відповідно до поставленої мети кваліфікаційної роботи, на підставі аналізу технології процесу керування асинхронними двигунами, а також порівняння характеристик існуючих перетворювачів частоти провідних вітчизняних та закордонних виробників, розроблено діючий прилад для частотного управління асинхронним двигунів, з допомогою якого можна змінювати частоту струму в межах від 5 до 150 Гц з одночасним регулюванням напруги згідно з законом частотного керування при сталому моменті $U / f = const$ (закон Костенко). На базі даного перетворювача частоти розроблений стенд для дослідження електричних та динамічних характеристик асинхронного двигуна при частотному керуванні. В роботі також розглядаються питання охорони праці робітників.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Василевський, О. М. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник / О. М. Василевський, В. О. Поджаренко. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 129 с.
2. Васьковський, Ю. М. Польовий аналіз електричних машин. Навчальний посібник / Ю. М. Васьковський. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 190 с.
3. Войтех, О. А. Вибір та адаптація серійних асинхронних двигунів для роботи від джерел регулюємої частоти / О. А. Войтех, О. М. Попович // Пр. Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – № 3. – С.34–39.
4. Електроніка та мікросхемотехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник / А. А. Щерба, К. К. Побєдаш, В. А. Святненко: – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 360 с.
5. Електропривод: Підручник / Ю. М. Лавріненко, О. С. Марченко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. П. Лисенко; За ред. Ю. М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.
6. Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці: Підручник / В. Ц. Жидецький – Львів: Афіша, 2002. – 128 с.
7. Казачковський, М. М. Комплектні електроприводи. Навчальний посібник / М. М. Казачковський – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2003. – 226 с.
8. Матвійчук, В. А. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник / В. А. Матвійчук, М. І. Стаднік О. О. Рубаненко. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – 344 с.
9. Попович, М. Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, І. Б. Клепиков. За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – Київ: «Либідь», 2005. – 680 с.
10. Шульга, О. В. Автоматизоване керування електроприводами. Навчальний посібник / О. В. Шульга. – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – 293 с.

11.Khodja, D. E. Three-phases model of the induction machine taking account the stator faults / D. E. Khodja, A. Kheldoun // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – № 28. – P. 157–160.

12.Kooa, M.-S. Universal control of nonlinear systems with unknown nonlinearity and growth rate by adaptive output feedback / M.-S. Kooa, H.-L. Choi, J.-T. Lima // Automatica. – 2011. – Vol. 47. – P. 2211-2217.

13.Landau, I. Adaptive control: algorithms, analysis and applications (communications and control engineering) / Landau I., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. – Springer, 2011. – 587 p.