

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Модернізація системи керування відрізного верстата виробів з металу

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Совгиря О.В

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2023 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,
електроніки та телекомунікацій

_____ О.В. Шефер

«01» квітня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

1. Тема роботи **«Модернізація системи керування відрізного верстата виробів з металу»**

керівник роботи Галай Василь Миколайович к.т.н., доц.

затверджена наказом вищого навчального закладу від ____ .2023 року № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) реалізувати функцію автоматичної подачі матеріалу відрізного верстату; передбачити 2 швидкості різання; потужність двигуна від 1 кВт; передбачити подачу ЗОР; Схема інвертора IRAMY20UP60B; Напруга живлення верстата 0,4 кВ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Характеристика об'єкту автоматизації; Характеристика елементів електроприводу верстата; Вибір раціональної схеми перетворювача потужності; Розрахунок елементів модернізованого перетворювача частоти; Опис механічних та енергетичних характеристик електроприводу; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) Об'єкт автоматизації вид загальний;
- 2) Компоненти системи електроприводу;
- 3) Характеристика експлуатації електродвигуна та перетворювача частоти;
- 4) Електрично-принципова схема керування;
- 5) Схема принципова перетворювача частоти;
- 6) Механічні та енергетичні характеристики електроприводу.

6. Дата видачі завдання 01.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи		Примітка (плакати)
1	Характеристика об'єкту автоматизації та аналіз функціональності аналогічних систем;		I 20%	Пл. 1
2	Характеристика елементів електроприводу верстата;		40%	Пл. 2,3
3	Порівняльний аналіз та вибір раціональної схеми інвертора;		II 60%	Пл. 4
4	Формування структури системи керування електроприводу;		80 %	Пл. 5
5	Дослідження енергетичних показників роботи електроприводу.		III 100%	Пл. 6

Студент: _____ Совгиря О.В
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи: _____ Галай В.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Зміст

Вступ.....	6
1 АНАЛІЗ УМОВ МОДЕРНІЗАЦІЇ.....	7
1.1 Характеристика металовідрізних верстатів.....	7
1.2 Задачі модернізації.....	11
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕРСТАТА.....	12
2.1 Конструкція асинхронного електродвигуна.....	12
2.2 Принцип роботи асинхронного електродвигуна.....	13
2.3 Принцип роботи перетворювача частоти.....	17
2.4 Особливості спільної роботи асинхронного двигуна та перетворювача частоти.....	19
2.5 Загальна характеристика втрат у асинхронному двигуні.....	20
3 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ.....	26
3.1 Інвертор Fairchild FSB50450.....	26
3.2 Інвертор Sanyo STK621-041A-E.....	27
3.3 Інвертор International Rectifier IRAMY20UP60B.....	28
3.4 Інвертор Fairchild FSAM15SH60A.....	29
3.5 Порівняння інверторних схем.....	30
4 АРХІТЕКТУРА МОДЕРНІЗОВАНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ.....	32
4.1 Архітектура модернізованого перетворювача частоти.....	33
4.2 Питання реалізації друкованої плати перетворювача частоти.....	43
ВИСНОВКИ.....	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46
Додатки.....	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД - коефіцієнт корисної дії

ПЧ - перетворювач частоти

ЕД - електричний двигун

АД - асинхронний двигун

ПЛК - програмований логічний контролер

IGBT - insulated-gate bipolar transistor

UTP - Unshielded Twisted Pair

LD - Ladder Diagram

ФБ - функціональний блок

РС - релейна схема

ІТ - інформаційні технології

ШИМ - широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми роботи. На даний час, основними вимогами до електроприводу виробничих механізмів є високий ККД, гнучкі можливості автоматизації, високі термін служби та надійність. У той же час, потрібна реалізація з найменшими можливими розмірами разом із найменшими можливими витратами на придбання. Однак ці аспекти часто виключаються.

З появою перетворювачів частоти (ПЧ) зросла важливість і діапазон використання такого типу електродвигунів, як асинхронні (АД). Перетворювач частоти забезпечує плавне регулювання швидкості асинхронного двигуна, який в основному використовується в простих механізмах, таких як насоси, ліфти, компресори, вентилятори тощо, але заживлення такого типу двигуна від ПЧ дає можливість значно розширити спектр використання АД.

Метою роботи є розробка автоматизованого електроприводу металовідрізного верстату із застосуванням енергоефективного перетворювача потужності.

Додатковим завданням даної роботи є модернізація перетворювача частоти для спільної роботи з АД. Модернізація полягає у використанні більш досконалої схеми перетворювача частоти та конструкції нової друкованої плати. Інша схема інвертора дозволить підключити двигун більшої потужності, захистити цей двигун від електричних коротких замикань, термічних пошкоджень і впливу зниженої напруги.

Задачі роботи:

- 1) Проаналізувати характеристику експлуатації силових елементів верстата.
- 2) Провести порівняння та вибір основних компонентів системи керування верстатом.
- 3) Провести відповідні дослідження щодо модернізації системи керування.

1 АНАЛІЗ УМОВ МОДЕРНІЗАЦІЇ

1.1 Характеристика металовідрізних верстатів

В сучасних умовах одна з найактуальніших сфер діяльності - це виробництво. Будь-яке виробництво потребує наявності різних верстатів для організаційного виробничого процесу. На даний момент вартість високотехнологічних верстатів оцінюється сотнями тисяч доларів, що є тягарем для бюджету будь-якої компанії, але без таких верстатів модернізація всього виробничого процесу практично неможлива. Так, постає питання, поводження з застарілими моделями, які недостатньо ефективні. Їх можна автоматизувати, додаючи певні складові або цілі модулі для покращення продуктивності, адже це значно дешевше, ніж покупка нового обладнання.

До основних цілей сучасного металообробного підприємства входить підвищення продуктивності обробки деталей/заготовок, що можна реалізувати за допомогою модернізації системи керування поточного обладнання, оскільки бюджет такої розробки значно дешевше, ніж купівля нових верстатів.

На даний момент є досить багато верстатів, які мають потрібні функції, нижче представлені деякі з найбільш відповідних за функціоналом.

Верстат SOCO FA-127DR

Верстат SOCO FA-127DR [3] (виробництво - Китай) представлений на рис.1.1.



Рисунок 1.1 - Верстат SOCO FA-127DR

Принцип роботи даного автоматичного верстата полягає в тому, що після установки труба або кілька труб затискаються, а після автоматично подається на задану довжину і відрізається, що циклічно повторюється до тих пір, поки труба не витратиться. Цей верстат є верстатом колонного типу, тобто пила переміщається вертикально, це забезпечує більш високу жорсткість і точність, в порівнянні з іншими будь-якими верстатами маятникового типу. У даній моделі можна регулювати та програмувати велику кількість різних параметрів, наприклад швидкість опускання пили та швидкість її обертання тощо. Оптимально підходить як для різання тонкостінних, так і для товстостінних труб, також є можливість пакетного різання в залежності від перерізу профільних труб, що значно збільшує продуктивність різання без втрати якості. Орієнтовна вартість верстата - 3142000 грн.

У таблиці 1.1 представлені переваги та недоліки SOCO FA-127DR верстата.

Таблиця 1 - Переваги та недоліки SOCO FA-127DR

Переваги	Недоліки
Широкий функціонал	Висока вартість
Різання тонкостінних та товстостінних труб профілю	Повільне різання
Верстат колонного типу	-
Виробник - один із лідерів ринку	-
Є можливість задавати велику кількість параметрів	-

Верстат TRIUMPH TS-400A

Верстат TRIUMPH TS-400A [4] (Країна-виробник - Німеччина) представлений на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Верстат TRIUMPH TS-400A

Дана модель, як і попередній аналог, служить для нарізки профільних металевих труб фасонного профілю і суцільного прокату. За допомогою пиляльного диска, який очищається приводними щітками під час всього процесу різання, відрізає на заданий розмір тонкостінні та товстостінні труби та профіль різного перерізу. Його принцип роботи: автоматична подача заготовок у місце різання відповідно до завдання, затискач у пневматичних леццатах, відрізка. Має великий функціонал: установка довжини подачі заготовки, установкою величини та швидкості опускання пили та ін. Орієнтовна вартість верстата - 2773000 грн.

У таблиці 1.2 представлені переваги та недоліки даного верстата.

Таблиця 1.2 - Переваги та недоліки верстата TRIUMPH TS-400A

Переваги	Недоліки
Широкий функціонал	Висока вартість
Різання тонкостінних та товстостінних труб профілю	Повільне різання
Станок колонного типу	-
Обладнаний приводними щітками для очищення диска	-

Верстат SOCO MC-315AC

Верстат SOCO MC-315AC [5], представлений на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 - Верстат SOCO MC-315AC

Даний напівавтоматичний верстат служить для різання профілю та труб діаметром до 115 мм. Відрізає трубу чисто і швидко і надалі не потрібно робити операцію з чистової обробки торців відрізаної деталі, що дуже актуально для багатьох завдань. Після встановлення та затискання заготовки лещатами, дискова пилка починає опускатися із заздалегідь відрегульованою швидкістю, після натискання на педаль. У процесі роботи на даному верстаті не буває ударних навантажень через некоректну роботу оператора, навантаження на зуби здійснюється рівномірно, що позитивно впливає на ресурс пильного диска.

Система складається з наступних елементів:

- асинхронний електродвигун;
- насос подачі ЗОР;
- пневморозподільники;
- блок підготовки повітря.

Асинхронний електродвигун верстата - FUKUTA AEVP [6] представлений на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 - Електричний двигун FUKUTA AEVP

У таблиці 1.3 наведено характеристику електродвигуна FUKUTA AEVP.

Таблиця 3 - Технічна характеристика FUKUTA AEVP [6]

Параметр	Перша швидкість	Друга швидкість
Потужність, кВт	1.2	2.2
Частота, Гц	50	50
Номінальна частота обертання, об/хв.	1460	2850
Номінальна напруга, В	400	400
Номінальний струм, А	2,8	5
Вага, кг	30	30

1.2 Задачі модернізації

Результат аналізу режимів роботи розглянутих зразків металовідрізних верстатів вказує на широкий функціонал відповідного обладнання. У той же час, всі розглянуті моделі мають загальний недолік - низька швидкість різання. Так, необхідно розробити систему керування режимом різання верстату, яка матиме змогу оптимізувати показники різання залежно від фізичних та масо-габаритних параметрів заготовки. Тобто, комплектуючись двигуном тієї ж потужності, станок матиме змогу швидше обробляти тонкостінні заготовки за рахунок застосування принципів балансу потужності.

Таким чином, задачі щодо модернізації є наступними:

- 1) Проаналізувати характеристику експлуатації силових елементів верстата.
- 2) Провести порівняння та вибір основних компонентів системи керування верстатом.
- 3) Провести відповідні дослідження щодо модернізації системи керування.

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВЕРСТАТА

2.1 Конструкція асинхронного електродвигуна

Як і інші електричні машини, асинхронний двигун складається з нерухокої частини (статора) та рухомої частини (ротора). Статор складається з чавунної, зварної або алюмінієвої конструкції та двох підшипникових щитів. У корпус статора запресовані листи, які ізолювані один від одного та утворюють магнітну частину контуру машини. Пластини ротора напресовані на вал, що обертається. Рух ротора можливий завдяки повітряному зазору між ротором та статором, який визначається підшипниками у вже згаданих підшипникових щитах. Схема асинхронної машини показано на рис. 2.1.

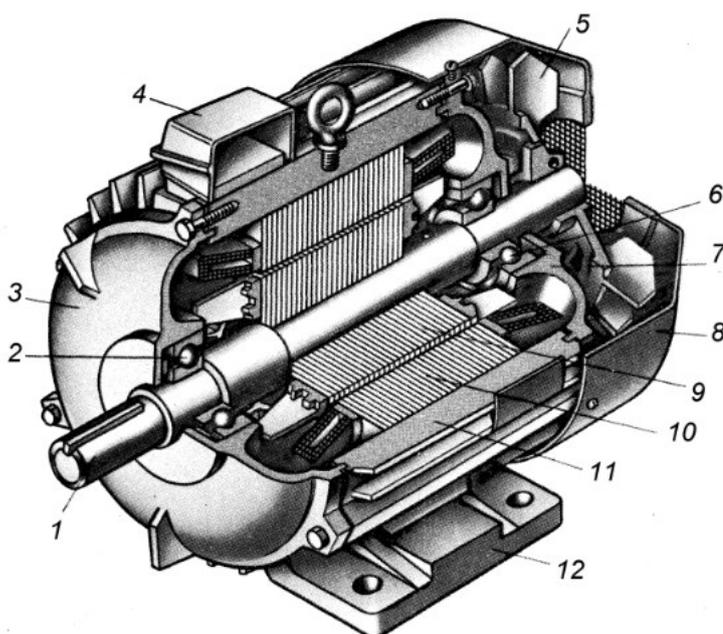


Рисунок 2.1 - Розташування основних частин асинхронного двигуна [7]

За рис. 2.1: 1 - вал; 2, 6 - підшипники; 3, 7 - підшипникові щити; 4 - коробка виводів; 5 - вентилятор; 8 - кожух вентилятора; 9 - осердя ротора з короткозамкнутою обмоткою; 10 - осердя статора з обмоткою; 11 - корпус; 12 - лапи.

Обмотка статора, що зберігається в пазах, зазвичай трифазна, але може бути і однофазною або двофазною, початку та кінці якої виведені на клемник статора. Обмотка ротора, що також розміщується в пазах ротора, називається якорем. Для двигунів більшої потужності в канавках передбачені мідні або латунні неізольовані дроти, з'єднані кільцями. У менших двигунів обмотки відлиті разом із алюмінієвими лопатями вентилятора, і ця обмотка називається обмоткою «клітка». У двигунах із фазним ротором та кільцями трифазна обмотка із ізольованих провідників зберігається в пазах. Початок фаз з'єднано з вузлом, які кінці з'єднані з трьома контактними кільцями, що примикають до щіток. Таким чином до двигуна підключаються пристрої регулювання швидкості та запуску [7].

2.2 Принцип роботи асинхронного електродвигуна

Принцип полягає у взаємодії обертового електромагнітного поля статора і ротора. Окремі котушки статора просторово зміщені на 120° , створюють магнітне поле, що перетинає провідники ротора, в яких індукуються напруга. Ця напруга виникає тільки в припущенні щодо відносного руху магнітного поля статора до руху ротора. Тобто різні обороти магнітного поля статора проти оборотами ротора. Цю різницю швидкостей називають ковзанням. Ковзання змінюється в залежності від навантаження на машину, тобто від величини моменту, що діє на ротор. Номінальне ковзання становить від 1% великих двигунів, до 10% малих. Швидкість статора залежить від частоти напруги живлення і кількості полюсів машини.

Як було зазначено раніше, асинхронну машину експлуатують переважно у режимі двигуна. Інші режими, тобто гальмівний та генераторний, будуть описані нижче. На рис. 2.2 показана характеристика крутного моменту, асинхронної машини.

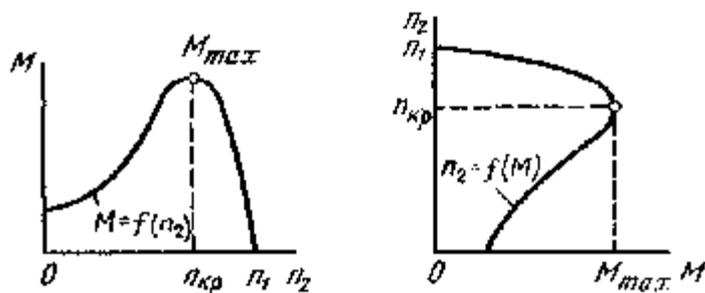


Рисунок 2.2 - Характеристики крутного моменту асинхронної машини [8]

Режими роботи АД

Гальмівний режим

У режимі гальмування ротор обертається проти напрямку обертового магнітного поля статора, створюється гальмівний момент, що діє проти напрямку обертання, ковзання більше 1, споживає надлишковий струм з мережі, викликаючи термічні та механічне напруження. Тому машину не можна використовувати занадто довго в цьому режимі.

Режим двигуна

Машина у цьому режимі має вищий крутний момент, ніж момент навантаження. Момент, у який двигун починає обертатися, називається пусковим моментом. У міру збільшення частоти обертання момент двигуна збільшується до максимуму, який називається крутним моментом. Потім крутний момент швидко зменшується до точки, в якій двигун досягає синхронної швидкості. На цьому етапі момент дорівнює нулю, ковзання дорівнює 0, двигун переходить в наступний режим.

Генераторний режим

Іншим режимом є режим генератора, у якому ротор машини має вищі обороти, ніж обороти магнітного поля статора. Напряга та струм міняються місцями, і машина генерує електроенергію в енергосистему [8].

Гальмування асинхронного двигуна

За рахунок кінетичної енергії частин, що обертаються, машина продовжує працювати тривалий час після відключення від мережі. За необхідності, можна гальмувати машиною іншу машину. Виконується гальмування трьома способами.

Протиточне гальмування

Протиточне гальмування реалізується простим підключенням двох фаз на клемній колодці статора. Це призводить до зміни напрямку обертання магнітного поля статора. Це дуже марнотратне гальмування, оскільки вся енергія двигуна перетворюється на тепло в резисторах ротора. Крім того, цей метод гальмування можна використовувати лише протягом короткого часу з огляду на значні струми, що протікають через обмотки двигуна.

Рекуперативне гальмування

Гальмування з генеруванням енергії у мережу відбувається, якщо частота обертання ротора вище за синхронну. Таким чином, машина діє як генератор, подаючи активну потужність у мережу. Двигун можна перевести в цей режим гальмування, змінивши кількість полюсів або за допомогою перетворювача частоти. Таким чином, машину не можна повністю зупинити.

Динамічне гальмування

Динамічне гальмування полягає у відключенні статора від мережі змінного струму та збудженні його постійним струмом. В статорній обмотці створюється постійний магнітний потік. Струм, що індукується в роторі, разом з утвореним потоком в статорі створює крутний момент, що діє проти ротора, що обертається. Крутний момент може створюватися навіть при низьких обертах і, таким чином, гальмувати двигун [8].

Пуск асинхронного двигуна

Через великий кидок струму, до електричної мережі загального користування можна підключати безпосередньо ті двигуни, пускова потужність яких менше 22 кВА. Це відповідає приблизно 3 кВт. Тому, при пуску двигуна потужністю більшою, ніж вже згадані 3 кВт, необхідно зменшити або усунути кидок струму одним із наступних засобів:

Пуск двигуна з короткозамкнутим ротором виконується за допомогою:

- застосуванням стартера;
- перемиканням режимів зірка-трикутник;
- автотрансформатором;

- напівпровідниковими регуляторами напруги;
- спеціальною модифікацією клітки;
- подвійною кліткою.

Пуск двигуна з фазним ротором:

- за рахунок зміни повного активного опору ротора.

Регулювання швидкості асинхронного електродвигуна

Управління частотою обертання двигуна може бути реалізовано кількома способами. Зміна ковзання, що дуже неекономічно, або зміна числа полюсів, що призводить до ступінчастого регулювання i , нарешті, зміною швидкості магнітного поля статора. Останнє регулювання здійснюється перетворювачем частоти.

Перемиканням полюсів

Зміна кількості полюсів дозволяє регулювати швидкість тільки ступінчасто, причому кількість сходів невелика, зазвичай ступенів два. Більша кількість полюсів потребувала б складної комутації і зробила пропоновану машину дорожчою. Типовими прикладами асинхронного двигуна з двома ступенями є старі ліфти, що гальмують безпосередньо перед зупинкою в пункті призначення, або старі пральні машини, де для зміни режиму (прання та полоскання) використовувалися два ступені.

Зміною ковзання та напруги живлення

Регулювання швидкості зміною ковзання в кільцевих двигунах, включенням опору в ланцюг ротора дуже неекономічно, оскільки зношуються кільця та щітки.

Для двигунів з кліткою зміною квадрата напруги живлення змінюють крутний момент двигуна, а разом з ним і оберти. Це управління в основному використовується для так званого плавного запуску.

Зміною напруги та частоти

Цей тип управління застосовується відносно недовго, його почали застосовувати з розробкою IGBT-транзисторів, здатних комутувати великі потужності та підтримувати прийнятну швидкість перемикання.

Таким чином, доцільним є розгляд ПЧ як перетворювач потужності для досліджуваного електрообладнання [8].

2.3 Принцип роботи перетворювача частоти

Перетворювач частоти реалізує керування, коли енергія, що подається на статор електродвигуна, надходить від джерела змінної частоти. Для регулювання швидкості необхідно підтримувати постійне співвідношення напруги живлення і частоти ($U/F=\text{const}$). Якщо ми підтримуємо це співвідношення постійним, магнітний потік і механічний крутний момент двигуна будуть незмінними. Це використовується, наприклад, у трамваях, де вигідно мати максимальний крутний момент до певної швидкості (отже, і величину обертів) і таким чином забезпечити максимально можливе прискорення. Після досягнення певної величини частоти зростання напруги припиняється (задається конструкцією перетворювача) і збільшується тільки частота. Двигун починає гасити, крутний момент гіперболічно зменшується, а потужність, яка до того часу лінійно зростала, стабілізується. Така поведінка нагадує серійний двигун постійного струму. З цієї причини цей привід широко використовується на електротязі. Однак недотримання цього співвідношення протягом тривалого періоду часу несе ризик перенасичення струмами намагнічування та згоряння двигуна [9].

Типи перетворювачів частоти

У промисловості регулювання швидкості перетворювача частоти стало незамінним. Використовується як в асинхронних, так і в синхронних двигунах з постійними магнітами. Розрізняють дві основні конструкції перетворювачів частоти: прямі та непрямі.

Прямі перетворювачі частоти поділяються на матричні (рисунок 2.3б) і циклоперетворювачі (циклоконвертор) (рисунок 2.3а)). Циклоконвертор містить 3 тиристорних випрямляча, які перемикають вхідну частоту так, щоб на виході створювалася інша частота. У цьому методі вихідна частота завжди буде нижчою за вхідну. У матричних перетворювачах використовуються транзистори або тиристори GTO. Це дозволяє досягти вищої вихідної частоти, ніж вхідна.

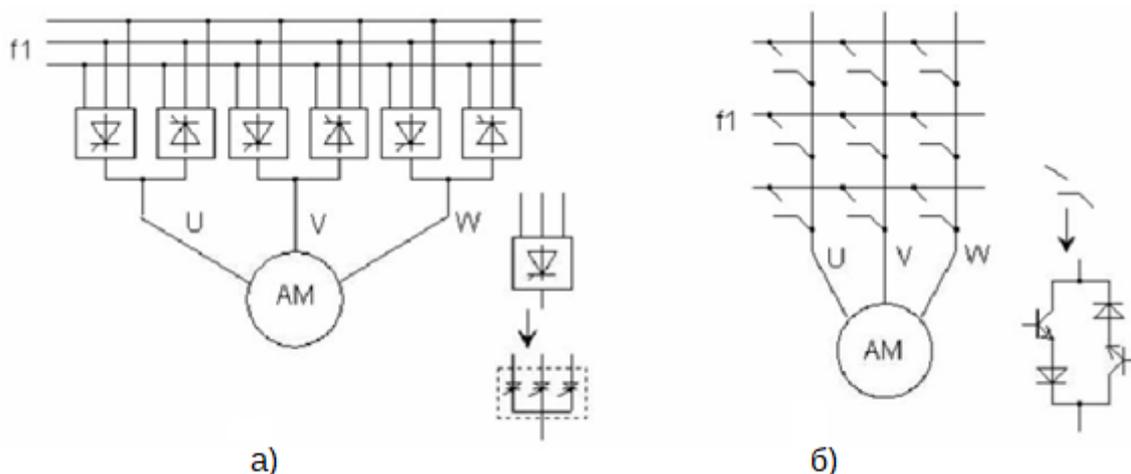


Рисунок 2.3 - Циклоконвертер і матричний конвертер [9]

Найбільш часто використовувані перетворювачі непрямі і складаються з трьох частин: випрямляча, фільтра та інвертора.

На рисунку 2.4 показаний трифазний некерований випрямляч, де конденсатор використовується як фільтр, а трифазний інвертор складається з транзисторів IGBT або MOS-FET [10].

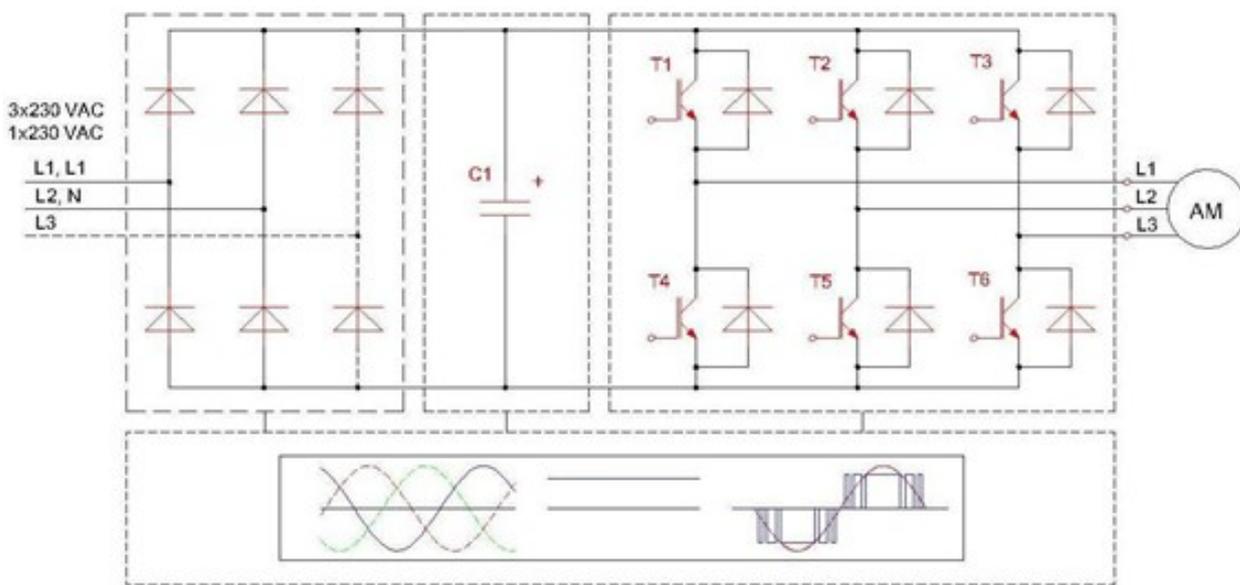


Рисунок 2.4 - Непрямий перетворювач частоти [10]

2.4 Особливості спільної роботи асинхронного двигуна та перетворювача частоти

Використання перетворювача частоти дає багато переваг, де, окрім його найважливішого внеску, яким є вищезгадане регулювання швидкості, це, наприклад, визначення пускових характеристик двигунів, де пуски можуть бути контрольованими по так званим установленим програмам. Однак, не в останню чергу, їх використання також приносить значні переваги з експлуатаційної та економічної точки зору. Протягом останніх кількох років, особливо після так званої фінансової кризи, яка досягла свого піку 15 років тому, все більше уваги приділяється економії витрат, пов'язаних з експлуатацією різних технічних пристроїв на виробничих підприємствах і в домогосподарствах. Зусилля щодо скорочення цих витрат проводяться паралельно з економією всіх видів енергії. Чим менше споживання, тим менше електроенергії потрібно буде виробляти, або з екологічної точки зору - тим більше буде збережено природних ресурсів землі. На практиці компанії підходять до цього шляхом підвищення ефективності окремих пристроїв. Зменшення потужності обертових машин шляхом контролю швидкості під час роботи є ще однією значною можливістю, якщо їх використання є лише частковим (іншими словами - якщо повна, номінальна потужність машин не потрібна в даний момент часу). З цієї точки зору перетворювачі, безсумнівно, вважаються корисними пристроями, які пропонують великий потенціал у майбутньому [11].

На відміну від перерахованих вище переваг, необхідно мати на увазі, що існують і мінуси, які необхідно враховувати при використанні перетворювачів в системі приводу. З точки зору неспеціаліста, найбільшим ускладнюючим фактором буде ціна покупки, яка зазвичай перевищує ціну двигуна, тому привід може подорожчати в кілька разів. Таким чином, потрібно прорахувати, як часто привод буде використовуватися в певній програмі, або клієнт повинен цікавитися, чи буде різниця в ціні за збережену електроенергію (порівняння приводу без інвертора з

використанням інвертора) перевищувати ціну придбання інвертора в певному очікуваному майбутньому періоді.

На промислових підприємствах згаданий критерій виконується майже автоматично, радше це міркування підходить для використання в умовах малих підприємств. Інший аспект представлений втратами, що виникають на окремих компонентах перетворювача, що знижує загальну ефективність приводу. Крім того, завдяки вихідному сигналу з перетворювача, створеного за принципом широтно-імпульсної модуляції, по кабелях до електродвигуна передаються вищі гармоніки, які викликають так звані додаткові втрати порівняно з синусоїдальним джерелом живлення безпосередньо від мережі.

Визначення додаткових втрат, спричинених використанням перетворювача частоти (у режимі широтно-імпульсної модуляції) для живлення двигуна порівняно з живленням безпосередньо від мережі, вимагає розуміння та ретельного опису впливу вищих гармонік на асинхронний двигун. Існує багато публікацій, які часто містять лише формули розрахунків і стислі коментарі до окремих величин. Лише в небагатьох з них можна знайти якісний словесний коментар, який міг би реально описати причину таких втрат.

Так, [12] є одним із авторів, які можуть коротко описати вищі гармоніки по відношенню до втрати потужності словесно та математично. Цю проблему він уже розглядав у своїй дисертації «Широтно-імпульсна синусоїдальна модуляція в приводах змінного струму з трифазним двигуном, можливість підвищення несучої частоти до надзвукового діапазону», в останніх розділах якої описуються додаткові втрати в двигуні (вихрові струми) і гістерезис, які були викликані саме вищими гармоніками.

2.5 Загальна характеристика втрат у асинхронному двигуні

Втрати в металі

Це та потужність, яка витрачається в феромагнітних матеріалах під дією змінного поля - тобто виникають втрати через перемагнічування, відбувається

взаємне зміщення векторів магнітної індукції та напруженості. Це явище зовні викликає нагрівання матеріалу.

Розподіл втрат є наступним:

- втрати на гістерезис;
- втрати на вихрові струми.

Втрати на гістерезис

Вони викликані рухами внаслідок зміни областей доменів у магнітному полі (домени повинні обертатися відповідно до зовнішнього поля, через що між ними виникає тертя). Отже, це зміни на атомному рівні, величина гістерезису визначається досконалістю кристалічної структури. Різноманітні домішки, що містяться у феромагнітному матеріалі, які означають деформації кристалічної решітки, збільшують гістерезис [12].

За способом живлення двигуна втрати на гістерезис доцільно розділити на дві групи - зумовлені першою гармонікою і так звані додаткові гістерезисні втрати, які проявляються в магнітопроводі через вплив вищих гармонік (або коли двигун живиться від перетворювача частоти, або у випадку дуже перевантажених мереж).

Втрати на гістерезис, викликані першою гармонікою

На рисунку 2.5 наведено приклад статичної петлі гістерезису, яка виходить з одного циклу намагнічування і виражає залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B = f(H)$. Він називається статичним, тому що немає помітного внеску вихрових втрат (щоб вони не проявлялися, його потрібно вимірювати на досить низькій частоті).

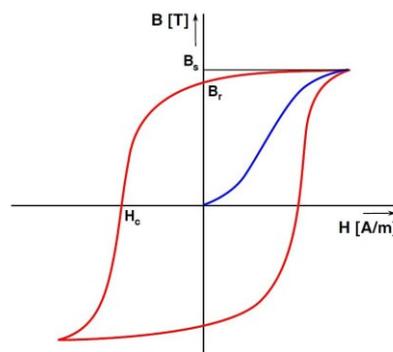


Рисунок 2.5 - Статична петля гістерезису [12]

І навпаки, динамічна петля гістерезису повинна вже включати вихрові втрати, і було б практично неможливо відокремити гістерезисну та вихрову складові одна від одної.

Відповідно до параметра, який називається коерцитивною силою H_c (вказує на ширину петлі гістерезису), існує практичний поділ на магнітом'які та тверді матеріали. Про легкість розмагнічування свідчить величина коерцитивної сили даного матеріалу, саме напруженість магнітного поля зведе магнітну індукцію до нуля. Ще одна важлива величина B_r , що називається залишковою індукцією, вказує на ступінь залишкової намагніченості після припинення зовнішнього магнітного поля. В асинхронних двигунах магнітно-м'які матеріали завжди використовуються для побудови магнітного кола саме для досягнення найменших можливих втрат на гістерезис, вони мають малу площу петлі гістерезису.

Втрати на гістерезис, викликані вищими гармоніками

Вони проявляються в основному при живленні від перетворювачів частоти (вони нерозривно пов'язані з принципом широтно-імпульсної модуляції). Також називаються додатковими гістерезисними втратами, вони спричинені пилкоподібними пульсаціями струму намагнічування (отриманого від синусоїдальної ШІМ). Проблема добре проілюстрована на рис. 2.6 та 2.7.

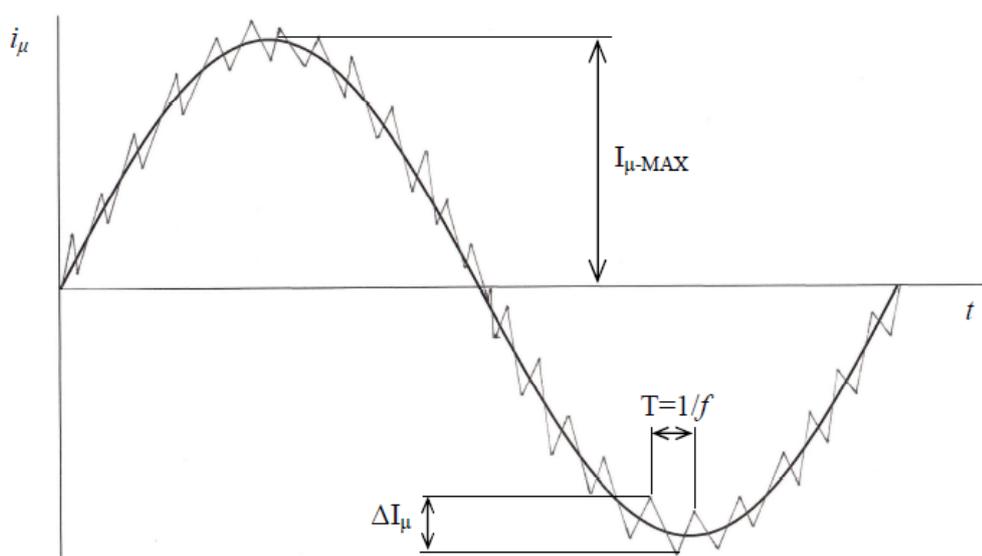


Рисунок 2.6 - Пульсації струму намагнічування під час синусоїдальної ШІМ [12]

Відповідно до загальновідомого припущення, що амплітуда першої гармоніки струму намагнічування прямо пропорційна максимальному значенню напруженості магнітного поля, логічно припускається, що окремі коливання струму намагнічування, позначені на рис. 2.6 - ΔI_{μ} , викликана вищими гармоніками, призведе до змін інтенсивності ΔH .

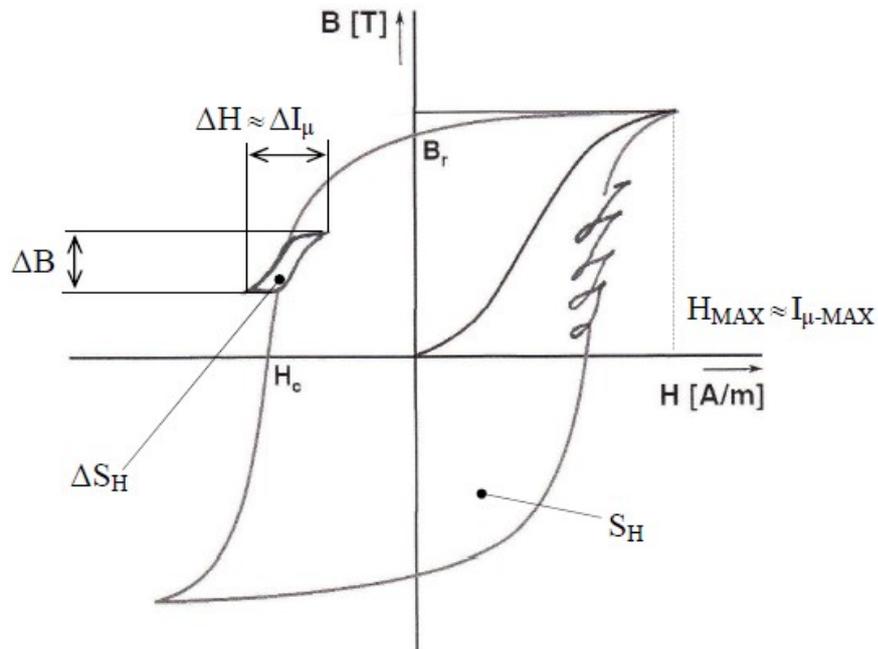


Рисунок 2.7 - Додаткових втрат на гістерезис [12]

Завдяки високочастотній складовій, яка викликає пульсації в струмі намагнічування, а отже, і коливання напруженості магнітного поля H , мініатюрні петлі площі S накладаються на основну петлю, викликану першою гармонікою H . Ці області окремих петель, що представляють додаткові втрати, не будуть однакового розміру, вони будуть залежати саме від частки окремих вищих гармонік у спектрі сигналу.

Питання, яке ще належить вирішити, полягає в тому, як додаткові втрати фактично проявляться при зміні несучої частоти. Для цього можна розглянути припущення можливості узагальнення - тобто, після коригування, воно дійсне не тільки для розрахунку втрат, спричинених першою гармонікою, при заміні несучої частоти ШІМ, можна буде визначити додаткову складову втрат.

Втрати на вихрові струми

Залежно від дії змінного магнітного поля, вільні електрони в масивному блоці металевого провідника починають рухатися по колу (за напрямом руху їх називають вихровими струмами). Це індуковані струми, тому до їхнього напрямку діє закон Ленца, тобто вони намагаються запобігти зміні, яка їх викликала, своїми ефектами. Завдяки цьому магнітний потік збудження послаблюється [13].

Розмір вихрових струмів значною мірою залежить від обраного матеріалу, від його питомого опору, поперечного перерізу та від ходу магнітної індукції в часі, тобто від частоти поля.

Враховуючи відомий питомий опір матеріалу, його об'єм, товщину листа, амплітуду магнітної індукції, частоту магнітного поля та коефіцієнт k_{d0} , що являє собою форму кривої наведеної напруги, можна визначити цю складову втрат, яка сприяє збільшенню нагрівання електричної машини. Відповідь на питання про те, як спробувати усунути вихрові втрати є наступною. З одного боку, їх можна зменшити, замінивши матеріал на феромагнітний матеріал з більшим питомим опором, інший варіант - використовувати більше число із взаємно ізольованих листів меншої товщини.

Існує інший спосіб кількісної оцінки цього типу втрат. Відомо, що частка вихрових струмів не може бути визначена безпосередньо з петлі динамічного гістерезису, але з додатковим вимірюванням петлі статичного гістерезису при досить малій частоті поля (на практиці в порядку одиниць Гц), простого логічного розрахунку було б достатньо.

Площі петлі динамічного та статичного гістерезису можна розрахувати, але не всі подібні розрахунки враховують деякі явища, викликані більш високими частотами, наприклад, магнітний поверховий ефект, тому отримані значення зазвичай вважаються орієнтовними.

Уявлення про вихрові струми у феромагнетиках можна краще отримати з рис. 2.8, де приклад диференціальних обмоток можна побачити на поперечному перерізі одного листа статора. У справжньому листовому металі цих ниток буде достатньо, щоб концентрично заповнити всю поверхню. Через кожен виток протікає

диференціальний струм d_i , він має свою товщину d_x , диференціальний опір dR_v і всі витки, крім поверхневого, також містять блукаючу вихрову індуктивність $dL_{\sigma v}$, таким чином, по суті являють собою одновиткові вторинні обмотки трансформатора. Один виток поверхні не має блукаючої вихрової індуктивності, оскільки його площа дорівнює площі поперечного перерізу S_{Fe} , таким чином оточуючи повний магнітний потік [13].

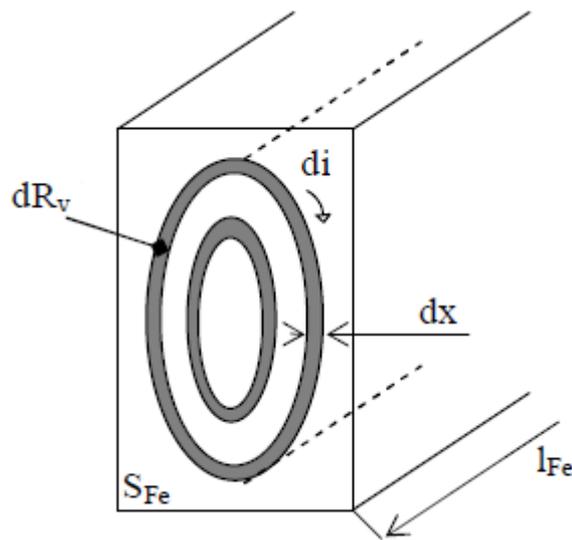


Рисунок 2.8 - Вихрові струми на секції листового металу [13]

Ця індуктивність, що визначається вихровими струмами в пластині статора, не має нічого спільного з відомим параметром блукаючої індуктивності машини між статором і ротором. Відокремлюючи окремі витки від центру до поверхні, можна отримати єдиний вторинний вихровий виток із загальним опором вихру (втрати якого в Джоулях повинні бути такими ж, як сума втрат в окремих витках) і загальною блукаючою індуктивністю.

Таким чином, проведений вище аналіз особливостей спільної роботи асинхронного двигуна та перетворювача частоти дає підґрунтя для формування системи керування електроприводу метало відрізного верстата з вищими показниками енергоефективності.

3 ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ПРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ

Базово, металовідрізний верстат SOCO MC-315 комплектується інвертором Fairchild FSB50450, але він має певні недоліки, які буде описано нижче, та запропоновано можливість використання іншої схеми разом із відповідним порівнянням варіантів.

3.1 Інвертор Fairchild FSB50450

Схема підключення інвертора FSB50450 наведена на рисунку 3.1.

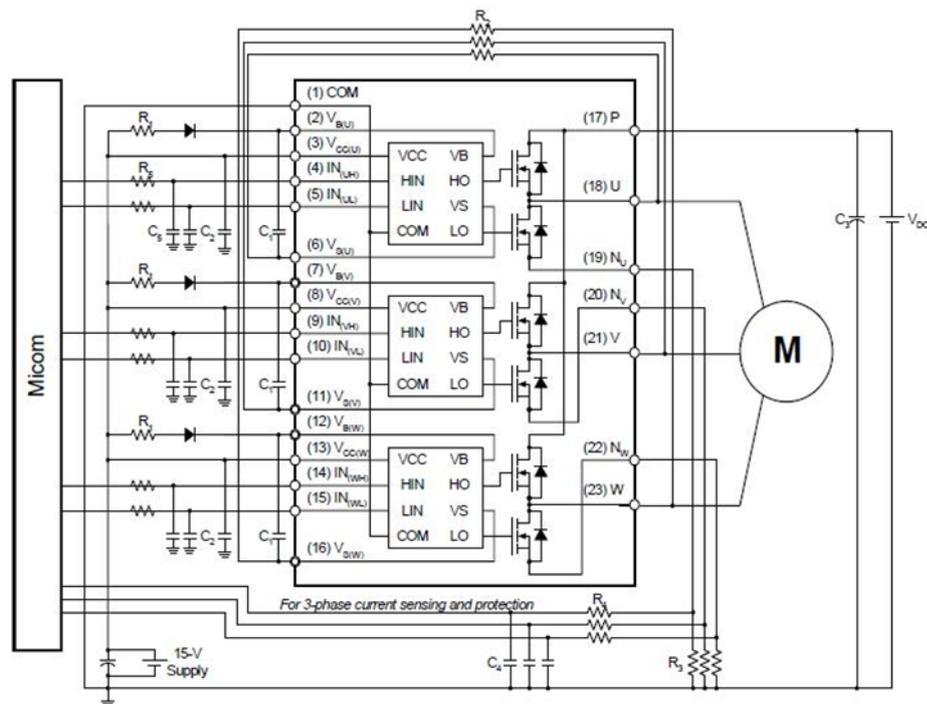


Рисунок 3.1 - Схема підключення інвертора FSB50450 [14]

Основні параметри інвертора:

- а) транзистори - MOS-FET;
- б) максимальна напруга транзистора - 500В;
- в) низькі електромагнітні перешкоди.

Інвертор FSB50450 відповідає більшості параметрів, але не містить власного модуля вимірювання струму. Цей недолік не дозволяє знайти просте рішення для захисту від перевантаження по струму, яке було вирішено шляхом його вимірювання через шунт на іншій друкованій платі. Вимірний струм порівнюється компаратором з опорним струмом. З виходу подається сигнал на схему управління МСЗНАС і на затвор NAND, який відключає всі 6 входів інвертора [14].

3.2 Інвертор Sanyo STK621-041A-E

Схема підключення інвертора STK621-041A-E наведена на рисунку 3.2.

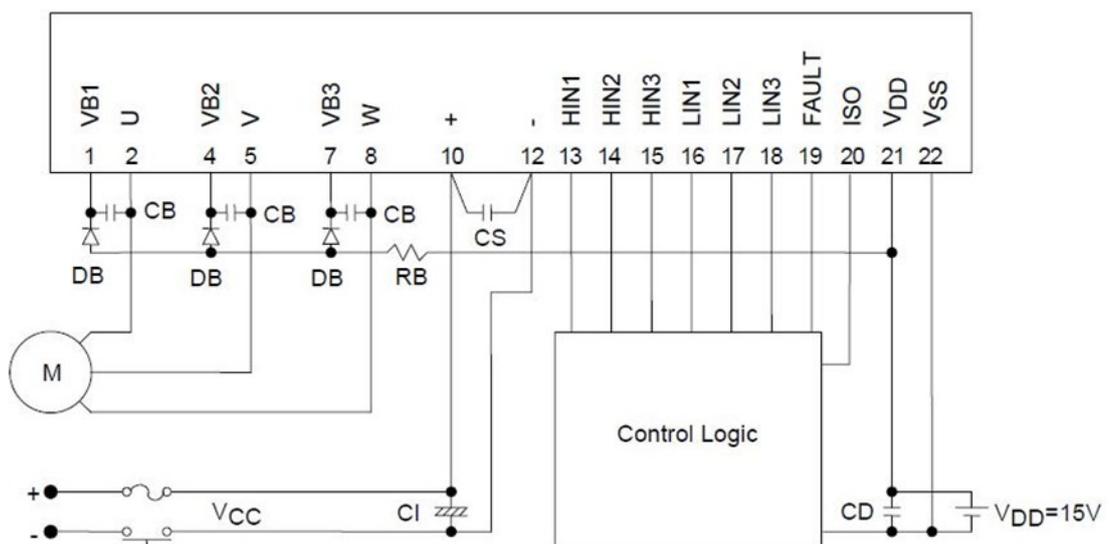


Рисунок 3.2 - Схема підключення інвертора STK621-041A-E [15]

Основні параметри інвертора:

- а) транзистори - IGBT;
- б) максимальна напруга транзистора - 600 В;
- в) термічний захист, захист від мінімальної напруги та перевантаження по струму з вихідним сигналом для сторони керування;

Найбільшою перевагою цієї інверторної схеми є те, що вона має всі засоби захисту, які вже вбудовані в неї, виходом є лише сигнал «FAULT» до частини

керування та вимикання всіх входів. Єдиним недоліком може бути частота перемикання транзисторів IGBT, всього 10 .

3.3 Інвертор International Rectifier IRAMY20UP60B

Схему підключення інвертора IRAMY20UP60B наведено на рисунку 3.2.

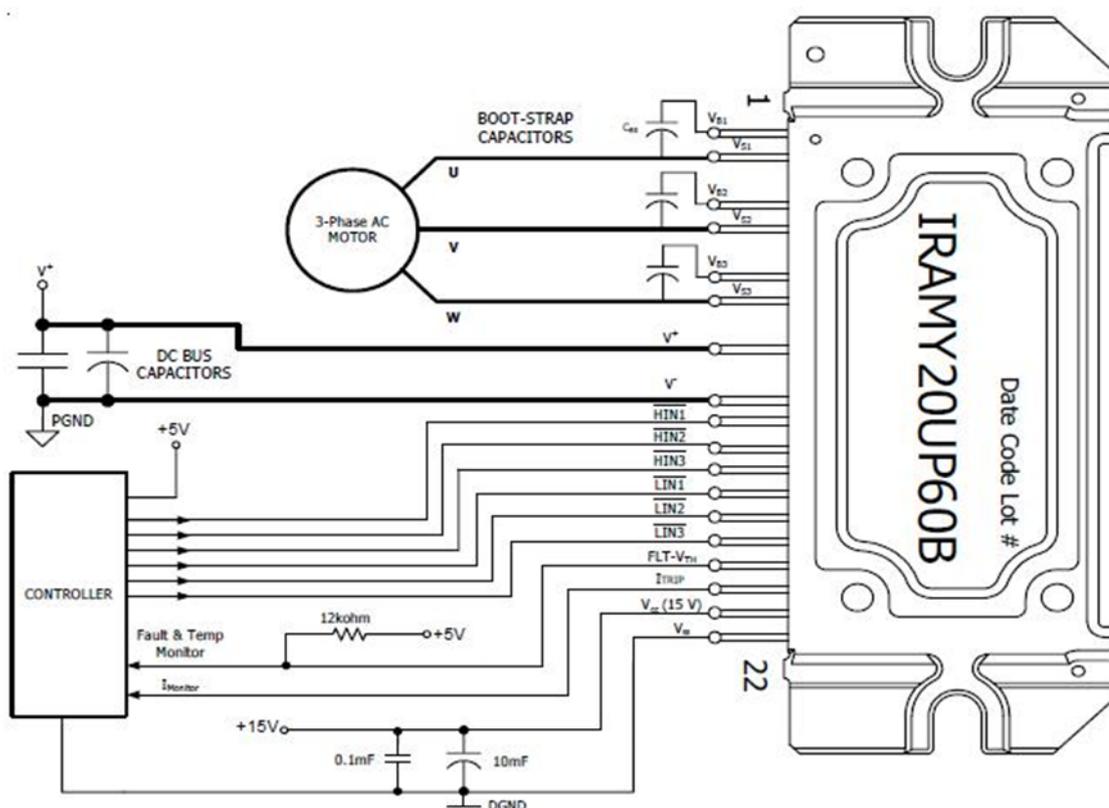


Рисунок 3.2 - Схема підключення інвертора IRAMY20UP60B [16]

Основні параметри інвертора:

- а) транзистори - IGBT;
- б) максимальна напруга транзистора - 600 В;
- в) тепловий захист, захист від мінімальної напруги та перевантаження за допомогою вихідного сигналу для частини керування.

Схема інвертора дуже схожа на схему STK621-041A-E та FSAM15SH60A. Відмінність полягає в частоті перемикання транзисторів, яка в 2 рази вища, ніж у

інвертора STK621-041A-E, тобто 20. Ця схема найбільш підходить для поточного рішення.

3.4 Інвертор Fairchild FSAM15SH60A

Схему підключення перетворювача наведено на рисунку 3.4.

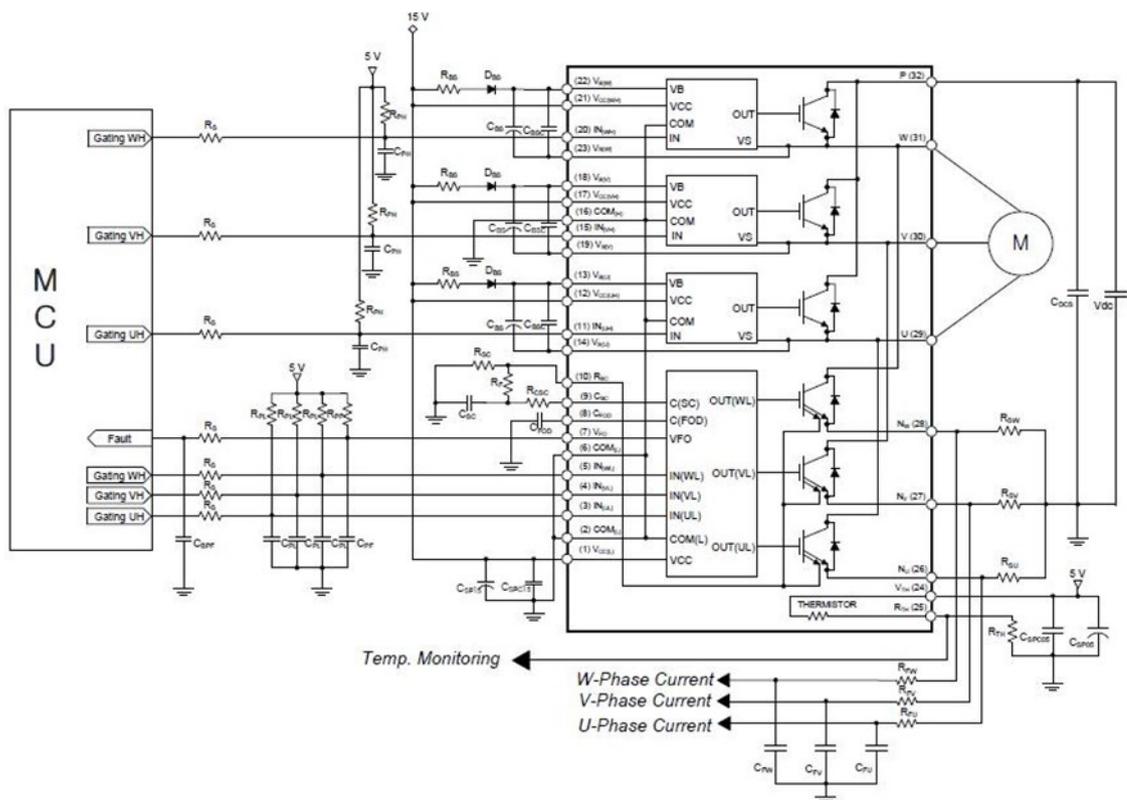


Рисунок 3.4 - Схема підключення інвертора FSAM15SH60 [17]

Основні параметри інвертора:

- транзистори - IGBT;
- максимальна напруга транзистора - 600 В;
- тепловий захист, захист від мінімальної напруги та перевантаження по струму з вихідним сигналом для контролера частина.

Як і дві попередні схеми, вона включає захист від зниженої напруги і перевантаження по струму. Захист комунікує з блоком управління за допомогою вихідного сигналу «FAULT». Але є також вимірювання струму на окремих фазах

виходу з інвертора разом із вимірюванням температури. Недоліком є відсутність шунтуючого резистора.

3.5 Порівняння інверторних схем

Таблиця 3.1 - Порівняння параметрів окремих схем інверторів

Схема перетворювача	FSB50450	STK621-041A-E	FSAM15SH60A	IRAMY20UP60B
Максимальна напруга транзистора	500	600	600	600
Тип силових транзисторів	MOS-FET	IGBT	IGBT	IGBT
Вбудований тепловий захист	Ні	Так	Так	Так

3.6 Принцип функції захисту від надструму

Захист від надструму може бути вирішено різними способами. У випадку використання схеми FSB50450 необхідно було розробити та виготовити іншу плату, але це є невідповідним рішенням, тому що в разі виникнення перевантаження по струму весь інвертор припинить працювати, доки не буде скинуто всю частину керування. Подібні помилки полягають у відсутності зворотного зв'язку від контрольної частини, яка не сигналізує про захист від перевантаження по струму, щоб вимкнути інвертор.

Іншим рішенням є використання однієї з уже згаданих схем з вбудованим вимірюванням струму. Вимірювання струму всіх зазначених ланцюгів, крім схеми Fairchild FSB50450, здійснюється за допомогою шунтуючого резистора. Шунтуючий резистор - це резистор з малим значенням опору, призначений для вимірювання струму на основі падіння напруги. Поточне значення оцінюється внутрішньою логікою, яка формує сигнал на керуючу частину інвертора [14].

Конкретні рішення для окремих виробників

1) *Sanyo STK621-041A-E*. Значення струму, яке внутрішньою логікою оцінюється як надструм, встановлено виробником на 28. Після того, як внутрішня логіка оцінює перевантаження по струму, вона від'єднує всі 6 виходів і встановлює для висновку «FAULT», значення журналу «1». Виходи залишатимуться відключеними, доки всі входи інвертора не будуть налаштовані на «0». Це скидає весь інвертор і виходи підключаються знову [15].

2) *IRF IRAMY20UP60B*. Тут принцип дуже схожий на схему Sanyo, відмінність полягає в поточному значенні, яке коливається від 26 до 34, залежно від температури процесора, і схема не чекає, поки будуть встановлені входи журналу «0», але він скидається приблизно через 8 секунд. Час реакції до спрацьовування захисту від надструму становить 6 секунд [16].

с) *Fairchild FSAM15SH60A*. На відміну від попередніх двох схем, ця дозволяє визначати значення надструму за допомогою шунтуючого резистора, підключеного між оціночними входами інвертора, що збільшує розмір усієї друкованої плати. Подібно до схеми IRAMY20UP60B, схема також не чекає, поки на входах інвертора буде встановлено значення журналу «0», але скидається. Час, протягом якого інвертор буде вимкнено, можна встановити за допомогою зовнішньої ємності, підключеної між «землею» та контактом 8 [17].

4 АРХІТЕКТУРА МОДЕРНІЗОВАНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ

4.1 Архітектура модернізованого перетворювача частоти

Таким чином, потрібно розробити перетворювач потужності для управління трифазним асинхронним двигуном потужністю 1000 Вт. Інвертор буде живитися від однофазної мережі. Ця напруга буде додатково випрямлятися і фільтруватися до напруги 311 В. Трифазний інвертор буде управлятися сигналом з широтно-імпульсною модуляцією. На входних клеммах двигуна потрібна напруга 3×230 , вихідна частота перетворювача - 50 Гц.

Параметри перетворювача

Таблиця - Характеристика модернізованого перетворювача частоти

Параметр	Значення
Вхідна напруга (U_1)	змінна, 230 В
Напруга ланки постійного струму (U_{IN})	постійна, 311 В
Ефективне значення сумарної напруги між фазами ($U_{U_{Vef}}$)	змінна, 230 В
Вихідна частота напруги з перетворювача (f)	50 Гц
Коефіцієнт потужності ($\cos\phi$)	0,7
Потужність заживленого двигуна (P_n)	1000 Вт

Рішення щодо елементів керування

Інтегральна схема МСЗРНАС обрана з огляду на її задовільні параметри та доцільність з економічної точки зору.

Характеристика МСЗРНАС:

- 6 вихідних сигналів ШІМ;
- вибір базової частоти (50 Гц, 60 Гц);
- вибір частоти та полярності ШІМ;
- 4-канальний АЦП;
- вибір режиму роботи;
- захист від зниженої напруги;
- вхід «FAULTIN», який вимикає виходи у разі несправності;

- генерація трифазного сигналу.

При запуску схема запускається в окремому, так званому автономному режимі.

Параметри схеми керування ініціалізуються пасивними компонентами та їх вибраними значеннями:

- полярність ШІМ;
- автономний режим роботи;
- базова частота, 50 Гц або 60 Гц;
- частота ШІМ від 1Гц до 128Гц;
- налаштування часу між вмиканням нижнього і верхнього транзисторів;
- функція розгону двигуна;
- налаштування часу відключення виходів на силову секцію в разі помилки.

Вивід V_DD живиться від напруги 5 В, напруги живлення підключена до V_SS. Аналогова і цифрова напруга живлення розділені дроселем 1. До входів OSC1 і OSC1 підключений кварцевий генератор з частотою $f = 4\text{МГц}$. До входу PLLCAP підключається конденсатор 4, що визначає швидкість і стабільність ланцюга синхронізації.

Виходи PWM_X_TOP і PWM_X_BOT, де X представляє фазу U, V або W, завжди подаються на нижню або верхню частину транзистора керування двигуном. Вхід FAULTIN перемикається сигналом від силової частини інвертора. Запис у журналі «1» відключає вихідні сигнали ШІМ. Після зникнення помилки та перемикання введення в «0» почнеться відлік часу для перезапуску вихідних сигналів ШІМ. Про помилку сигналізує світлодіод 3 [18].

Для нашого рішення цілком достатньо двостороннього випрямляча, який не має такого сприятливого синусоїдального ходу вхідного фазного струму, але є економічно вигідним.

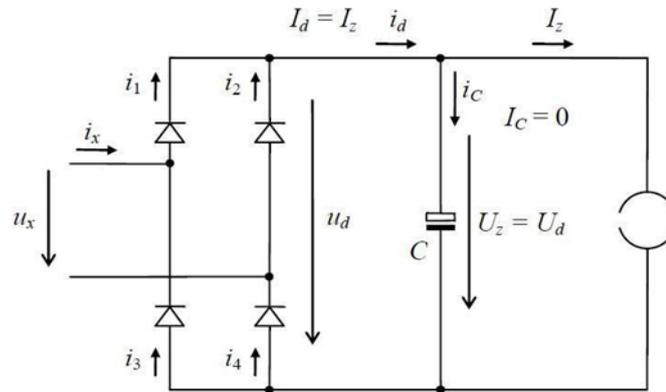


Рисунок 4.2 - Схема двостороннього випрямляча з накопичувальним конденсатором [19]

Розміри випрямляча

Середнє значення струму, що протікає через конденсатор в усталеному режимі, дорівнює 0. Можна вважати, що середнє значення струму на виході випрямляча дорівнює струму навантаження. Визначаємо струм навантаження як відношення номінальної потужності двигуна до напруги на вході проміжного кола.

$$I_d = I_z = \frac{P_d}{U_{IN}}, \quad (4.1)$$

$$I_d = \frac{1000}{311} = 3,215 \text{ A.}$$

Середній струм діода буде дорівнює половині струму навантаження:

$$I_{Davg} = \frac{I_z}{2}, \quad (4.2)$$

$$I_{Davg} = \frac{I_z}{2} = \frac{0,321}{2} = 0,1605 \text{ A.}$$

Через перехідні процеси в ланцюзі інвертора необхідно збільшити розміри випрямляча до значення 4A/600V. Наприклад, для цього підійде діодний міст B250C4000.

Визначення напруги базується на функції двостороннього діодного випрямляча, коли один діод завжди проводить в гілці (вертикальна пара) і напруга на діоді однакова напруга на конденсаторі. З цього випливає, що діоди повинні витримувати мінімальну напругу 350В.

Розмір транзисторів інвертора

Потужність транзисторів повинна бути підібрана так, щоб не перевищувати максимально дозволений струму через його мінімальну здатність до перевантаження по струму, а також для збільшення нуля діоди.

Так, необхідно враховувати максимальну напругу комутації:

$$P = 1,73 \cdot U_{U_{Vef}} \cdot I_{U_{ef}} \cdot \cos \phi. \quad (4.3)$$

Напруга $U_{U_{Vef}}$, представляє ефективне значення комбінованої напруги, $I_{U_{ef}}$ є ефективним значенням значення фазного струму. $\cos \phi$ представляє коефіцієнт потужності двигуна.

Зі співвідношення (4.3) виражаємо поточний $I_{U_{ef}}$:

$$I_{U_{ef}} = \frac{P_d}{1,73 \cdot 230 \cdot 0,7} \quad (4.4)$$

$$I_{U_{ef}} = \frac{1000}{1,73 \cdot 230 \cdot 0,7} = 3,59 \text{ A.}$$

Далі розраховуємо амплітуду фазного струму, виходячи з його ефективного значення:

$$I_U = I_{U_{ef}} \cdot 1,414, \quad (4.5)$$

$$I_U = I_{U_{ef}} \cdot 1,414 = 5,07 \text{ A.}$$

Вони повинні бути розраховані на значення I_U , тобто амплітуду 1-ї гармоніки фазного струму транзистори та інверторні нульові діоди:

$$\begin{aligned} I_U &= I_{Tmax} = I_{Domax}, \\ I_{Domax} &= 5,07 \text{ A.} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Для подальших розрахунків, особливо для розрахунку середнього та ефективного струмів, що протікають через транзистори, необхідний так званий коефіцієнт модуляції M .

Щоб його обчислити, необхідно знати амплітуду комбінованої напруги U_{UV} :

$$\begin{aligned} U_{UV} &= U_{UVef} \cdot 1,414, \\ U_{UV} &= 230 \cdot 1,414 = 325,22 \text{ V.} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Співвідношення для коефіцієнта модуляції M :

$$\begin{aligned} M &= \frac{U_{UV}}{U_{IN}} = \frac{U_{UVef} \cdot 1,414}{U_{IN}}, \\ M &= \frac{U_{UV}}{U_{IN}} = \frac{230 \cdot 1,414}{311} \approx 1. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Розрахунок діючого значення струму через транзистор:

$$\begin{aligned} I_{Tef} &= I_U \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot M}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,73} \cdot \cos \phi}, \\ I_{Tef} &= 5,07 \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,73} \cdot 0,7} = 2,33 \text{ A.} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Визначення середнього значення струму через транзистор:

$$I_{Tavg} = I_U \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14} + \frac{M}{4 \cdot 1,73} \cdot \cos \phi \right), \quad (4.10)$$

$$I_{Tavg} = 5,07 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14} + \frac{1}{4 \cdot 1,73} \cdot \cos \phi \right) = 1,32 \text{ A.}$$

Розрахунок середньоквадратичного значення струму через нульовий діод:

$$I_{D0ef} = I_U \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot M}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,73} \cdot \cos \phi}, \quad (4.11)$$

$$I_{D0ef} = 5,07 \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot 3,14 \cdot 1,73} \cdot 0,7} = 1 \text{ A.}$$

Визначення середнього значення струму нейтрального діода:

$$I_{D0avg} = I_U \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14} + \frac{M}{4 \cdot 1,73} \cdot \cos \phi \right), \quad (4.12)$$

$$I_{D0avg} = 5,07 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 3,14} + \frac{1}{4 \cdot 1,73} \cdot 0,7 \right) = 2,9 \text{ A.}$$

Модуль IRAMY20UP60B

Усі схеми, згадані в розділі 4 вони мають безпечно вищу амплітуду 1-ї гармоніки фазного струму $I_U = 5,07$. Так, обрано модуль з максимальною силою струму, що в кілька разів перевищує розрахункову. Причина - більший діапазон потужностей і краще оснащення схеми захистами. Найбільш підходящою схемою для нашого рішення є IRAMY20UP60B від International Rectifier.

Основні параметри:

- 600В, 20А, 3-фазний інвертор високої напруги;
- Вбудований шунтуючий резистор;
- Захист від перевантаження по струму, зниженої напруги та тепловий захист;
- Вихід вимірювання струму;
- Підтримка логіки CMOS і TTL.

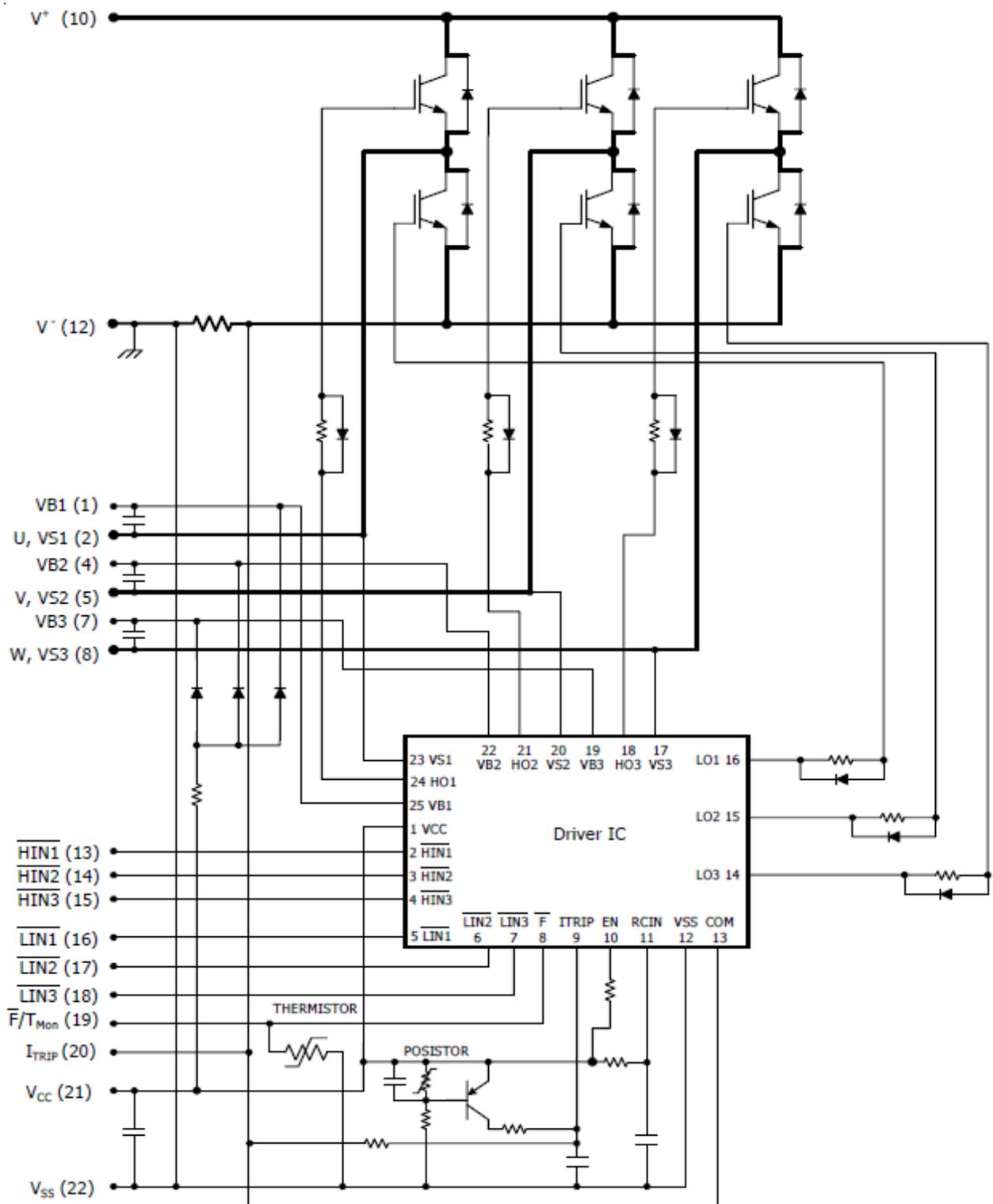


Рисунок 4.3 - Схема електрична принципова електроприводу на основі інвертора IRAMY20UP60B

Розрахунок втрат перетворювача частоти

Втрати на керуванні

Втрати на транзисторі розраховуються як добуток напруги колектор-емітер у закритому стані V_{CEon} , струму колектора I_C і змінного струму колектора D .

Оскільки це транзистори IGBT, виготовлені за технологією NPT, напруга V_{CEon} безпосередньо залежить від температури:

$$P_{condT} = V_{CEon} \cdot I_C \cdot D. \quad (5.13)$$

Максимальні втрати на перетворювачі частоти при струмі колектора $I_C = 10A$ і температурі корпусу $125^\circ C$.

Значення напруги V_{CEon} та змінного струму D можна знайти в у відповідному каталозі для IGBT ключів.

$$P_{condT} = 2 \cdot 10 \cdot 0,2 = 4 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати провідності, тобто всі шість транзисторів:

$$P_{cond} = 6 \cdot P_{condT}, \quad (5.14)$$

$$P_{cond} = 6 \cdot 4 = 24 \text{ Вт.}$$

Втрати на комутації

Втрати на комутацію залежать від частоти комутації транзистора і суми втрат енергії під час увімкнення та вимкнення.

$$P_{swT} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_{PWM}. \quad (5.15)$$

Знайдемо значення суми загальних втрат енергії під час увімкнення та вимкнення знову в аркуші каталогу виробника схеми інвертора. Ми вибрали частоту перемикання 20 кГц.

$$P_{swT} = E_{TOT} \cdot f_{PWM} = 825 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 16,5 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати на перемикання, для 6 транзисторів:

$$P_{sw} = 3 \cdot P_{swM}, \quad (5.17)$$

$$P_{sw} = 3 \cdot 16,5 = 99 \text{ Вт.}$$

Загальні втрати перетворювача

Загальні втрати інвертора визначаються сумою лінійних втрат і втрат на комутацію:

$$P_d = P_{sw} + P_{cond}, \quad (5.18)$$

$$P_d = 99 + 24 = 123 \text{ Вт.}$$

За кривими рисунку 4.4 можна визначити загальні втрати перетворювача від вихідного фазного струму та різних частот.

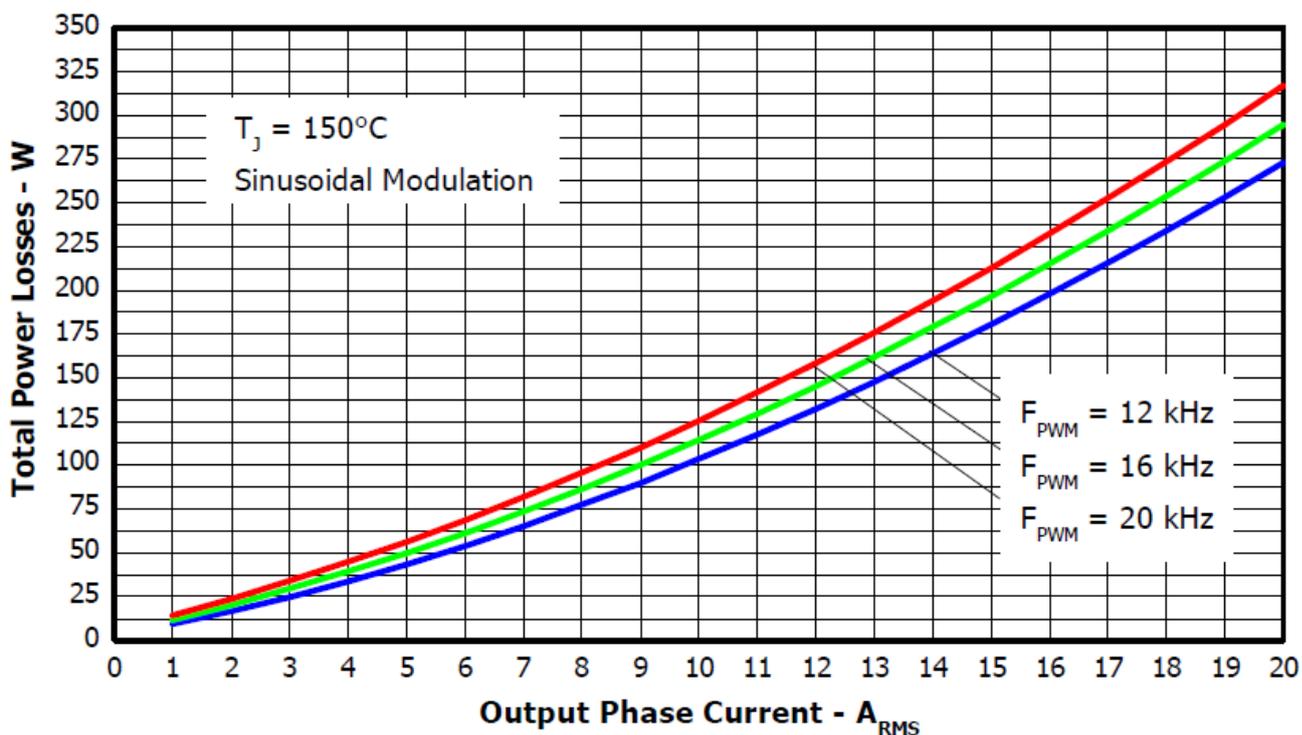


Рисунок 4.4 - Залежність загальних втрат перетворювача від вихідного фазного струму та різних частот [16]

З рисунка 4.4 видно, що сумарні втрати перетворювача на виході (колекторі струм) 10 А і частота 20кГц, відповідають приблизно 125 Вт. Це відповідає поточним розрахункам.

4.2 Питання реалізації друкованої плати перетворювача частоти

Друкована плата (ДПС), силова частина перетворювача частоти, із схемою IRAMY20UP60В розроблена в програмі EAGLE-7.2.0 [20]. Це каталожне підключення, яке було доповнено серією з шести підтягуючих резисторів, які у разі несправності зберігають логічну «1» на входах інверторної схеми.

Остаточний вигляд варіанту модернізації можна побачити на рис. 4.5. Друкована плата має розміри 90x100 мм. До відповідного модуля потрібно прикріпити лише кулер, якого, втім, цілком достатньо для поточних потреб. Для тестування на двигуні з більшою потужністю необхідно збільшити кулер або оснастити пасивне охолодження вентилятором.

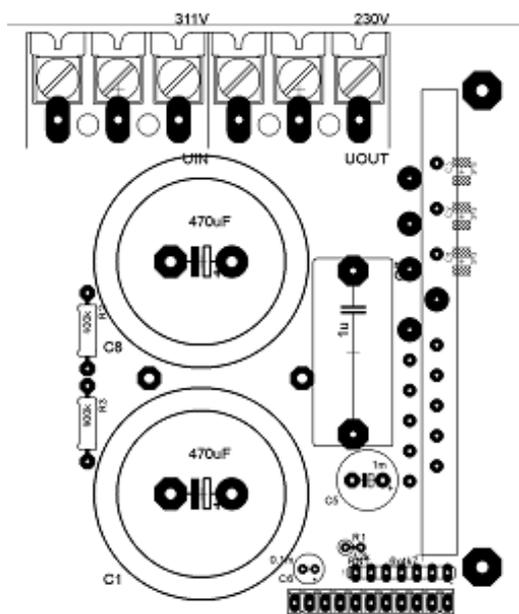


Рисунок 4.5 - Розміщення компонентів на друкованій платі силової частини інвертора

ВИСНОВКИ

У даній бакалаврській роботі увагу приділено модернізації системи керування відрізного верстату виробів з металу. Додатковим завданням є модернізація перетворювача частоти трифазного асинхронного двигуна. Спочатку інвертор розраховувався на двигун потужністю до 1000 Вт. Завдяки використанню інверторних схем з кращими параметрами теоретично можна підключити двигун потужністю до 2 кВт. Керуюча частина інвертора, що використовує інтегральну схему МСЗРНАС, залишилася незмінною, оскільки її цілком достатньо для поточних потреб.

Результатом бакалаврської роботи є варіант модернізованої системи електроприводу верстата, що включає розрахунок елементів друкованої плати силової частини інвертора, з новою схемою інвертора IRAMY20UP60B, підключеної за каталожною схемою та розробленої в програмі EAGLE 7.2.0. Розроблювану друковану плату у подальшому можна реалізувати фізично, та оснастити відповідними компонентами. Крім того, були розраховані максимальні втрати інвертора, які відповідають значенню, наданому виробником.

Кінцевий варіант електроприводу розраховано щодо коректності роботи перетворювача частоти. Зокрема, необхідно відзначити характеристику, що виражає залежність величини струму статора від його частоти, яку наведено на відповідних графіках. Отримані характеристики відповідають правильній функціональності регулювання швидкості асинхронного двигуна, та системи керування загалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. *Машини змінного струму: навч. посіб.* О.: Наука і техніка, 2005. 270 с
2. Метельський В. П. *Електричні машини та мікро машини.* Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. 600 с.
3. Малинівський С. М. *Загальна електротехніка.* Львів : Ви-во Львів. політех., 2001. 596 с
4. Wang, Zhentao & Gao, Mingyu & Zhuang, Shengen & Huang, Jiye. (2015). Design of Asynchronous Motor Vector Control Frequency Converter Based on DSP. 388-392. 10.1109/ICICTA.2015.104.
5. Wang, Kefeng & Wen, Fuyue & Sun, Baokui & Zhou, Jianbo & Han, Lei & Wang, Jiangyong. (2023). Gate modulation drive and modeling of IGBT in MMC converters. *Journal of Physics: Conference Series.* 2474. 012031. 10.1088/1742-6596/2474/1/012031.
6. Zhang, Jian & Bao, Fu & Dang, Hong. (2012). ControlNet Control System Network Design and Optimization. *Advanced Materials Research.* 586. 399-403. 10.4028/www.scientific.net/AMR.586.399.
7. Kasemir, Kay & Dalesio, Leo. (2001). Interfacing the ControlLogix PLC over Ethernet/IP.
8. Yang, Zheng & Bao, Zhiting & Jin, Chenglu & Liu, Zhe & Zhou, Jianying. (2022). PLCrypto: A Symmetric Cryptographic Library for Programmable Logic Controllers.
9. Fiorini, D. & Salati, Claudio. (2023). standard ethernet in real-time industrial applications. 74.
10. Fibich, Christian & Schmitt, Patrick & Höller, Roland & Rössler, Peter. (2023). Open-Source Ethernet MAC IP Cores for FPGAs: Overview and Evaluation. *International Journal of Reconfigurable Computing.* 2023. 1-36. 10.1155/2023/9222318.
11. Lakshmi, K & Kumaresan, K. & Sridhar, C & Shylesh, K. (2020). Speed control of three phase induction motors using PowerFlex 525 compact AC drive. IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. 764. 012038. 10.1088/1757-899X/764/1/012038.

12. Koch, Matthias & Hesse, Tilman & Kenkmann, Tanja & Bürger, Veit & Haller, Markus & Heinemann, Christoph & Vogel, Moritz & Bauknecht, Dierk & Flachsbarth, Franziska & Winger, Christian & Wimmer, Damian & Rausch, Lothar & Hermann, Hauke & Stieß, Immanuel & Birzler-Harder, Barbara & Kunkis, Michael & Tambke, Jens. (2017). Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration. 10.13140/RG.2.2.22708.35207.

13. Schnoor, Birger. (2022). Die Messung der Schreibfähigkeit in MEZ: Messinvarianz verschiedener Schreibimpulse der „MEZ-Schreibaufgabe Jugendliche“. 10.1007/978-3-658-35650-7_3.

14. Lewis, David & Chiu, Gordon & Chromczak, Jeffrey & Galloway, David & Gamsa, Ben & Manohararajah, Valavan & Milton, Ian & Vanderhoek, Tim & Dyken, John. (2016). The Stratix™ 10 Highly Pipelined FPGA Architecture. 159-168. 10.1145/2847263.2847267.

15. Igarashi, Shun & Miyawaki, Daisuke & Yamagishi, Suguru & Kuwayama, Ichiro & Iokibe, Kengo & Toyota, Yoshitaka. (2022). Unintentional radiated emissions from unshielded twisted pair cable attributed to twist structure. IEICE Communications Express. 11. 10.1587/comex.2022XBL0101.

16. Rais, Muhammad Haris & Asmar, Rima & Lopez, Juan & Ahmed, Irfan. (2022). Memory forensic analysis of a programmable logic controller in industrial control systems. Forensic Science International: Digital Investigation. 40. 301339. 10.1016/j.fsidi.2022.301339.

17. Bretney, Kevin & Ducker, Michael & Mathai, John & Towers, Kathleen & Walker, Ashley. (2023). Quality Control and Safety Sensors for Factory Automation (Rockwell Automation).

18. Vogel-Heuser, Birgit & Wilch, Jan & Dörfler, Adrian & Fischer, Juliane. (2022). Coping with Variability in HMI Software in the Design of Machine Manufacturers' Control Software. 10.1007/978-3-031-06509-5_29.

ДОДАТКИ

1. ANALYSIS OF MODERNIZATION CONDITIONS

1.1 Characteristics of metal cutting machines

In modern conditions, one of the most relevant spheres of activity is production. Any production requires the availability of various machines for the organizational production process. At the moment, the cost of high-tech machines is estimated at hundreds of thousands of dollars, which is a burden on the budget of any company, but without such machines, modernization of the entire production process is practically impossible. So, the question arises, how to deal with outdated models that are not efficient enough. They can be automated by adding specific components or entire modules to improve performance, because it is much cheaper than buying new equipment.

The main goals of a modern metalworking enterprise include increasing the productivity of processing parts/workpieces, which can be realized by modernizing the control system of current equipment, since the budget for such development is much cheaper than buying new machines.

At the moment, there are quite a few machines that have the necessary functions, below are some of the most suitable in terms of functionality.

SOCO FA-127DR machine

The SOCO FA-127DR machine [3] (production - China) is presented in Fig. 1.1.



Figure 1.1 - SOCO FA-127DR machine

The principle of operation of this automatic machine is that after installation, a pipe or several pipes are clamped, and then automatically fed to a given length and cut off, which is repeated cyclically until the pipe is used up. This machine is a column-type machine, that is, the saw moves vertically, which provides higher rigidity and precision, compared to any other pendulum-type machines.

In this model, you can adjust and program a large number of different parameters, for example, the speed of lowering the saw and the speed of its rotation, etc. It is optimally suitable for both thin-walled and thick-walled pipe cutting, there is also the possibility of batch cutting depending on the section of profile pipes, which significantly increases the cutting performance without loss of quality. Estimated cost of the machine - UAH 3,142,000.

Table 1.1 presents the advantages and disadvantages of the SOCO FA-127DR machine.

Table 1 - Advantages and disadvantages of SOCO FA-127DR.

Advantages	Disadvantages
Wide functionality	High cost
Cutting of thin-walled and thick-walled profile pipes	Slow cutting
Column-type machine	-
The manufacturer is one of the market leaders	-
It is possible to set a large number of parameters	-

TRIUMPH TS-400A machine

The TRIUMPH TS-400A machine [4] (Country of manufacture - Germany) is presented in Figure 1.2.



Figure 1.2 - TRIUMPH TS-400A machine

This model, like the previous analogue, is used for cutting profiled metal pipes of a shaped profile and solid rolled products. With the help of a saw blade, which is cleaned by drive brushes during the entire cutting process, it cuts thin-walled and thick-walled pipes and profiles of various cross-sections to the specified size. Its principle of operation: automatic feeding of blanks to the cutting place according to the task, clamp in a pneumatic vise, cut-off. It has a lot of functionality: setting the feed length of the workpiece, setting the amount and speed of lowering the saw, etc. Estimated cost of the machine - UAH 2,773,000.

Table 1.2 presents the advantages and disadvantages of this machine.

Table 1.2 - Advantages and disadvantages of the TRIUMPH TS-400A machine

Advantages	Disadvantages
Wide functionality	High cost
Cutting of thin-walled and thick-walled profile pipes	Slow cutting
Column type machine	-
Equipped with drive brushes for disc cleaning	-

SOCO MC-315AC machine

The SOCO MC-315AC machine [5], presented in Figure 1 3.



Figure 1.3 - SOCO MC-315AC machine

This semi-automatic machine is used for cutting profiles and pipes with a diameter of up to 115 mm. It cuts the pipe cleanly and quickly, and in the future it is not

necessary to perform an operation for finishing the ends of the cut part, which is very relevant for many tasks. After positioning and clamping the workpiece in a vise, the circular saw starts to descend at a pre-adjusted speed when the foot pedal is pressed. In the process of working on this machine, there are no shock loads due to incorrect work of the operator, the load on the teeth is carried out evenly, which positively affects the resource of the saw blade.

The system consists of the following elements:

- asynchronous electric motor;
- ZOR supply pump;
- pneumatic distributors;
- air preparation unit.

The asynchronous electric motor of the machine - FUKUTA AEVP [6] is presented in Figure 1.4.



Figure 1.4 - FUKUTA AEVP electric motor

Table 1.3 shows the characteristics of the FUKUTA AEVP electric motor.

Table 3 - Technical characteristics of FUKUTA AEVP [6]

Parameter	First speed	Second speed
Power, kW	1.2	2.2
Frequency, Hz	50	50

Nominal rotation frequency, rev/min.	1460	2850
Nominal voltage, V	400	400
Nominal current, A	2,8	5
Weight, kg	30	30

1.2 Tasks of modernization

The result of the analysis of the modes of operation of the considered samples of metal-cutting machines indicates a wide functionality of the corresponding equipment. At the same time, all considered models have a common drawback - low cutting speed. So, it is necessary to develop a system for controlling the cutting mode of the machine tool, which will be able to optimize the cutting parameters depending on the physical and mass-dimensional parameters of the workpiece. That is, being equipped with an engine of the same power, the machine will be able to process thin-walled blanks faster due to the application of power balance principles.

Thus, the modernization tasks are as follows:

- 1) Analyze the operation characteristics of power elements of the machine.
- 2) Compare and select the main components of the machine control system.
- 3) Conduct relevant studies on the modernization of the management system.

Додаток А
«Демонстраційні матеріали»

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

«Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Тема роботи: Модернізація системи керування відрізного верстага виробів з металу

Виконав: Совгіря О.В.

Керівник: Галай В.М.

Активальність теми роботи. На даний час, основними вимогами до електроприводу виробничих механізмів є високий ККД, гнучкі можливості автоматизації, високі термін служби та надійність. У той же час, потрібна реалізація з найменшими можливими розмірами разом із найменшими можливими витратами на придбання. Однак ці аспекти часто виключаються.

З появою перетворювачів частоти (ПЧ) зросла важливість і діапазон використання такого типу електроприводів, як асинхронні (АД). Перетворювач частоти забезпечує плавне регулювання швидкості асинхронного двигуна, який в основному використовується в простих механізмах, таких як насоси, ліфти, компресори, вентилятори тощо, але заживлення такого типу двигуна від ПЧ дає можливість значно розширити спектр використання АД.

Метою роботи є розробка автоматизованого електроприводу металовідрізного верстату із застосуванням енергоефективного перетворювача потужності.

Задачі роботи:

- 1) Проаналізувати характеристики експлуатації силових елементів верстата.
- 2) Провести порівняння та вибір основних компонентів системи керування верстатом.
- 3) Провести відповідні дослідження щодо модернізації системи керування.
- 4) Скласти висновки за результатами роботи.

Верстат СОСО МС-315АС



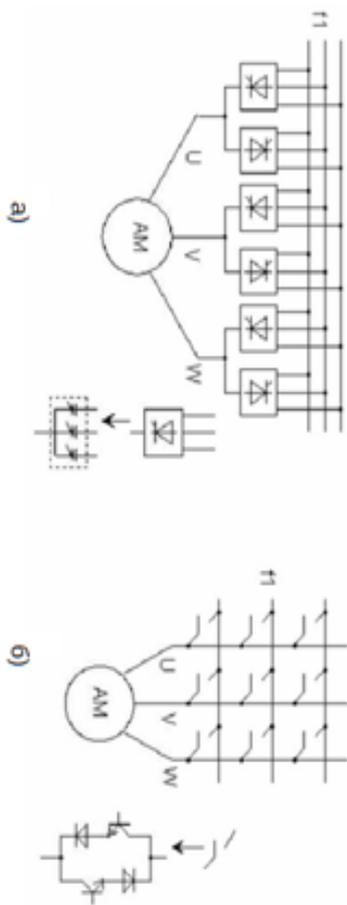
Технічна характеристика ФУКУТА АЕВР

Параметр	Перша швидкість	Друга швидкість
Потужність, кВт	1,2	2,2
Частота, Гц	50	50
Номінальна частота обертання, об/хв.	1460	2850
Номінальна напруга, В	400	400
Номінальний струм, А	2,8	5
Вага, кг	30	30

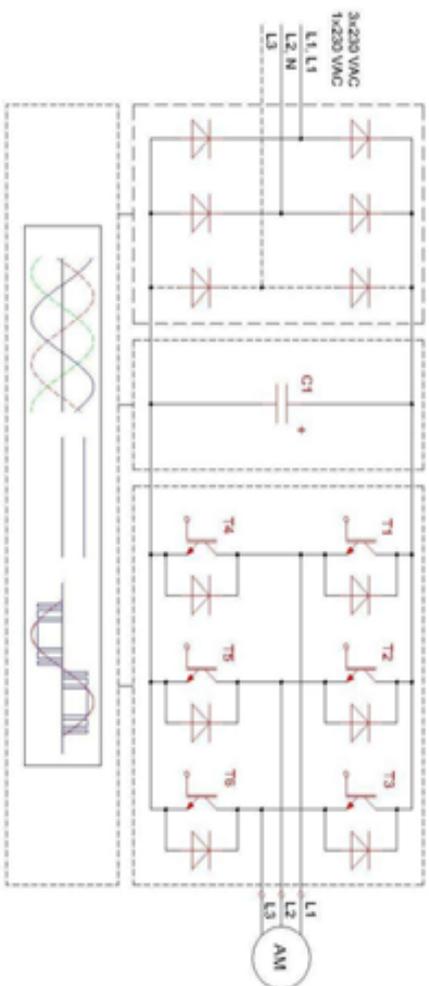
Електричний двигун ФУКУТА АЕВР



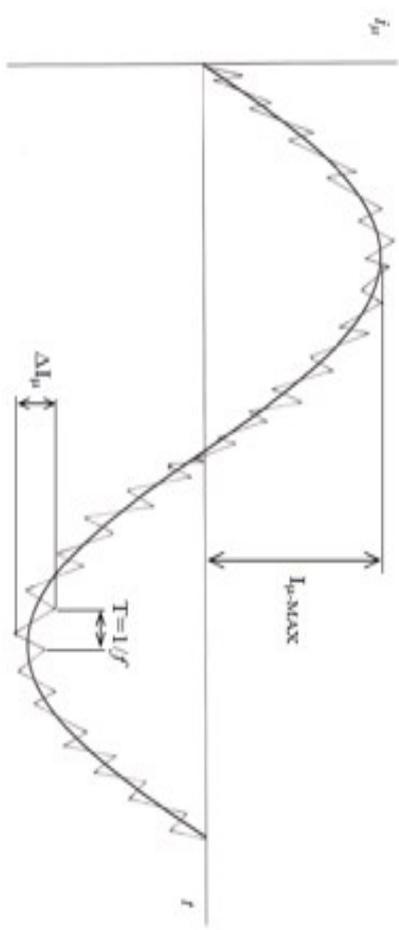
Циклоконвертер і матричний конвертер



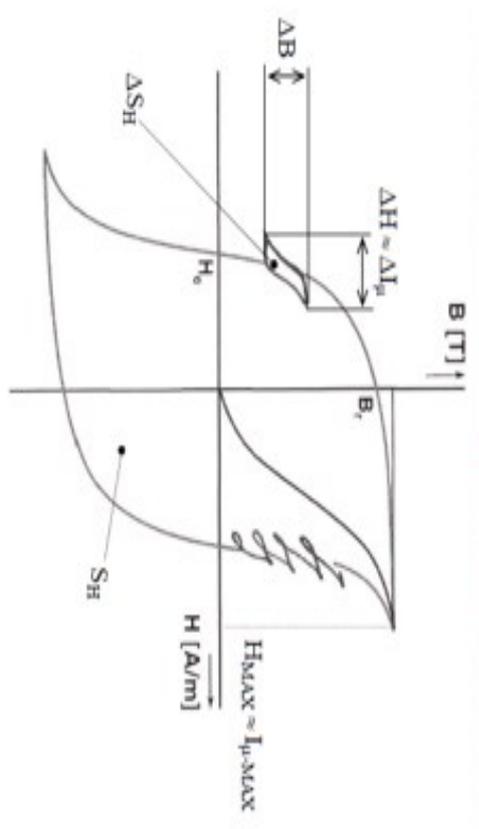
Непрямий перетворювач частоти



Пулвсації струму намагнічування під час синусоїдальної ШІМ



Ілюстрація додаткових втрат на гістерезис.



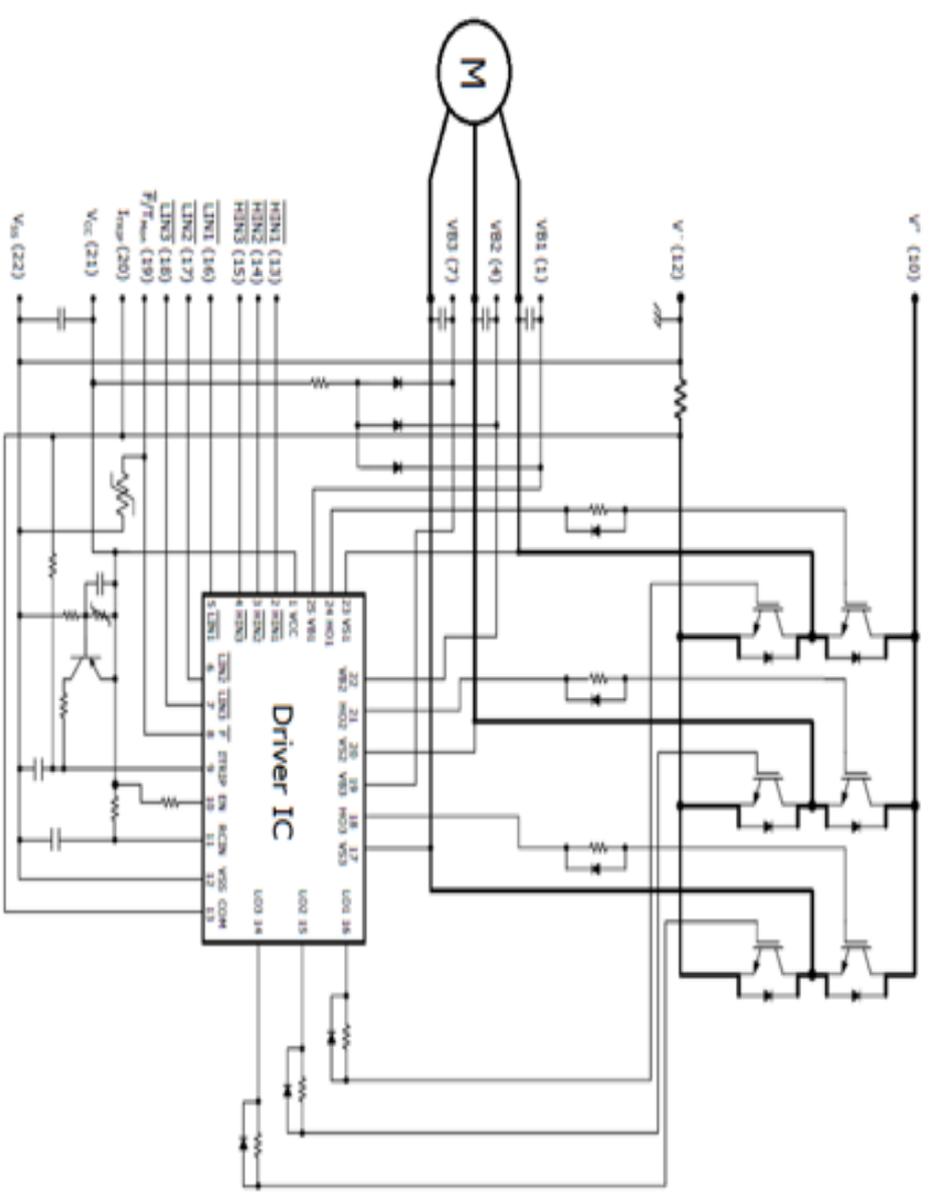
Порівняння параметрів окремих схем інверторів.

Схема перетворювача	FSB50450	STK621-041A-E	FSAM15SH60A	IRAMU20UP60 B
Максимальна напруга транзистора	500	600	600	600
Тип силових транзисторів	MOS-FET	IGBT	IGBT	IGBT
Вбудований тепловий захист	Ні	Так	Так	Так

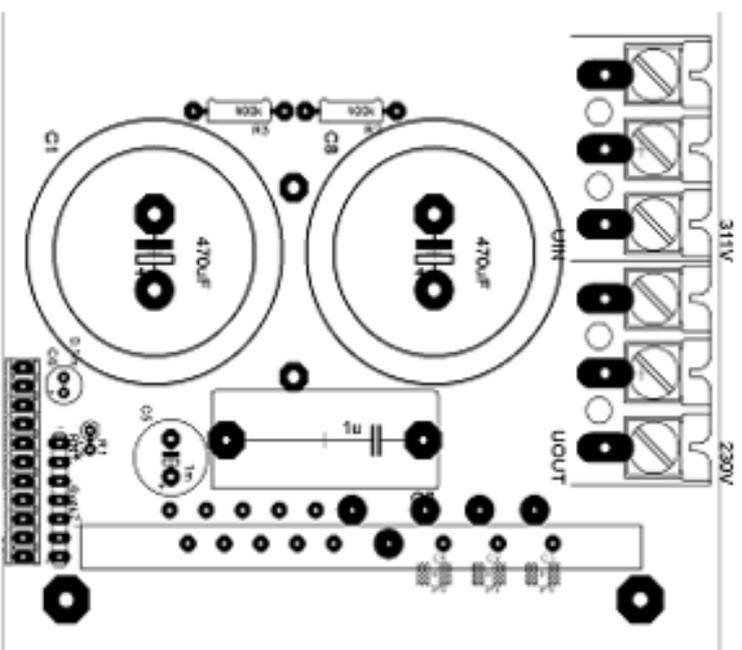
Характеристика модернізованого перетворювача частоти

Параметр	Значення
Вхідна напруга (U_1)	змінна, 230 В
Напруга ланки постійного струму (U_{DC})	постійна, 311 В
Ефективне значення сумарної напруги між фазами (U_{UVeff})	змінна, 230 В
Вихідна частота напруги з перетворювача (f)	50 Гц
Коефіцієнт потужності (cosφ)	0,7
Потужність заживленого двигуна (P_n)	1000 Вт

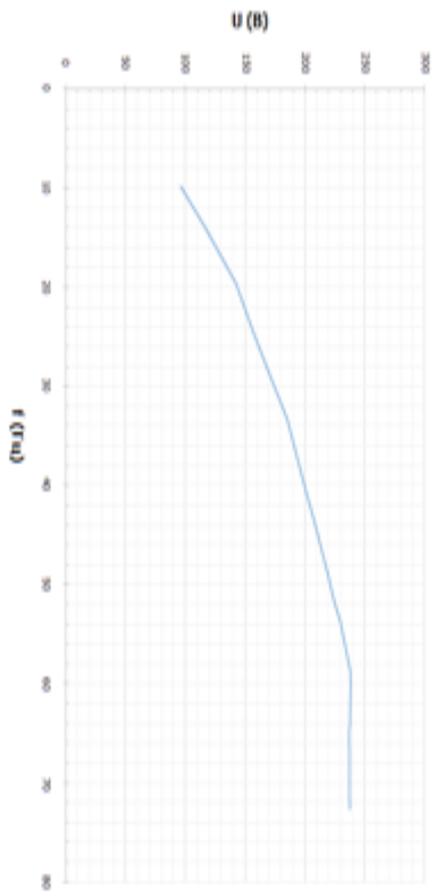
Схема електрична принципова електроприводу



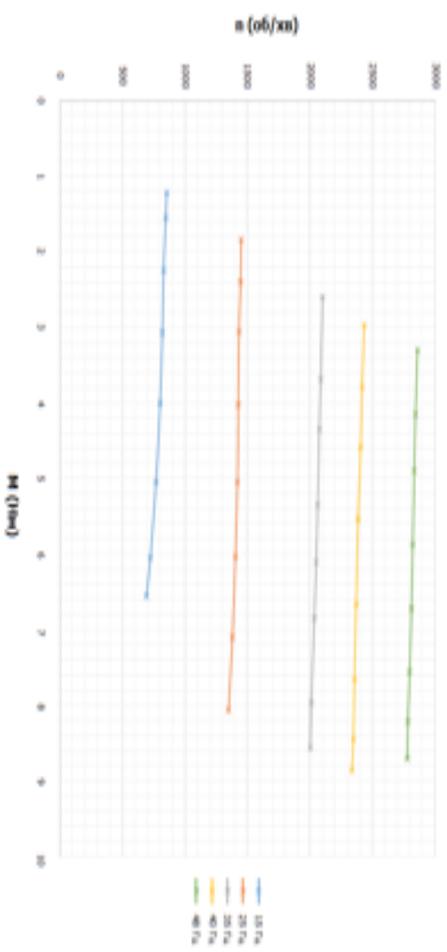
Розміщення компонентів на друкованої платі силової частини інвертора



Залежність величини напруги статора від частоти



Навантажувальні характеристики приводу



Висновки:

17

У даній бакалаврській роботі увагу приділено модернізації системи керування відрезного верстату виробів з металу. Додатковим завданням є модернізація перетворювача частоти трифазного асинхронного двигуна. Спочатку інвертор розраховувався на двигун потужністю до 1000 Вт. Завдяки використанню інверторних схем з крашими параметрами теоретично можна підключити двигун потужністю до 2 кВт. Керуюча частина інвертора, що використовує інтегральну схему МСЗРНАС, залишилася незмінною, оскільки її цілком достатньо для поточних потреб.

Результатом бакалаврської роботи є варіант модернізованої системи електроприводу верстага, що включає розрахунок елементів друкованої плати силової частини інвертора, з новою схемою інвертора. ІРАМУ20UP60В, підключеної за каталожною схемою та розробленої в програмі EAGLE 7.2.0.

Розроблену друковану плату у подальшому можна реалізувати фізично, та оснастити відповідними компонентами. Крім того, були розраховані максимальні втрати інвертора, які відповідають значенню, наданому виробником.

Кінцевий варіант електроприводу розраховано щодо коректності роботи перетворювача частоти. Зокрема, необхідно відзначити характеристики, що виражає залежність величини струму статора від його частоти, яку наведено на відповідних графіках. Отримані характеристики відповідають правильній функціональності регулювання швидкості асинхронного двигуна, та системи керування загалом.