

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

До кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження енергоефективних систем електроприводу при розробці та валідації навчально-дослідного стенду “Порівняльне керування перетворювачами частоти ABB ACS180 та ABB ACS580»

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-24м Андрій ОМЕЛЬЧЕНКО

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

Олег СІНЧУК

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

Юрій ОСАДЧУК

Кривий Ріг

2025

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЮ ОСВІТИ

Омельченко Андрія Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження енергоефективних систем електроприводу при розробці та валідації навчально-дослідного стенду “Порівняльне керування перетворювачами частоти ABB ACS180 та ABB ACS580

1. Термін подання студентом роботи: _____
 2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою даної кваліфікаційної роботи магістра є дослідження, проектування та розробка з подальшою верифікацією навчально-дослідного стенду із двома перетворювачами частоти серії ACS180 та ACS580. Крім цього необхідно розробити відповідні методики вимірювань та порівняти енергоефективність, якість електроенергії й динаміку керування для типових механізмів (типу насоса, вентилятора, конвеєру тощо).
 3. Зміст пояснювальної записки: I. Загальні відомості по системам керуванням електроприводу змінного струму з інтегрованим ПЧ. II. Вибір елементів стенду під завдання навчального стенду. III. Створення схеми, моделі та технічної документації на навчальний стенд. IV. Методики та проведення дослідів. аналіз результатів. V. Економічний розділ.
- _____

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): I. Зовнішні вигляди елементів стенду. II. Схеми підключення перетворювачів частоти. III. Електричні схеми підключення лабораторного стенду. IV. Графіки та теплові карти аналізу даних експериментів.

5. Консультація розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Пересунько І.І.		
II	Пересунько І.І.		
III	Пересунько І.І.		
IV	Пересунько І.І.		
V	Пересунько І.І.		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Ознайомлення з темою лабораторного стенду та дипломної роботи	15.09.2025
2	Вивчення нормативних документів по проектуванню системи електроприводу	18.09.2025
3	Ознайомлення з технічною базою перетворювачів частоти серії ACS180 та ACS580	29.09.2025
4	Опис загальних положень щодо лабораторного стенду	09.10.2025
5	Створення робочої схеми системи приводу з двома перетворювачами частоти	25.10.2025
6	Вибір елементів силового кола та додаткового обладнання	27.10.2025
7	Вивчення отриманого макету стенду та уточнення	29.10.2025

	деяких моментів по проектуванню стенду	
8	Підготовка дослідів для стенду	03.10.2025
9	Початок роботи над монтажем та підключенням стенду	15.11.2025
10	Завершення роботи над стендом	19.11.2025
11	Проведення підготовлених дослідів	11.12.2025
12	Обробка даних та підготовлення паспорту з лабораторним практикумом	12.12.2025

Дата видання завдання: _____

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Андрій ОМЕЛЬЧЕНКО

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Дослідження енергоефективних систем електроприводу при розробці та валідації навчально-дослідного стенду “Порівняльне керування перетворювачами частоти ABB ACS180 та ABB ACS580».

Мета роботи – проектування, створення та випробовування навчально-дослідного стенду з двома перетворювачами частоти.

Об’єкт розробки – лабораторно-дослідний стенд з двома перетворювачами частоти.

В першому розділі розглянуті положення щодо електромеханічної системи, її роботи в комбінації з перетворювачами частоти та необхідні нормативні документи.

В другому розділі розглядається вибір основних елементів стенду для виконання його функцій. Обґрунтований вибір кожного елемента та його параметру. Зроблений загальний огляд на перетворювачі частоти типу ACS180-04S-03A3-4 та ACS580-01-03A3-4.

Третій розділ містить у собі пояснення щодо створення схеми, розташування елементів, створення 3-D моделі системи з подальшим монтажем.

Четвертий розділ описує налаштування встановлених перетворювачів частоти та перелік проведених дослідів. Проведення аналізу отриманих даних для їх співставленням з описом виробника на продукт.

П’ятий розділ – економічний. Тут проведені розрахунки, щодо окупності системи при впровадженні перетворювачів частоти.

ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД, ТЕХНІЧНА ДОКУМЕНТАЦІЯ, СХЕМА.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПО СИСТЕМАМ КЕРУВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ З ІНТЕГРОВАНИМ ПЧ	9
1.1. Загальноприйнята структура електроприводу змінного струму та його елементи	9
1.2. Принцип роботи перетворювача частоти та його призначення	10
1.3. Заходи безпеки перед роботою з перетворювачами частоти, силовим обладнанням та напругою	11
1.4. Огляд нормативної бази для проектування та забезпечення електробезпеки	12
РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СТЕНДУ ПІД ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ	14
2.1. Умови вибору та проектування автоматизованої системи електроприводу 14	
2.2. Вибір перетворювачів частоти	15
2.3. Асинхронні двигуни для стенду	24
2.4. Вибір електричних компонентів силової частини кола та корпусу	25
2.5. Вибір обладнання оперативної (керування) частини кола	35
2.6. Вибір апаратури захисту	37
2.7. Вибір додаткового обладнання	39
2.8. Розрахунок гальмівного резистора	40
2.9. Моніторинг, візуалізація та запис стану системи за допомогою SCADA системи	46
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ СХЕМИ, МОДЕЛІ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА НАВЧАЛЬНИЙ СТЕНД	51
3.1. Зображення основних елементів на схемах	51
3.2. Силова частина схеми	52
3.3. Підключення ланцюгів керування	59
3.4. Підключення клем частотних перетворювачів	60
3.4.1. Підключення сигналів оперативних ланцюгів перетворювача частоти ACS180-04S-03A3-4	60
3.4.2. Підключення сигналів оперативних ланцюгів перетворювача частоти ACS580-01-03A3-4	62

3.5. Створення 3-D моделі навчального стенду	64
3.6. Реалізація функції безпечного відключення крутного моменту STO	66
3.7. Процес збору стенду з нюансами монтажу	67
3.8. Створення паспорту продукту та інструкції з експлуатації	70
3.8.1. Структура та склад паспорту продукту	70
3.8.2. Структура та склад інструкції з експлуатації	72
РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ. АНАЛІЗ	
РЕЗУЛЬТАТІВ.....	74
4.1. Налаштування перетворювачів частоти	74
4.1.1. Налаштування ACS580-04S-03A3-4	74
4.1.2. Налаштування ACS180-01-03A3-4.....	78
4.2. Експериментальне дослідження та порівняння роботи двох перетворювачів частоти.	79
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	87
Список використаних джерел	88

ВСТУП

Застосування перетворювачів частоти як буферного вузла в роботі привода різних систем навантаження є одним з ключових напрямків раціонального використання енергоресурсу установки. Таке рішення, що застосовується в широкому спектрі виробництва, має ряд суттєвих переваг, окрім звісно регулювання параметрів двигунів в залежності від типу, умов та характеру навантаження. Сучасні електропривода вимагають розвиненого людино-машинного інтерфейсу, можливість віддаленого керування, моніторингу ресурсу та стану і високу енергоефективність систем або груп систем, що повинні взаємодіяти між собою в реальному часу. Такі технологічні завдання реалізуються за допомогою сучасних ПЧ, які мають вбудовані системи контролю та зв'язку.[31]

Предметом дослідження даної роботи є установка електроприводу змінного струму з інтегрованим перетворювачем частоти (ПЧ). Дана система має універсальне використання, тобто є шаблонним рішенням для низки промислових галузей з деякими поправками на специфічні вимоги кожної з них. В умовах дослідження така установка є майже еталонною під будь-які завдання.

Ціллю дослідження є вибір, встановлення та регуляція характеристик та параметрів ПЧ задля зниження енергоспоживання системи середньому за період на 20-30%. Крім того, необхідно створити практичну базу для подальшого навчання наступного покоління студентів.

Чітко визначена мета роботи полягає в тому, щоб з двох наданих перетворювачів частоти виробника АВВ серій ACS580 та ACS180 створити робочий стенд для запуску двох двигунів, розробити та провести дослідження з енергоефективності системи, порівняти якість електроенергії при різних умовах пуску системи.[28],[15],[17]

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПО СИСТЕМАМ КЕРУВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ З ІНТЕГРОВАНИМ ПЧ

1.1. Загальноприйнята структура електроприводу змінного струму та його елементи

Електропривід – це електромеханічна система, що перетворює або трансформує електричну енергію в механічну, для виконання корисної роботи різних типів механізмів. Механізмами можуть бути клапани, вентиляція, насоси, підйомники вантажу, регулятори положення тощо.[1]

Головними частинами такої системи можна виділити:

- система керування (СК) – включає в себе силове перетворювальне обладнання, механізм задання завдання, зворотні електричні та механічні зв'язки тощо;
- електричний двигун (ЕД) – прилад, що перетворює електричну потужність мережі в механічну на валу;
- механічна частина привода (МЧП) – частина привода, що відповідає за передачу механічної потужності з валу двигуна до виконавчого органу машини.

На рисунку 1.1 зображений спрощений вигляд такої системи.

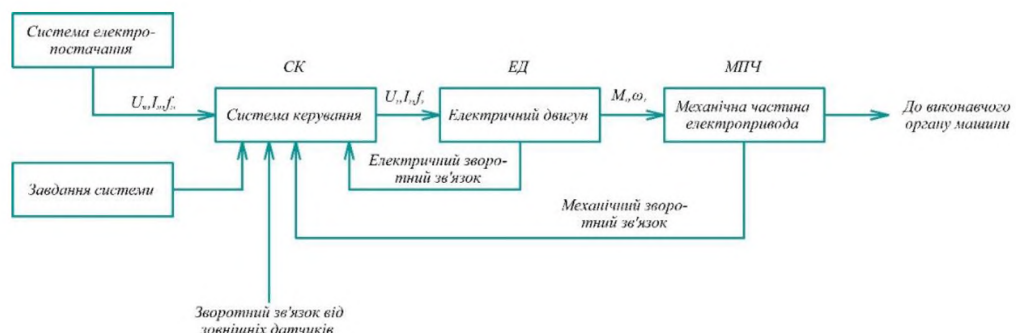


Рис. 1.1. – Загальна структура системи електропривода

1.2. Принцип роботи перетворювача частоти та його призначення

Перетворювач частоти(ПЧ) відноситься до вузла системи керування (СК). Він – проміжна ланка в силовій частині кола та системі керування, а також багатофункціональний блок, що має змогу замінити ряд допоміжних засобів керування. Це можливо завдяки наявності вбудованих релейних, аналогових та цифрових входів та виходів, а реалізований протокол обміну даними MODBUS в мережі ETHERNET дозволяє ще більше спростити схему з декількома ПЧ лише за допомогою програмного керування. Приклад перетворювача частоти на рисунку 1.2.[8],[31]



Рис.1.2. – Приклад вигляду ПЧ. Зліва на право: перетворювач частоти Schneider Electric ATV610 0,75кВт настінного виконання та ATV950F 315кВт комплектний[28]

Принципом роботи будь-якого перетворювача частоти головним чином є наново створення необхідного сигналу керування незалежно від вхідних параметрів. Найпростіший приклад: вхідна трифазна напруга, що приходить на клемі ПЧ, спочатку проходить через вбудований випрямляч для отримання постійного струму; проміжним етапом є згладження пульсацій та перепадів випрямленого струму через конденсатори та дроселі; далі ПЧ формує нову синусоїду необхідної напруги та частоти, що реалізується через силові транзистори, наприклад IGBT-модулі, та технології широтно-імпульсної

модуляції (ШІМ) . Крім того, у цих проміжках ще можуть встановлюватися додаткові типи фільтрів, блоки живлення кіл керування тощо.

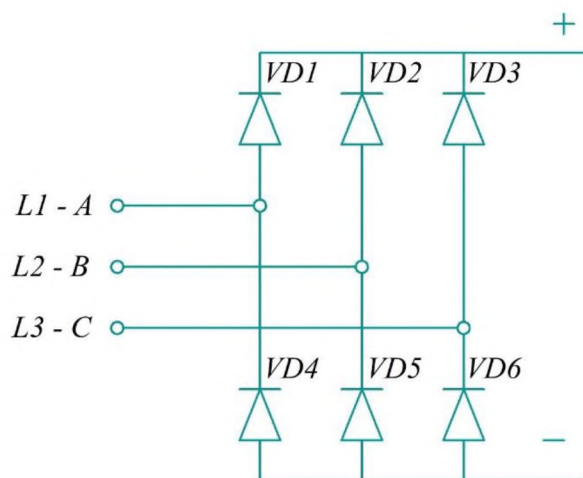


Рис. 1.3. – Схема мосту Ларіонова, де VD1 – VD 6 – діоди

На рисунку 1.4 представлена функціональна схема роботи будь-якого перетворювача частоти.

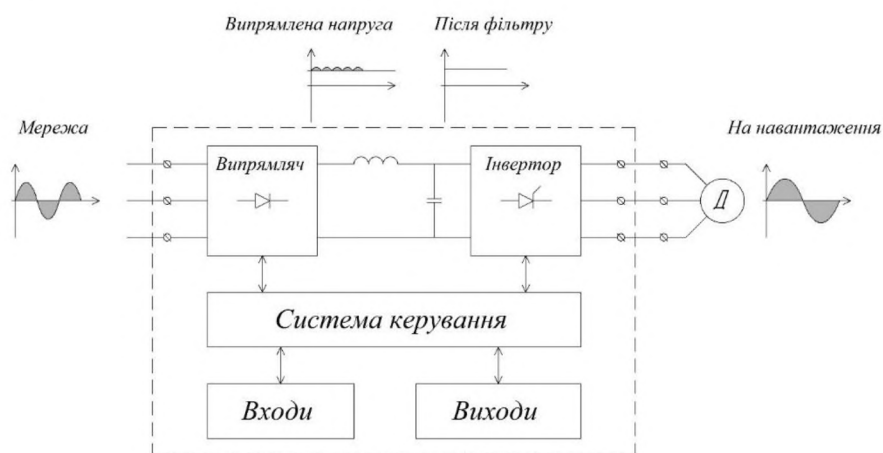


Рис.1.4. – Функціональна схема перетворювача частоти

1.3. Заходи безпеки перед роботою з перетворювачами частоти, силовим обладнанням та напругою

Перед роботою з будь-якими електроприладами необхідно ознайомитися з їх інструкцією з експлуатації та вказівками виробника. Будь-який збірник до обладнання обов'язково має розділ з вказівками, щодо монтажу, безпечної експлуатації, поводження з упаковкою та транспортуванням приладу тощо.

Загалом можна виділити наступні основні пункти:[6]

- Зберігання обладнання в оригінальній упаковці до його використання;
- Використання захисного одягу (такого як взуття, рукавиці, довгі рукава тощо) при роботі з електрообладнанням, особливо під напругою;
- Після вимкнення системи слід бути уважним, адже окремі елементи схеми деякий час після відключення залишаються під напругою і можуть викликати травму: опік від нагрітих елементів, ураження електричним струмом від заряджених конденсаторів тощо;
- Електрообладнання має бути захищене від потрапляння пилу та води всередину, обов'язкове очищення робочого приміщення після виконання монтажу;
- Перед початком роботи обладнання має бути на своїх місцях, з виставленими параметрами, знятими кришками тощо;
- Система повинна мати достатній рівень охолодження;
- Перед включенням системи необхідно також переконатися, що всі електроприлади мають змогу працювати в необхідних робочих діапазонах;
- Кількість включення системи має обмежений характер і визначається виробником (зазвичай пишуть комутаційну здатність, наприклад не більше 5 комутацій за хвилину тощо);
- При роботі системи треба враховувати усі можливі робочі положення системи, щоб запобігти аварійним ситуаціям: не перекривати повітряний потік охолодження та не торкатися потенційно небезпечних поверхонь.

1.4. Огляд нормативної бази для проектування та забезпечення електробезпеки

Основні нормативні документи для роботи з даним типом обладнання - «Правила улаштування електроустановок» (ПУЕ) та ДСТУ 7237:2011 «Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».[36],[37]

«Правила улаштування електроустановок» (ПУЕ) визначає принципи конструкції, вимоги до елементів, їх розміщення, монтажу, захисту тощо, і поширюється на установки змінного струму до 750 кВ та постійного до 1,5 кВ.

ДСТУ 7237:2011 — «Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту» є стандартом забезпечення умов безпеки праці та захисту від уражень електричним струмом. Цей стандарт визначає класи і способи захисту і також поширюється на проектування, монтаж, обслуговування та експлуатацію електрообладнання.

Крім того, при проектуванні наприклад аварійного освітлення чи інших специфічних частин будівлі, приводу тощо можливе обов'язкове звернення на додаткові посилання. Зазвичай такі нормативні посилання містяться в переліку додаткових нормативних посилань документу, того ж самого ДСТУ 7237:2011 — «Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту».

В описі технічного обладнання компанія ABB також посилається на стандарт IEC/EN 61800-5-1 стандарт безпеки, що встановлює вимоги до силових електричних приводів зі змінною швидкістю (PDS) щодо електро-, теплової та енергетичної безпеки. Він охоплює системи, що включають перетворювачі потужності, контролери та електродвигуни, але не поширюється на окремі компоненти, які мають власні стандарти безпеки.

Додаткові нормативні документи за необхідності будуть розглядатися для кожного етапу окремо.[1],[2],[3],[5]

Висновок до розділу один

В даному розділі було розглянута загальноприйнята схема електроприводу: її елементи та їх опис, зв'язки тощо. Також був розглянутий

принцип роботи будь-якого перетворювача частоти та наведені їх реальні фото та схеми.

Розглянуті основні нормативні документи, що пов'язані з даною роботою для проектування схеми, вибору послідовного обладнання та дотримання правил безпеки під час роботи з напругою.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СТЕНДУ ПІД ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДУ

2.1. Умови вибору та проектування автоматизованої системи електроприводу

Перед початком роботи над створенням системи автоматизованого електроприводу необхідно ознайомитися з технічним завданням на проектування. Загалом для системи з перетворювачем частоти необхідно визначитися з наступними умовами:[36]

- a) Необхідна потужність установки
- b) Умови експлуатації
- c) Технологічні вимоги до системи
- d) Ціна питання
- e) Додаткові умови замовника тощо

Розглядаючи кожен пункт по окремості маємо:

- Потужність установки визначається кількістю та потужністю двигунів, які встановлені для роботи механізму. Загалом більшість рішень залежить від уже встановленої потужності двигуна, тому замовник вказує, якій потужності повинна відповідати система. Однак у випадках, коли необхідно проектувати систему «з нуля»(повністю нову систему), слід орієнтуватися на ту кількість корисної роботи, яку повинна виконувати система. Тобто очевидно, що двигуна потужністю 1 кВт і менше не вистачить для перевезення по конвеєрах руди 1т за період часу в 20 секунд тощо.

- Умови експлуатації також сильно вплинуть на технічне рішення. Слід ретельно визначити, в якому місці та яке завдання виконуватиме система. Тобто, чи буде на нього потрапляти сонячне проміння, чи необхідний додатковий захист від потрапляння вологи всередину або ж середовище буде мати високий вміст пилу, що може порушити роботу електроніки.
- В технологічних вимогах зазначаються критерії телеметрії, наприклад, що система повинна керуватися дистанційно та передавати телеметрію на пост керування, знімати та аналізувати показники, щоб мати змогу правильно підлаштовуватися під динамічні зміни навантаження у часі, виводити основні показники системи і журнал аварій на вмонтовану сенсорну НМІ-панель та можливість швидкого ручного керування на місці. Причому, обов'язковою умовою повинна бути наявність всіх доступних захистів кожної ланки системи електроприводу та їх селективність: незалежна, злагоджена та поетапна взаємодія між собою при роботі в штатному та аварійному режимах.
- Ціна питання безумовно вказується замовником. Перед тим як виставити наприклад ту саму пропозицію, спочатку аналізується ринок на предмет доступних матеріалів та їх ціну, далі вже оголошується приблизний бюджет. Однак ціна цілком залежить після отримання проекту на руки, щоб можна було скласти повний перелік необхідних матеріалів для монтажу, підключення та налагодження системи.
- В додаткових умовах присутні можливі нюанси при розробці. Наприклад шафи з нержавіючої сталі переважно використовуються для харчової промисловості, необхідність встановлення кола сигналізації по внутрішньому нагріві двигуна (той самий ТРМ-100) і тому подібне.

2.2. Вибір перетворювачів частоти

Для початку проектування схеми системи електроприводу необхідно визначитися з умовами експлуатації механізму та його характеристиками.

Однак у випадку даної дипломної роботи були уже надані перетворювачі частоти відповідної марки і потужності. Тому, потужність частотних перетворювачів в нормальному режимі відповідає потужності необхідного обладнання.

Для стенду використовуються ПЧ виробництва компанії ABB серії 180 та 580.[15],[38]

ACS180-04S-03A3-4



Рис.2.5 (зліва на право: а та б) – вигляд ACS180-04S-03A3-4 з та без захисної кришки

№	Назва параметру	Значення
1	Тип корпусу NEMA	Відкритого типу
2	Висота	2000 м
3	Робоча вологість (%)	5 ... 95
4	Коефіцієнт потужності	0,98
5	Інформація про кілька акумуляторів	Батарейка/елемент у комплекті відсутній
6	Частота (мережі живлення)	47 ... 63 Гц
7	Розмір рами	R0

8	Вхідна напруга (В)	380 ... 480 В
9	Тип кріплення	Модульний
10	Протокол зв'язку	MODBUS
11	Кількість апаратних інтерфейсів	RS-485 1
12	Комплект поставки включає	Блок керування, підключення до ПК
13	Аналогові входи	2
14	Аналогові виходи	1
15	Кількість цифрових входів/виходів	4/2
16	Вихідний струм, нормальні умови (I _n)	3,3 А
17	Вихідний струм, використання при легкому перевантаженні (I _{LD})	3,1 А
18	Вихідний струм, використання у важких умовах (I _{HD})	2,4 А
19	Вихідна потужність, звичайне використання (P _n)	1,1 кВт
20	Вихідна потужність, при легкому перевантаженні (P _{LD})	1,1 кВт
21	Вихідна потужність, важкі умови (P _{HD})	0,75 кВт

Таблиця 2.1. – Паспортні дані перетворювача частоти ACS180-04S-03A3-4

Паспортне ККД роботи ПЧ за різних умов навантаження та регулювання:

Частота/Струм Гц/А	Абсолютна втрати, Вт	Ефективність, %	Відносні втрати, %
0/25	19	86,5	0,8
0/50	22	91,5	0,9
0/100	29	93,8	1,3
50/25	20	92,7	0,9
50/50	23	95,4	1,0
50/100	32	96,6	1,4

90/50	26	97,1	1,1
90/100	38	97,7	1,6

Таблиця 2.2. – Таблиця ефективності роботи перетворювача частоти
 ACS180-04S-03A3-4 за різних умов

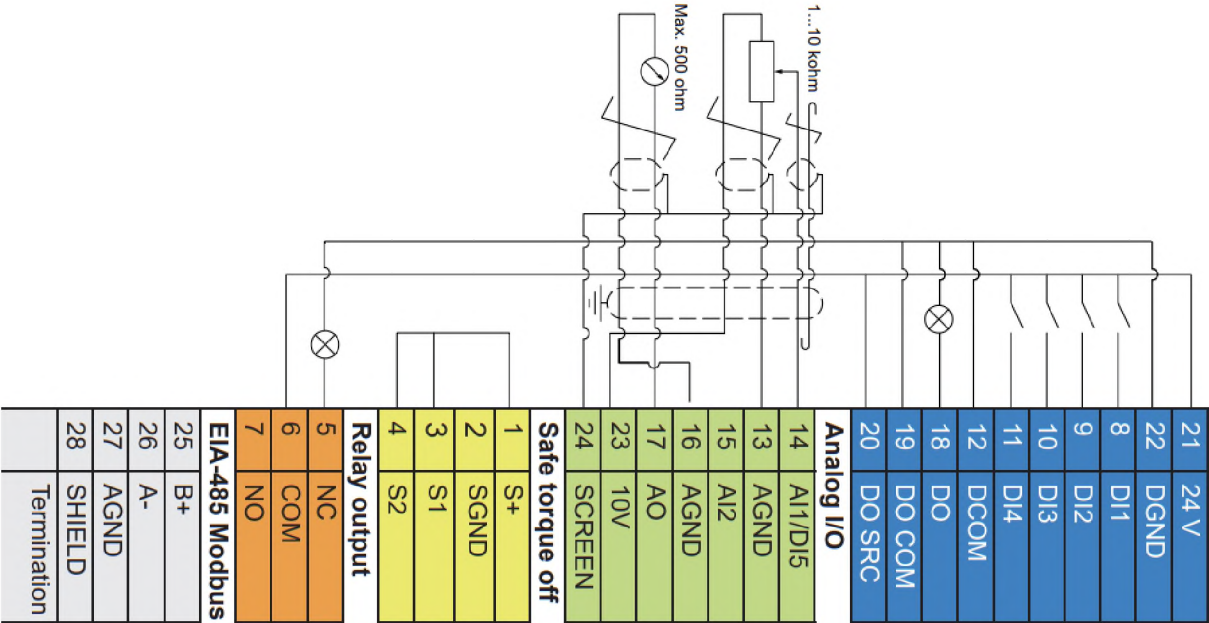


Рис.2.6. – Підключення вбудованих контактів керування та сигналізації
ACS180-04S-03A3-4

Позначення клем підключення ПЧ:

№	Назва	Призначення
Підключення цифрових входів/виходів		
21	24 V	Додаткова напруга: +24 В, не більше 100 мА
22	DGND	Загальний вихід додаткового живлення
8	DI1	Зупинка (0) / Пуск (1)
9	DI2	Вперед (0) / Назад (1)
10	DI3	Вибір фіксованої швидкості
11	DI4	Вибір фіксованої швидкості
12	DCOM	Загальний цифрових входів
18	DO	Робота
19	DO COM	Загальний цифрових виходів
20	DO SRC	Вихід додаткової напруги для цифрових входів
Підключення аналогових входів/виходів		
14	AI1/DI5	Задання швидкості (0...10 В)
13	AGND	Загальний аналогових входів
15	AI2	Не використовується
16	AGND	Загальний аналогових виходів
17	AO	Вихідна частота (0...20 мА)
23	10V	Опорна напруга +10 В=
24	SCREEN	Екран кабелю керування (екран)
Функція безпечного відключення крутного моменту		
1	S+	Функція безпечного відключення крутного моменту. Підключається на заводі-виробнику. Привід запускається, тільки коли обидва ланцюги замкнуті.
2	SGND	
3	S1	
4	S2	

Релейний вихід		
5	NC	Нема відмови [Відмова (-1)]
6	COM	
7	NO	
EIA-485 Modbus RTU		
25	B+	Вбудований інтерфейсний модуль Modbus RTU (EIA-485)
26	A	
27	AGND	
28	SHIELD	
-	Termination	

Таблиця 2.3. – Опис вбудованих контактів перетворювача ACS180-04S-03A3-4

ACS580-01-03A3-4



Рис 2.7(зліва на право а та б) – зовнішній вигляд ACS580-01-03A3-4 з та без захисної кришки

№	Назва параметру	Значення
1	Тип корпусу NEMA	Тип 1
2	Висота	1000 м
3	Робоча вологість (%)	5 ... 95
4	Рівень ефективності	IE2
5	Інформація про кілька акумуляторів	Літієва батарейка-гудзика,

		CR2032, 220 мАг, 3 В, 1 шт., 3 г
6	Частота (мережі живлення)	47 ... 63 Гц
7	Розмір рами	R1
8	Вхідна напруга (В)	380 ... 480 В
9	Тип кріплення	Настінний
10	Протокол зв'язку	CAN DeviceNet EtherNet/IP MODBUS Other Bus Systems PROFIBUS PROFINET IO TCP/IP
11	Кількість апаратних інтерфейсів	RS-485 1 USB 1 Інші 2 Паралельні 2
12	Комплект поставки включає	Блок керування, підключення до ПК
13	Аналогові входи	2
14	Аналогові виходи	2
15	Кількість цифрових входів/виходів	6/3
16	Вихідний струм, нормальні умови (I _n)	3,3 А
17	Вихідний струм, використання при легкому перевантаженні (I _{LD})	3,1 А
18	Вихідний струм, використання у важких умовах (I _{HD})	2,6 А
19	Вихідна потужність, звичайне використання (P _n)	1,1 кВт

20	Вихідна потужність, при легкому перевантаженні (P LD)	1,1 кВт
21	Вихідна потужність, важкі умови (P HD)	0,8 кВт
22	Втрати в режимі очікування (Вт)	14

Таблиця 2.4. - Паспортні дані перетворювача частоти ACS580-01-03A3-4

ККД роботи ПЧ за різних умов навантаження та регулювання:

Частота/Струм Гц/А	Абсолютна втрати, Вт	Ефективність, %	Відносні втрати, %
0/25	32	79,2	1,4
0/50	34	87,2	1,5
0/100	41	91,4	1,8
50/25	33	88,5	1,4
50/50	36	93,1	1,6
50/100	45	95,2	2,0
90/50	39	95,7	1,7
90/100	51	96,9	2,2

Таблиця 2.5. - Таблиця ефективності роботи перетворювача частоти ACS580-01-03A3-4 за різних умов

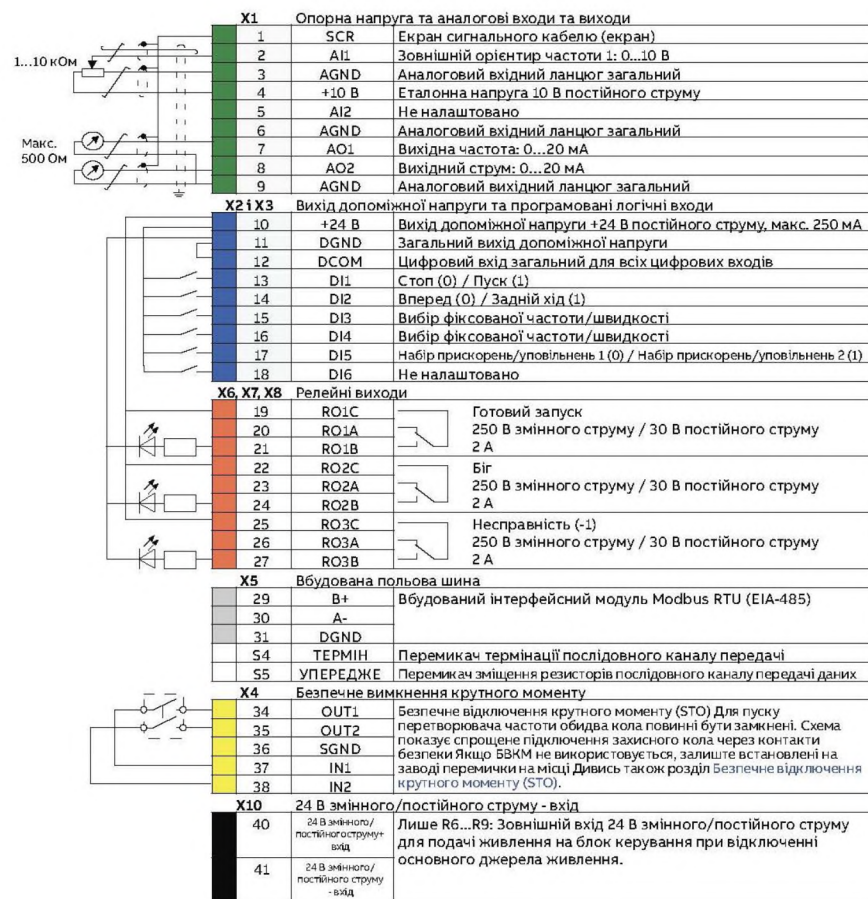


Рис. 2.8. – Підключення вбудованих контактів керування та сигналізації ACS580-01-03A3-4[]

2.3. Асинхронні двигуни для стенду

Перетворювачі частоти підключаються до двох асинхронних двигунів по 0.75 кВт кожен. Їх паспортні характеристики представлені на рис 2.9 та 2.10.



Рис. 2.9. – Двигун типу АИР 71В4 У2 0,75 кВт та його паспортні дані



Рис. 2.10. – Двигун високого класу ефективності L3E A 80MB4 0,75 кВт

2.4. Вибір електричних компонентів силової частини кола та корпусу

З визначеним рядом певних характеристик можна приступити до вибору обладнання. В даній роботі головним чином буде розглядатися електрична складова системи.

Сучасні моделі ПЧ мають вбудовані в себе захисти від витoku струму, обриву фаз, короткого замикання, перевантаження, а також мають функцію плавного пуску. Однак попри вбудовані численні захисти, виробники все ж наполягають на встановленні на вході ПЧ додаткового захисту, що залежить від потужності першого. Таким захистом може виступати плавкі запобіжники (бажано для невеликих потужностей), автомат захисту двигуна (до 63 А), для більш потужних двигунів з амперажем від 100 до 630 А використовується автоматичний вимикач в литому корпусі з електронним розчіплювачем. Він, як і в принципі більшість автоматичних вимикачів, обирається за аналогом наданим виробником або, якщо такого не має, то за струмом, робочим

навантаженням, необхідною характеристикою та ймовірним струмом КЗ. Останній параметр вкрай важливий і завжди зазначений в паспорті ПЧ.[28]



Рис. 2.11 – Автоматичний вимикач в литому корпусі COMPACT NSX630F 36kA 3P 600A з розчіплювачем TMD DC (зліва – реальне фото, справа – 3-D модель)

Для великих потужностей, струм понад 630 А, розглядається рішення з габаритними вимикачами. Тут також можна використати повітряний, вакуумний автоматичний вимикач, що з'єднується за допомогою системи шин. Такі сучасні пристрої мають в собі всю необхідну електроніку: починаючи від будь-яких захистів закінчуючи релейними і логічними виходами та можливістю керування через протоколи типу MODBUS TCP і тому подібне. Крім того можливе встановлення виносного рубильника з запобіжниками, однак таке рішення не є досить популярним і можливе для менших потужностей.[30]



Рис. 2.12. – Вакуумні вимикачі виробництва компанії Siemens (зовнішній вигляд)



Рис. 2.13. – Фіксований вакуумний автоматичний вимикач EASYPACTEXE 12/2500/25/210 виробництва Schneider Electric

Ще одним фактором вибору ПЧ є умови його експлуатації: приміщення, температура, режим роботи тощо.

По-перше, ПЧ має бути захищений згідно класифікації IP , стандартно настінні ПЧ мають ступінь захисту IP 00 - IP 54, шафного виконання - IP 21 - IP 55. Однак за вимогою замовника та умов експлуатації можливо знадобляться додаткові технічні рішення, задля збільшення захисту корпусу. Наприклад, встановлення захисних кожухів, фільтрів вищої фільтрації та абсорбуючих килимків.[39]

Позначення IP	Як розшифровується	Додаткове пояснення
IP0X	Відсутність захисту від торкання і частинок	Обладнання не має конструктивних елементів, що перешкоджають доступу до струмоведучих частин або проникненню предметів.
IP1X	Захист від великих об'єктів	Конструкція не дозволяє випадково доторкнутися рукою чи предметом крупного розміру (діаметром приблизно понад 5 см).
IP2X	Захист від середніх	Елементи корпусу запобігають проникненню об'єктів приблизно

	предметів	товщиною понад 12 мм, що захищає від випадкового контакту пальцем.
IP3X	Захист від дрібних предметів	Через корпус не можуть пройти предмети товщиною понад 2,5 мм, що зменшує ризик потрапляння інструментів чи дрібних деталей.
IP4X	Захист від дуже дрібних сторонніх тіл	В отвори пристрою не може проникнути предмет товщиною понад 1 мм.
IP5X	Частковий захист від пилу	Пил може частково потрапляти всередину, але його кількість недостатня, щоб вплинути на нормальну роботу обладнання.
IP6X	Повний захист від пилу	Пил не може потрапити всередину.

Таблиця 2.6. – Пояснення значення першої цифри захисту IP

Позначення IP	Як розшифровується	Додаткове пояснення
IPX0	Відсутність захисту від вологи	Корпус не має конструктивних рішень для захисту від води.
IPX1	Захист від вертикальних крапель	Обладнання витримує випадання крапель зверху без ушкоджень.
IPX2	Захист від крапель під кутом до 15°	Каплі води, що падають під малим нахилом, не порушують роботу.
IPX3	Стійкість до обприскування під кутом до 60°	Вода, що потрапляє збоку під невеликим кутом, не становить небезпеки.
IPX4	Захист від бризок з	Корпус розрахований на випадкове

	будь-якого напрямку	обприскування або короточасні бризки.
IPX5	Стійкість до малопотужних водяних струменів	Прилад не пошкоджується від подачі води під помірним тиском.
IPX6	Стійкість до інтенсивних струменів	Обладнання витримує потужний направлений потік води.
IPX7	Короточасне занурення у воду	Пристрій не виходить з ладу після нетривалого перебування під водою на невеликій глибині.
IPX8	Довготривале або глибоке занурення	Корпус дозволяє експлуатацію під водою на значній глибині за умов, визначених виробником.
IPX9	Захист від високотемпературних струменів під тиском	Розширення ступеню захисту за німецьким стандартом DIN 40050-9

Таблиця 2.7. – Пояснення значення другої цифри захисту IP

Слід також врахувати, що установка ПЧ має обслуговуватися персоналом в рівних проміжках часу, залежно від умов експлуатації цей проміжок може коливатися від 1 тижня до 1 місяця, інколи навіть пару днів, адже необхідно його очищати, перевіряти і т. д.

По-друге, кожен ПЧ повинен ефективно охолоджуватися. Хоч його коефіцієнт корисної дії (ККД) і доходить до 99 %, однак він все ще має суттєве тепловиділення, тому, наприклад, ПЧ на 220кВт нормального режиму повинен отримувати охолодження в розмірі 1300 м³ повітря щогодини. Це значення варіюється в залежності від кількості ПЧ, їх установки між собою, та особливо від температури навколишнього середовища, тобто, чим вище температура, тим більше повітря необхідно. Виходячи з цього необхідно правильно підібрати

систему клімат-контролю для перетворювачів частоти, а саме блок вентиляторно-фільтруючий та фільтруючий. Їх кількість може змінюватися, тобто якщо наприклад необхідно 1200 м³, то встановлюємо вентиляторно-фільтруючі блоки 2 штуки по 625 м³ отримуючи невеликий запас та два фільтруючі блоки відповідних габаритів.



Рис. 2.14. – Зібрана модель шафи RITTAL ШВГ: 1200x2000x600 мм з фільтруючими «fan-and-filter» та «outlet filter» блоками та цоколем

Далі вибір шафи для ПЧ. Усі габарити є у вільному доступі та вказані в паспортних даних чи на сайті виробника ПЧ. Логіка вибору шафи досить проста: необхідно місце під встановлення самого ПЧ, силового автомату тощо. Всі ланцюги керування не повинні знаходитися разом з ним, адже для деяких з них треба своє власне охолодження, наприклад блоки живлення, тоді необхідно вже встановлювати клімат-контроль виходячи з тепловиділення усієї шафи. Зручніше винести керування на окрему меншу шафу і за необхідності поставити на неї власний клімат-контроль. Далі необхідно вивести систему людино-машинного інтерфейсу, тобто кнопки, панелі керування тощо. І для шафного виконання і для власної збірки на шафу виводять виносний інтерфейс ПЧ або панель типу НМІ або обидва разом. НМІ-панель підключається напряму або через контролер ПЛК.

При зборці схеми керування ПЧ слід уникати помилок типу підключення частотного перетворювача через або після контактора та розведення фази на

керування , сигналізацію, клімат-контроль тощо. ПЧ має бути постійно увімкнутим, а команда пуск подається безпосередньо на один з його входів. В режимі очікування він споживає енергію лише для підтримання стану та очікування сигналу пуск. Контактори використовуються лише у випадку, коли необхідно провести відключення кола для проведення технічного обслуговування, але це вкрай не популярне технічне рішення.

Слід також врахувати, що аналогові виходи ПЧ по випуску можуть бути налаштовані на сигналізацію аварії і при першій роботі викликати невеликий конфуз. Нормально розімкнутий і нормально замкнутий контакт у вимкненому стані сигналізують про аварію ПЧ. Після його увімкнення та перевірки себе на помилки чи несправності, він перемикає цей контакт (перекидний). Тому сигнал аварія буде у випадку коли ПЧ вимкнутий або коли він увімкнутий і сам перемкне контакти по наявності несправності всередині себе. Однак така особливість поки що спостерігалася лише в ПЧ Schneider Electric, підключення ПЧ компанії ABB буде розглядатися далі.

Більшість нюансів описана в інструкції користувача та ПЧ і може бути вивчена при детальному та уважному прочитанні останніх. Або ж при проведенні експерименту (та сама лабораторна робота) , для визначення принципу роботи апарату, за умови правильного його увімкнення для схеми досліду.

Отже, розглянувши детально усі можливі нюанси, перейдемо безпосередньо до вибору обладнання.

Тобто, вибір ПЧ зумовлює цілу низку різних додаткових приладів. Схема повинна мати наступну структуру:

1. Ввідна клема або шина – на неї приходить кабель з розподільчого пристрою на постачання системи.
2. Ввідний автоматичний вимикач – для захисту по загальному входу. Також можуть бути і секційні перемикачі.

3. Розподільча клема або шина – розгалудження силового кола та кола керування, розведення обох.
4. Автоматичні вимикачі для селективності захисту - розподіл на автоматичні вимикачі для захисту окремо кожного силового агрегата та кіл керування.
5. Основні пристрої – ними виступають ПЧ, контактори, реле, світлосигнальна апаратура, панель керування, різноманітна пускорегулююча апаратура, автомати захисту двигуна тощо.
6. Розподільча клема або шина – з неї йде підключення безпосередньо на двигун.

Для виготовлення каркасу установки був наданий один зі старих лабораторних стендів, як показано на рис 2.15. Як видно, тут є деякі компоненти типу амперметра, вольтметра, тахометра і тд, однак жоден з них, нажаль, для даної розробки не підходить, тому вони будуть усі вийматися, а монтажна панель замінятися.

Ідея полягає в тому, щоб на передній панелі були розміщені перетворювачі частоти, керування та вимірювання, а на верхній пластині – ввідне живлення та автоматичні вимикачі.



Рис.2.15. – Зовнішній вигляд каркаса стенда

Ввідний автоматичний вимикач представляє собою чотириполюсний автоматичний вимикач DEKO MBC-6 C25 див рис. 2.16. Його ампераж підбирається з логіки, що робота обох ПЧ одночасно за номінального навантаження буде складати близько 6-7 А, навантаження ланцюгів керування до 1А, тому автоматичний вимикач слід взяти на 8А. Однак обраний вимикач має номінал струму в 25 А для подальшої можливості підключення більш потужнішого навантаження.



Рис. 2.16. – Зовнішній вигляд головного автоматичного вимикача DEKO MBC-6 C25

Контактор в основному ланцюзі живлення вставлений як додатковий захист та індикація про роботу стенду та подану напругу. В реальному використанні контактори встановлюються перед перетворювачами частот лише як захисний елемент, наприклад, щоб провести технічне обслуговування агрегату, без можливості його включення. В наступних пунктах про проектування схеми більш детально надана його роль та підключення для даного стенду.



Рис. 2.17. – Зовнішній вигляд контактора ХМС 18А 220/380 В

Цифровий мультиметр або аналізатор мережі для зняття показників при досліджах повинен бути універсальним, тобто він повинен вміти вимірювати: активну, повну, реактивну потужності, струм та напругу, споживану потужність, гармоніки, коефіцієнт навантаження мережі тощо. Однак для додаткових вимірювань необхідно мати осцилограф, мікрофон, тахометр тощо.

Під дане завдання обрано наступний аналізатор мережі: TPM-01ESH (див. рис. 2.18)

Його функції згідно паспорту:

- Вимір напруги, струму і частоти в реальному часу на кожній фазі;
- Розрахунок та виведення активної, реактивної та повної потужності для кожної фази та в цілому;
- Облік активної та реактивної енергії;
- Вимірювання і відображення $\cos \varphi$ (коефіцієнт потужності);
- Аналіз гармоніки струму та напруги — до 31-ї гармоніки;
- Відображення мінімальних / максимальних / середніх значень напруги, струму, потужності — для моніторингу якості мережі;
- Наявність релейних контактів для реалізації функцій сигналізації або захисту;
- Комунікація по інтерфейсу RS-485 з протоколом Modbus RTU;

- Журнал реєстрації подій та змін параметрів.



Рис. 2.18. – Зовнішній вигляд аналізатор мережі TPM-01ESH

2.5. Вибір обладнання оперативної (керування) частини кола

До оперативної частини кола керування відносяться лампи світлової індикації, кнопки керування (включаючи аварійний СТОП), проміжні реле, додаткові контакти і тому подібне.

Основне обладнання кола керування в стенді:

- Потенціометр 10 кОм;
- Лампа сигнальна зелена 230 В;
- Лампа сигнальна зелена 24В;
- Лампа сигнальна червона 230 В;
- Лампа сигнальна жовта 24 В;
- Лампа сигнальна зелена 220 В;
- Кнопки червоні типу «грибок»;
- Кнопки зелені з самопідхватом;
- Перемикачі з двома положеннями;



Рис.2.19. – Вигляд кнопки «грибок» із фіксацією для аварійних зупинок



Рис. 2.20. – Зовнішній вигляд сигнальних ламп 220 В (зелений, жовтий та синій кольори)



Рис. 2.21 (зліва на право а та б). – Зовнішній вигляд перемикачів на два положення



Рис. 2.22. – Зовнішній вигляд світлосигнальних ламп 24 В



Рис. 2.23. – Зовнішній вигляд кнопки з самопідхватом (зелена)



Рис. 2.24. – Зовнішній вигляд потенціометра LA42DWQ-22

2.6. Вибір апаратури захисту

На вході системи встановлюється ввідний автоматичний вимикач. Як вказувалося раніше, для більш потужних ПЧ застосовують автоматичні вимикачі в литому корпусі, роз'єднувачі з плавкими запобіжниками або повітряні вимикачі.

Згідно інструкції до частотних перетворювачів компанії ABB, головний пристрій відключення живлення має задовольняти діючі місцеві вимоги техніки безпеки. Для Європейського Союзу нормативним документом, що регулює правильний вибір обладнання є EN 60204-1 «Безпечність машин», за яким:[20]

- вимикач-роз'єднувач – категорія використання AC-23В (EN 60947-3);
- роз'єднувач із додатковим контактом, який у будь-яких умовах забезпечує спрацювання вимикачів для розмикання навантажувальних ланцюгів до розмикання головних контактів роз'єднувача (EN 60947-3);
- автоматичний вимикач, що забезпечує роз'єднання згідно вимогам EN 60947-2.

Для аналогічного продукту компанії SCHNEIDER ELECTRIC встановлюються запобіжники або автомати захисту двигуна.[28]

В даному випадку головним ввідним автоматом буде виступати чотириполюсний модульний автоматичний вимикач на DIN рейку з характеристикою C 25 А (рис.2.16), а для кожного перетворювача частоти триполюсні автоматичні вимикачі захисту двигуна з струмовим діапазоном 2.5 – 4 А.



Рис. 2.25. – Зовнішній вид автоматичного вимикача захисту двигуна GZ1E08 виробництва SCHNEIDER ELECTRIC

Автоматичний вимикач кола керування слід обирати також за номінальним сумарний амперажем навантаження. Однак це електричне коло низького струму, тому в даному випадку двополюсного 1 А вимикача буде достатньо.

Обраний модульний автоматичний вимикач ВА UTrust 2р 1А 3 6kA представлений на рис. 2.26.



Рис. 2.26. – Зовнішній вигляд автоматичного вимикача для кола керування

2.7. Вибір додаткового обладнання

Крім основних елементів, для їх підключення також необхідні : мідний провід, прохідні клеми, гільзові наконечники для обтискання дроту, маркування проводу тощо.

Провід повинен бути розрахований на номінальний струм системи і зручність підключення. Тому, для силового підключення стенду студентами буде використовуватися дріт ПВ-3 2.5 мм² розрахований на струм до 30 А. В середині шафи для економії місця можна використати дріт ПВ-3 1.5 мм² розрахований на струм до 23 А. Для підключення клем керування ПЧ використовується ПВ-3 0.75 мм²(рис. 2.27).



Рис. 2.27. – Набір кабелів 2.5, 1.5, та 0.75 мм²

Клеми підбираються під кабель, тип 2.5 для кабелів до 2.5 мм². Сюди також можна приписати інструмент до монтажу: викрутки, шуруповерти, набір

сверл, обтискні кліщі, стрипер тощо. Враховуються можливі додаткові витрати, які не були враховані (залежно від ситуації та проблеми під час монтажу).



Рис. 2.28. – Зовнішній вигляд клеми 2.5

2.8. Розрахунок гальмівного резистора

Частотний перетворювач серії ACS580 має функцію гальмівного модулю для типорозмірів R1, R2, R3. Він з'єднаний з проміжною частиною перетворювача частоти, де отримується постійна напруга та струм, тобто, між випрямлячем та інвертором.[29]

Його завдання - передавати частину надлишкової енергії проміжної ланки в гальмівний резистор. Тобто, створюється резистивне навантаження на стороні постійної напруги, щоб зменшити час гальмування двигуна при його зупинці.

Гальмівний модуль спрацьовує, коли напруга ланки постійного струму перевищує деяку максимальну встановлену межу. Підвищення напруги в нормальних умовах викликається уповільненням (гальмуванням) двигуна з великим моментом інерції. В інших випадках, переважно аварійних, ПЧ за допомогою свого внутрішнього захисту буде самоблокуватися та відключатися.

Розрахунок гальмівного резистора базується відповідно на потужності, що має розсіюватися, струмі та напрузі в колі постійної ланки ПЧ. До кожного ПЧ виробник обов'язково в інструкції з експлуатації задає принцип розрахунку та встановлення гальмівного резистора, як наприклад у компанії ABB. А в тій

самій компанії SCHNEIDER ELECTRIC пропонують й вже готові рішення гальмівного резистора.

Оскільки стенд, це два двигуни, які механічно зв'язані між собою, і для деяких дослідів гальмівний резистор безпосередньо буде виступати в ролі навантаження, необхідно провести обчислення, опираючись на дані факти.

За рекомендацією ABB маємо наступний алгоритм розрахунку:

- а) Визначити максимальну потужність гальмування P_{Rmax} , причому це значення має бути менше табличного P_{BRmax} . Згідно таблиці 2.8, що приведена нижче, максимальна потужність гальмування для ACS580-01-03A4-4:

$$P_{BRmax} = 0.9 \text{ кВт}$$

- б) Користуючись рівняннями 2.1 та 2.2 знаходимо розрахункове значення опору резистору
- с) За рівняннями 2.3 та 2.4 знаходимо енергію, що виділяється за імпульс гальмування, та потужність, що виділяється за один цикл.

Тип ACS580 -01-	R_{min}	R_{max}	P_{BRmax}	Рекомендовані типи резисторів
				Danotherm
	Ом	Ом	кВт	
3-фазн., $U_N = 400/480 \text{ В}$				
02A7-4	52	864	0,6	CBH 360 C T 406 210R
03A4-4	52	582	0,9	CBH 360 C T 406 210R
04A1-4	52	392	1,4	CBH 360 C T 406 210R
05A7-4	52	279	2,0	CBR-V 330 D T 406 78R UL
07A3-4	52	191	3,9	CBR-V 330 D T 406 78R UL
09A5-4	52	104	5,3	CBR-V 330 D T 406 78R UL
018A-1	52	75	7,3	CBR-V 560 D HT 406 39R UL
033A-4	16	37	15	CBT-H 560 D HT 406 19R UL
039A-4	13	20	20	CBT-H 760 D HT 406 16R UL
046A-4	10	25	25	CBT-H 760 D HT 406 16R UL

Таблиця 2.8. – Рекомендовані гальмівні резистори до кожного типу ПЧ серії ACS580[29]

Необхідні розрахункові значення:

R_{roz} – розрахункове значення резистора, Ом;

P_{Rmax} – максимальна потужність в циклі гальмування, Вт;

P_{Rave} – середня потужність в циклі гальмування, Вт;

E_{Rpulse} – енергія, що виділяється в гальмівному резисторі за один імпульс гальмування, Дж;

t_{on} – тривалість імпульса гальмування, с;

T – тривалість цикла гальмування, с.

При $U_N = 400$ В:

$$R_{roz} = \frac{450000}{P_{Rmax}} \quad (2.1)$$

При $U_N = 480$ В:

$$R_{roz} = \frac{615000}{P_{Rmax}} \quad (2.2)$$

Енергія, що виділяється та середня потужність в циклі гальмування:

$$E_{Rpulse} = P_{Rmax} \cdot t_{on} \quad (2.3)$$

$$P_{Rave} = P_{Rmax} \cdot \frac{t_{on}}{T} \quad (2.4)$$

За нормальних умов експлуатації гальмівний резистор використовується для гальмування системи після її відключення, тобто гасіння інерції. Тоді необхідна потужність, що має гальмуватися розраховується наступним чином.

Спочатку необхідно розрахувати енергію, яка має бути відведена за наступною формулою:

$$P_{Rmax} = \frac{1}{2} \cdot J_S \cdot \omega_S^2, \text{ де} \quad (2.5)$$

J_S – момент інерції для повної системи привода;

ω_S – швидкість системи на початку гальмування.

І далі, по заявленій методиці йде підрахунок необхідних параметрів гальмівного резистора, що має бути достатньої потужності, опору в межах табличного значення та здатним відвести вказану енергію за цикл гальмування.

Розрахуємо значення гальмівного резистора при максимально рекомендованій та номінальній потужності двигуна, що підключений до ПЧ. Оскільки рекомендоване значення потужності для гальмування 0.9 кВт, а напруга $U_N = 400$ В тоді маємо:

$$R_{roz1} = \frac{450000}{900} = 500 \text{ Ом}$$

$$R_{roz2} = \frac{450000}{750} = 600 \text{ Ом}$$

Цикл гальмування приймаємо в 10 та 20 секунд, цикл гальмування 60 секунд (1 хвилина), тоді для 500 Ом і 0.9 кВт:

$$E_{Rpulse1} = 900 \cdot 10 = 9000 \text{ Дж}$$

$$P_{Rave1} = 900 \cdot \frac{10}{60} = 150 \text{ Вт}$$

$$E_{Rpulse2} = 900 \cdot 20 = 18000 \text{ Дж}$$

$$P_{Rave2} = 900 \cdot \frac{20}{60} = 300 \text{ Вт}$$

Аналогічні розрахунки для 600 Ом і 0.75 кВт:

$$E_{Rpulse3} = 750 \cdot 10 = 7500 \text{ Дж}$$

$$P_{Rave3} = 750 \cdot \frac{10}{60} = 125 \text{ Вт}$$

$$E_{Rpulse4} = 750 \cdot 20 = 15000 \text{ Дж}$$

$$P_{Rave4} = 750 \cdot \frac{20}{60} = 250 \text{ Вт}$$

Отримані графіки:

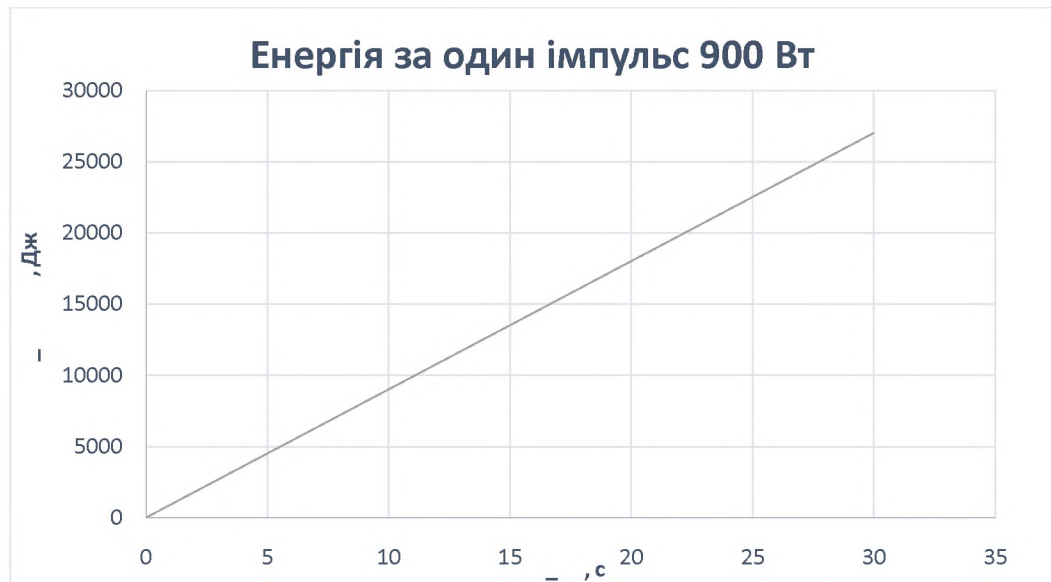


Рис. 2.30. - E_{Rpulse} – при різних значеннях часу тривалості імпульсу гальмування для 0.9 кВт

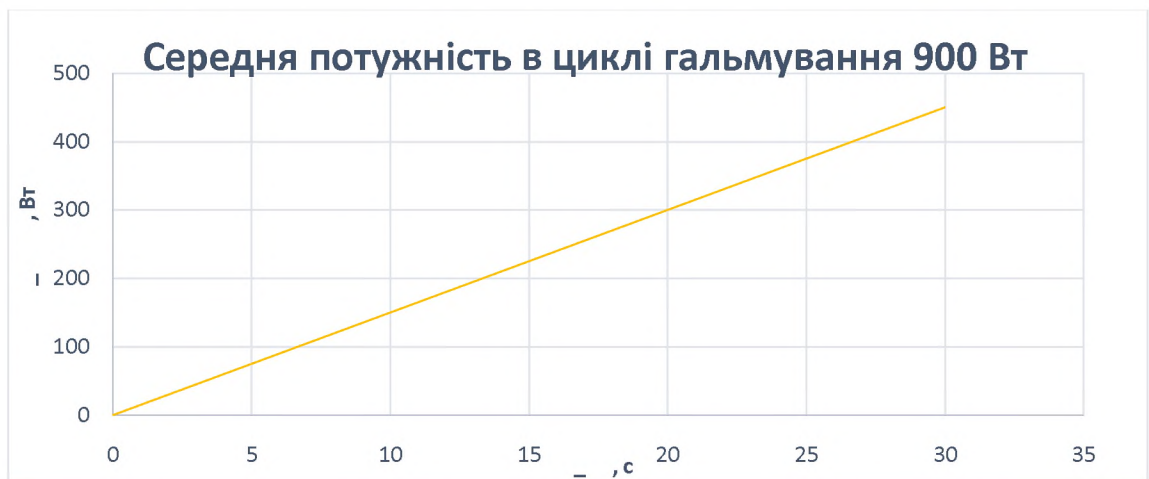


Рис. 2.31. - P_{Rave} – при різних значеннях часу тривалості імпульсу гальмування, тривалість циклу 60 с для 0.9 кВт



Рис. 2.32. - E_{Rpulse} – при різних значеннях часу тривалості імпульсу гальмування для 0.75 кВт



Рис. 2.33. - P_{Rave} – при різних значеннях часу тривалості імпульсу гальмування, тривалість циклу 60 с для 0.75 кВт

Однак треба розуміти, що отримані значення реальні для простого гальмування системи. Однак в даній дипломній роботі розглядається наступне рішення: більш простий ПЧ типу ACS180 генерує завдання для обертів першого двигуна; свою чергу перший двигун механічно зв'язаний з другим двигуном; другий двигун гальмується за допомогою резистора на ПЧ серії ACS580.

Ідеальним варіантом для такої системи є запропонований самою компанією ABB гальмівний резистор 200 Вт 210 Ом, СВН 360 СТ 406 210R (див. рис. 2.34). Його номінальне значення опору відповідає рекомендованим і здатний утримувати 0.7 кВт протягом 40 с, з подальшим охолодженням протягом 80 с. Цього часу достатньо, для зняття необхідних значень.



Рис. 2.34. – Модель гальмівного резистора СВН 360 СТ 406 210R

Для даного гальмівного резистора маємо:

$$E_{Rpulse4} = 700 \cdot 40 = 28000 \text{ Дж}$$

$$P_{Rave4} = 700 \cdot \frac{40}{120} = 233 \text{ Вт}$$

Таким чином, для нормального зняття показників достатньо буде тримати навантаження двигуна на рівні 93%, щоб за час 40 секунд була можливість зняти показники для дослідження.

2.9. Моніторинг, візуалізація та запис стану системи за допомогою SCADA системи

Для того, щоб реалізувати систему моніторингу та автоматичного запису історії подій для приводу, необхідні наступні елементи:

- HMI-панель;
- PLC – програмований логічний контролер;
- Додаткові елементи до PLC, типу шина з'єднання для декількох приводів, блоки розширення і тому подібне;
- RS-485 комутаційний кабель для підключення;
- Обраний тип SCADA системи;
- Блок живлення для HMI-панелі та PLC;

Захист у виді автоматичного вимикача на стороні 230 В для блока живлення, та запобіжників для PLC та HMI-панелі на стороні 24 В. Контролер може бути підключений і через живлення 230 В, в залежності від обраного типу.

Тобто, основна задача це підключення через PLC перетворювачі частоти та HMI- панелі. Після чого необхідно за допомогою будь-якої доступної SCADA-системи реалізувати керування приводом через панель оператора, а до PLC можна підключити додаткові датчики, наприклад тиску, рівня води, температури стану двигуна тощо.

Підключення реалізується за допомогою комунікаційного кабелю RS-485 або за допомогою інших доступним типів інтерфейсів (залежить від перетворювача частоти та пов'язаних елементів). Усі вони об'єднуються у вузлі PLC, який необхідно запрограмувати.

Розглядається приблизний вид такої системи через доступні авторові ресурси, а саме: HMI TP700 Control, CPU1215C DC/DC/DC та SCADA системи WinSS через TIA Portal, тобто розробки компанії SIEMENS. У ABB, так само і у SCHNEIDER ELECTRIC, представлені й власні розробки, як програмного забезпечення так і електроніки (AVEVA, ABB Ability™ 800xA, Modicon 200 тощо).



Рис. 2.35. – Зовнішній вигляд HMI TP700 Control та CPU1215C DC/DC/DC

Інтерфейс в панелі оператора, тобто HMI-панелі, виглядатиме наступним чином (див рис. 2.35): перший екран вибір мови, для зручності українська або англійська; другий екран – основний: для кожного приводу виводяться кнопки ПУСК та СТОП, з індикацією режимів роботи (увімкнено, вимкнено та аварія), можливість ручного регулювання швидкості обертання двигуна (в залежності від призначення, регулюється кількість вхідного повітря, рідини або ще чогось), зверху справа перехід до журналу подій. Крім того, додатково можна вивести на панель такі режими, як автоматичний та диспетчерський. В автоматичному режимі, при умові що до ПЧ або PLC підключені будь-які датчики, система орієнтуючись на значення з останнього буде автоматично підлаштовуватися (збільшувати або зменшувати оберти двигуна). В диспетчерському режимі система повинна керуватися віддалено через

диспетчера, хоча зазвичай диспетчер повинен втручатися в роботу системи й без додаткового переходу, паралельно з місцевим керуванням.

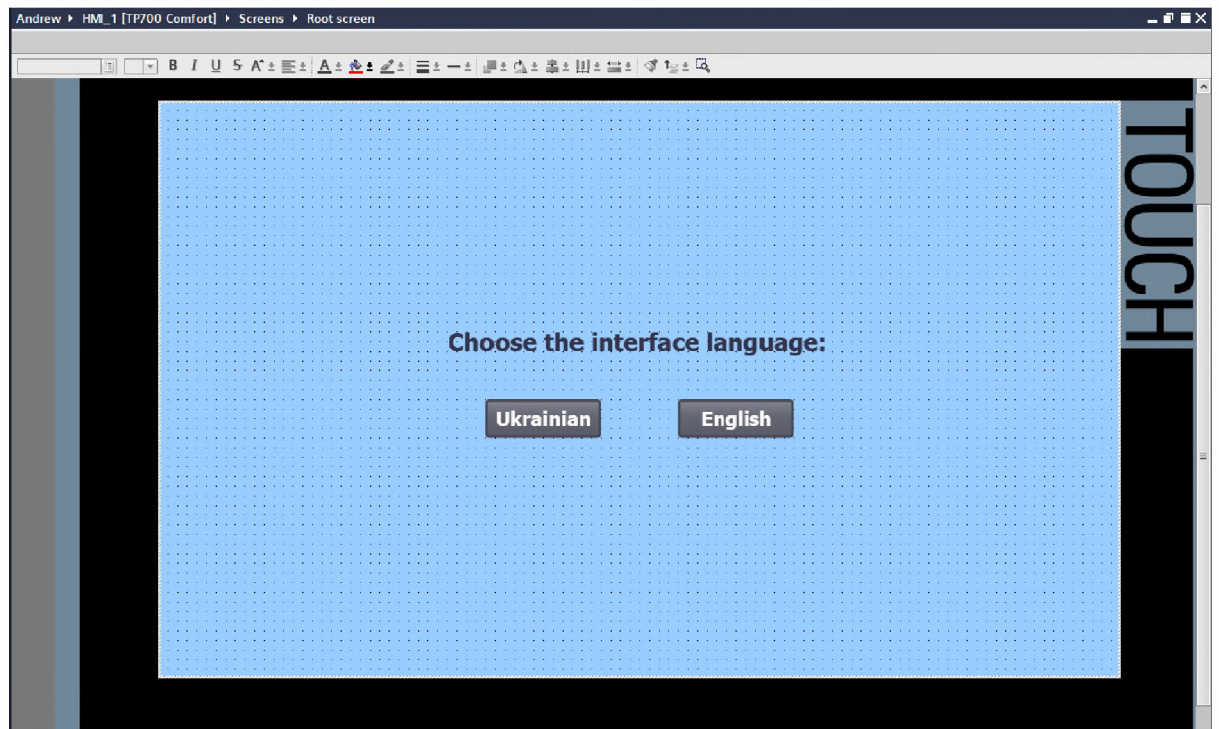


Рис. 2.36. – Вступний екран з вибором мови

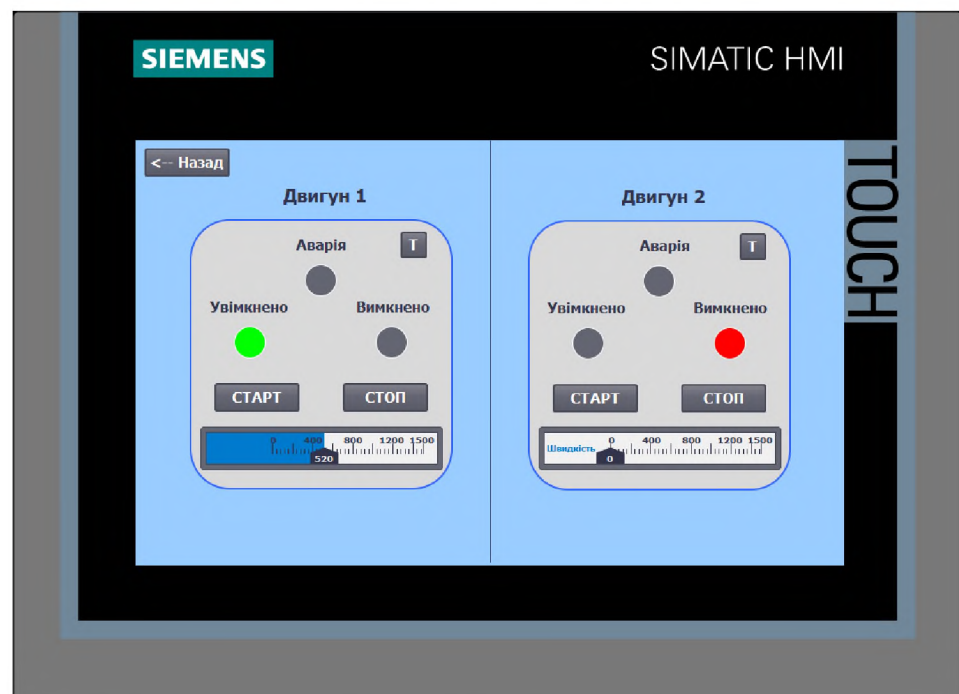


Рис. 2.37 – Приблизний вигляд панелі керування системою з двома ПЧ. Тут індикація стану двигунів, кнопки СТАРТ/СТОП, перевірка АВАРІЇ, та задання швидкості обертання

PLC також повинен містити в собі програму керування, щоб розуміти кому та які команди посилати, визначати у кого яка ситуація та записувати в журнал подій будь-які зміни. Загалом приблизний вигляд внутрішньої програми PLC такий:

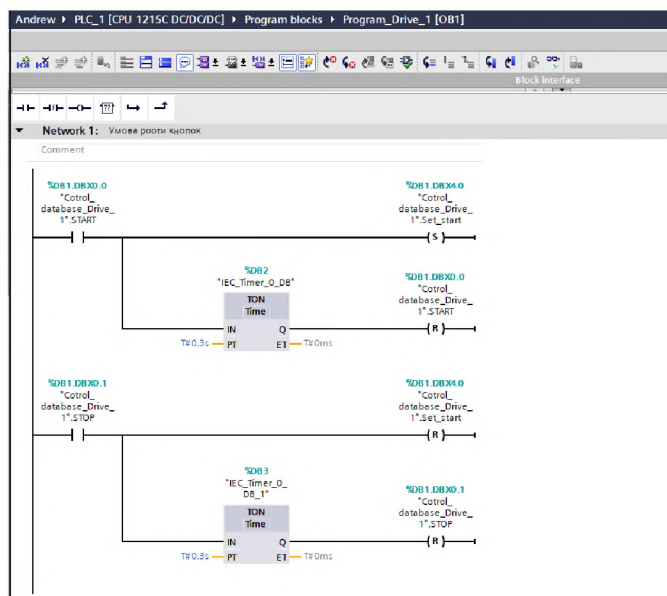


Рис. 2.38. – Частина програми керування для PLC (кнопки СТАРТ/СТОП)

Для налаштування ПЧ слід задати всередині нього деякі налаштовані параметри. Крім того, що сама схема повинна буде змінитися, адже в налаштуваннях ПЧ додатково треба обрати тип керування «Ручний/Modbus». Для ACS 580 серії це наступна таблиця кодів:

Параметр	Значення
58.01	Fieldbus protocol → Modbus RTU
58.02	Device address → 1...247
58.03	Baud rate → 9600 / 19200 / 38400
58.04	Parity → Even
12.02	Command source → Fieldbus
11.02	Speed reference source → Fieldbus
58.21...58.25	Вибір регістрів команди/стану
58.33	Enable fieldbus control → ON

Таблиця 2.9. – Необхідні параметри ПЧ для керування через НМІ панель

Для ACS 180 серії відповідно:

Параметр	Значення
95.01	Protocol = Modbus RTU
95.02	Slave address (1–247)
95.03	Baud rate
95.04	Parity
96.01	Command source = Fieldbus
96.02	Speed reference = Fieldbus
97.11...97.15	Mapping сигналів для HMI

Таблиця 2.10. – Необхідні параметри ПЧ для керування через HMI панель

Таке рішення може бути застосоване для подальшого розвитку ідеї даного стенду. В реальності ж керування через HMI-панель реалізовано не було.

Висновок до другого розділу

В даному розділі були розглянуті та описані можливі труднощі при створенні систем електропривода з перетворювачами частоти: вибір та підбір елементів, опис роботи з надпотужними системами, вказівки щодо SCADA-системи, розраховані параметри гальмівного резистора для ПЧ 580 серії, а також наведені моделі деяких елементів, для подальшого створення готової моделі шафи та схеми.

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ СХЕМИ, МОДЕЛІ ТА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА НАВЧАЛЬНИЙ СТЕНД

Слід уточнити, що для вибору елементів спочатку необхідно скласти схему, щоб краще розуміти нюанси. Однак більш досвідчені фахівці можуть набирати специфікацію на замовлення в обхід схеми. Тобто, вони чітко розуміють, що треба, в якій кількості і з яким запасом. Це все стає можливим з завершенням численних проектів або наявності таких в архівах (не виключається застосування будь-яких технічних рішень з інших проектів). Також, при наборі специфікації та виставленні рахунку вказується число неврахованих витрат, умовно ця сума складає приблизно до 3% від загальної розрахованої вартості. Це означає, що можливо при роботі треба буде докупати якісь складники, які були не враховані при складанні специфікації або в яких виникла потреба під час безпосередньому монтажу шафи в непередбачуваних обставинах.

3.1. Зображення основних елементів на схемах

Основні стандарти, що регламентують складання схеми:

- I. ДСТУ 2.701 «Схеми. Види і типи»,
- II. ДСТУ 2.702 «Правила виконання електричних схем»,
- III. ДСТУ 2.709 «Умовні графічні позначення в електричних схемах»,
- IV. ДСТУ 2.710 «Літерно-цифрове позначення елементів».

При складанні будь-якої схеми необхідно дотримуватися декількох основних правил:

- Чіткість та правильність схеми;
- Можливість її читання, без нагромодження елементів родин на одного;
- Кожен елемент має бути підписаний, як і клеми, з'єднання тощо;
- До схеми має бути приложена специфікація з відповідністю кожного елементу, їх коротким описом та примітками;

- Елементи повинні бити однорідними і побудованими на одній координатній сітці з фіксованим масштабом;
- Силові ланцюги та ланцюги керування мають бути окремо один від одного;
- Початок і кінець схеми зліва на право або зверху вниз;
- Всі контакти мають бути підписані кодом свого елемента, для зручності;
- Також для зручності може вводитися координатна сітка з наступними посиланнями на елементи та сторінки;
- Бажано також відокремлювати ланцюги керування, світлової індикації, силові і т. д., щоб забезпечити селективність спрацювання захисту.

Далі при проектуванні кожної частини усі критерії будуть розглянуті більш детально в окремих пунктах.

3.2. Силова частина схеми

На початку схеми встановлюється ввідний вимикач або роз'єднувач. У нашому випадку ним виступає чотирьополісний автоматичний вимикач DEKO MBC-6 C25. Він є першим рівнем захисту і відповідає за живлення всього стенду. Саме до нього підключаються ввідні і розподільчі шини/клеми.

Очевидно, що для потреб двох 1.1 кВт двигунів, шини не доцільні. Тут використовуємо обрані прохідні клемні колодки 2.5 мм². Отже, маємо спочатку вхідні клеми, на які приходить трифазна мережа 3Р+N+РЕ. Міжфазної ізоляції на кожену достатньо, щоб вони були поруч один з одним, для простоти монтажу. РЕ шина виноситься окремо від них для заземлюючого контуру.

Далі підключається відповідний ввідний автомат. У нього є своє маркування кожного підключення, щоб при зборі схеми та наступному монтажі було чітко видно, який кінець дроту куди підключати. Загалом ввідний апарат на схемі виглядає наступним чином:

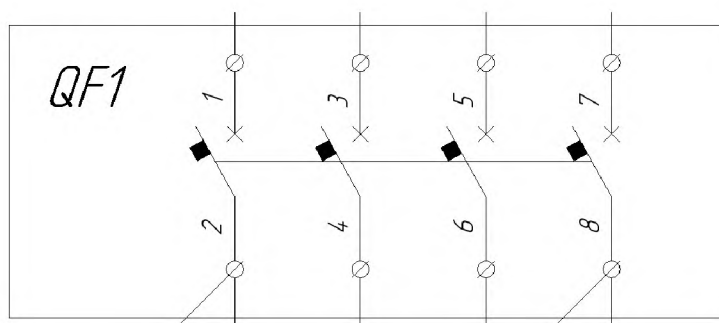


Рис. 3.39.– Ілюстрація ввідного автоматичного вимикача

Позначення рис 3.39 показує QF1, де QF автоматичний вимикач 4 полюсний з одночасним спрацюванням перемикання усіх контактів, вхід контакти 1,3,5 та 7, вихід – 2,4,6 та 8 відповідно і порядковим номером 1.

Тут слід зауважити одну особливість, що фазні ланцюги при маркуванні проводу мають бути непарні числа та цифри, а парними вказуються зазвичай виходи для нейтралі, однак опираючись на досвід усі кінчики проводів N позначають однаково, тобто N. [36], [37]

Після даної ланки схеми надана ідея встановити додатково контактор, для можливості ручного керування схемою без автоматичного вимикача. Таке рішення надає ще другий рівень захисту системи, тобто, на панель керування буде виведена кнопка з самопідхватом для запуску та зупинки стенду в звичайному режимі, кнопка аварійної зупинки всього стенду та світлова індикація поданої напруги на стенд. Контактор на схемі виглядає наступним чином:

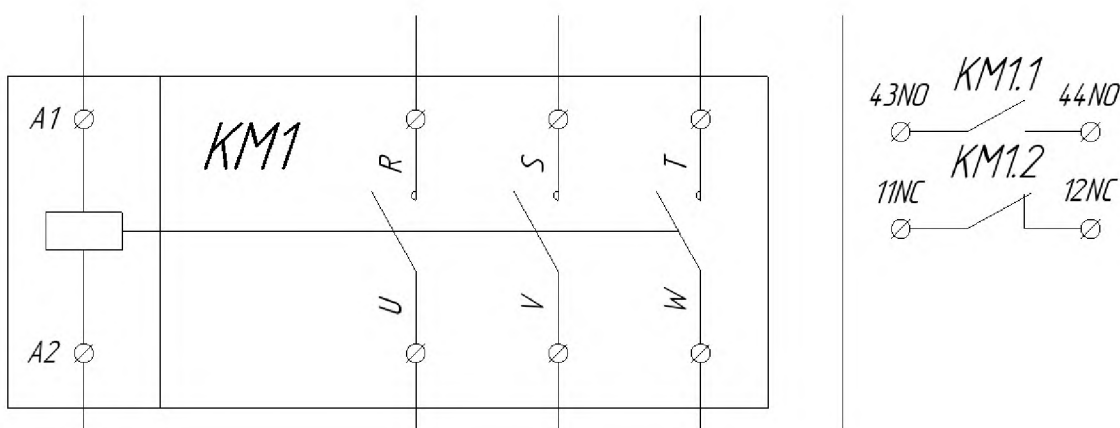


Рис. 3.40. – Ілюстрація контактора на силовій схемі стенду

Тут виведено котушку керування контактора КМ1 і знову ж таки, КМ – контактор позначення згідно ДСТУ, а 1 – його порядковий номер. Також вказані його позначення контактів: А1 та А2 – котушки керування, при подачі напруги на неї, контактор замикається; R/U, S/V, T/W – безпосередні силові контакти; а також 43NO/44NO та 11NC/12NC – додаткові контакти стану, які перемикаються при включенні/відключення контактора. Саме один з них задіяний далі в колі керування для лампи сигналу подачі напруги на стенд. Також в цілях безпеки, усі сигнали (самопідхвату, світлосигнальні тощо) необхідно підключати через них у відповідності до кола, до якого вони залежать.

Повністю ввідна частина силового кола, де сигнал на котушку керування буде розглянутий в частині про підключення ланцюгів керування та логіки роботи стенду:

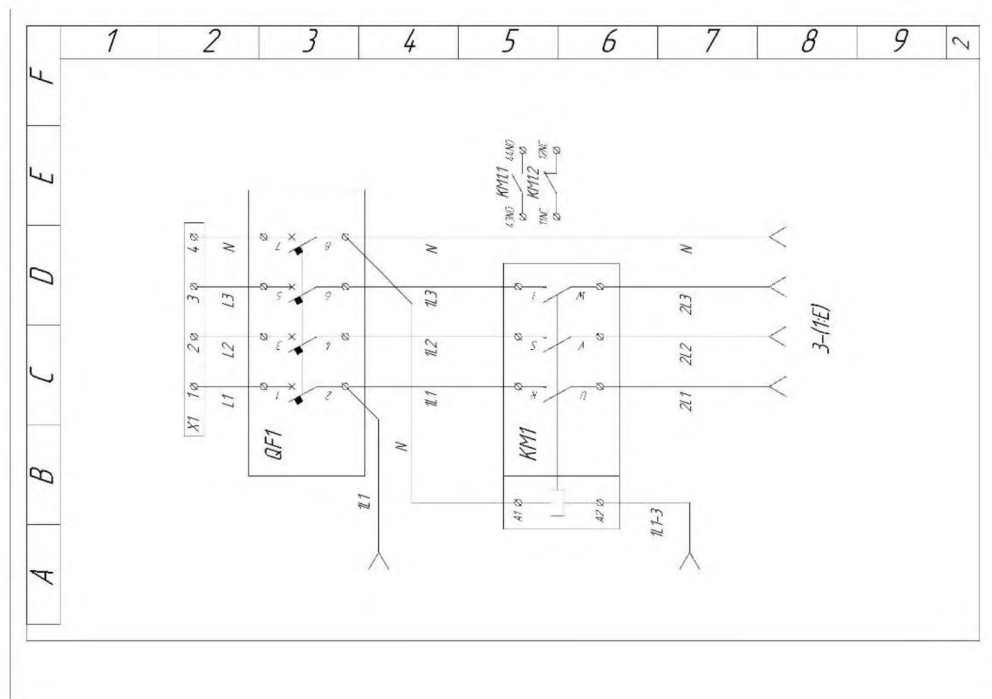


Рис. 3.41.– Ввідна частина силового кола

Тут слід зауважити елементи лінійки по краю аркушу та посилання на інші сторінки. Таким чином не треба схему нагромаджувати на одному листі, а по координатам досить легко перейти на необхідно сторінку та знайти продовження схеми. Напис на рис. 3.42 можна прочитати як аркуш 3 , координати по х та у – (1;Е). [36], [37]

3-(1;E)

Рис. 3.42.– позначення координат переходу до іншої частини схеми, де перша цифра це номер аркуша в проекті, цифра та буква в дужках позначають координати на відповідному листі.

Після проходження основної ввідної частини схеми, необхідно продублювати фази та N, тобто використовуємо декілька клем з перемичками. Загалом клеми кожної різнойменної фази повинні бути окремо одна від одної, щоб не викликати небажаного короткого замикання або іншого роду аварії. До того ж, такий монтаж спрощує обслуговування стенду для іншої людини. На схемі НОМЕР

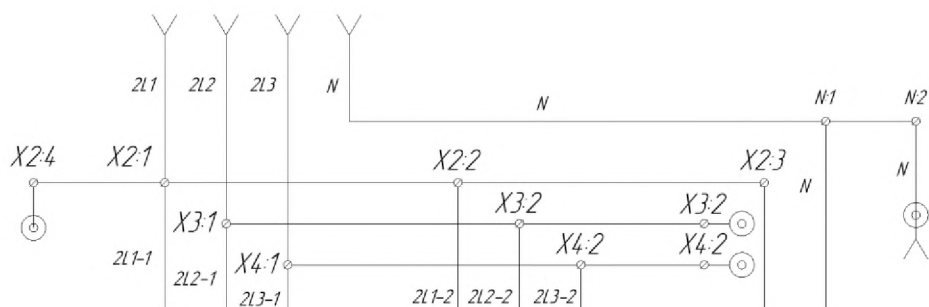


Рис. 3.43.– Позначення так званого «розмноження» фази та нейтралі

Як очевидно з рисунку 3.41 та 3.43 ввідна клема була позначена X1, тобто отримуємо: фаза A/L1 – X2, B/L2 – X3, C/L3 – X4. Число після двокрапки означає нумерацію самої клеми в збірці, тобто X1:2 – система клем X2, клема номер 2.[36], [37]

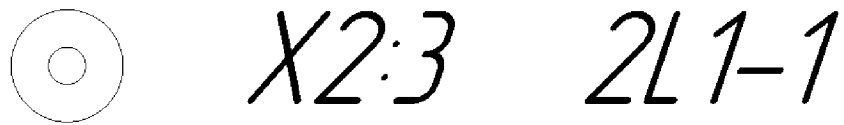


Рис. 3.44.— З права на ліво позначення: клема типу «банан», маркування клем, маркування дроту

Уточнення щодо маркування силової частини дроту. Ввідний кабель тут попередньо не вказується, позначки починаються з L1, L2 та L3 відповідно до кожної з фаз, причому таке позначення видозмінюється лише після проходження електричного апарату, тобто при, наприклад, встановленні проміжної клемі для виходу на двері, умовний провід з нумерацією L1 так і залишається.

Тут вже видна закономірність, що після проходження електричного апарату того ж самого ввідного автоматичного вимикача, L1 змінюється на 1L1 тощо. Однак, наприклад, при розподіленні фаз далі на ПЧ видно, що позначення вказуються як 2L1-1 чи 2L3-2, а N так і залишається незмінним, таке позначення цифрою після тире показує на порядок відхідної лінії, що також спрощує монтаж та дозволяє швидко зрозуміти, до якого кола належить даний дріт чи кабель. Позначка нейтралі повинна залишатися незмінною, щоб заздалегідь запобігти можливим аваріям з боку обслуговуючого персоналу або студентів. Далі така особливість буде продемонстровано ще не один раз.

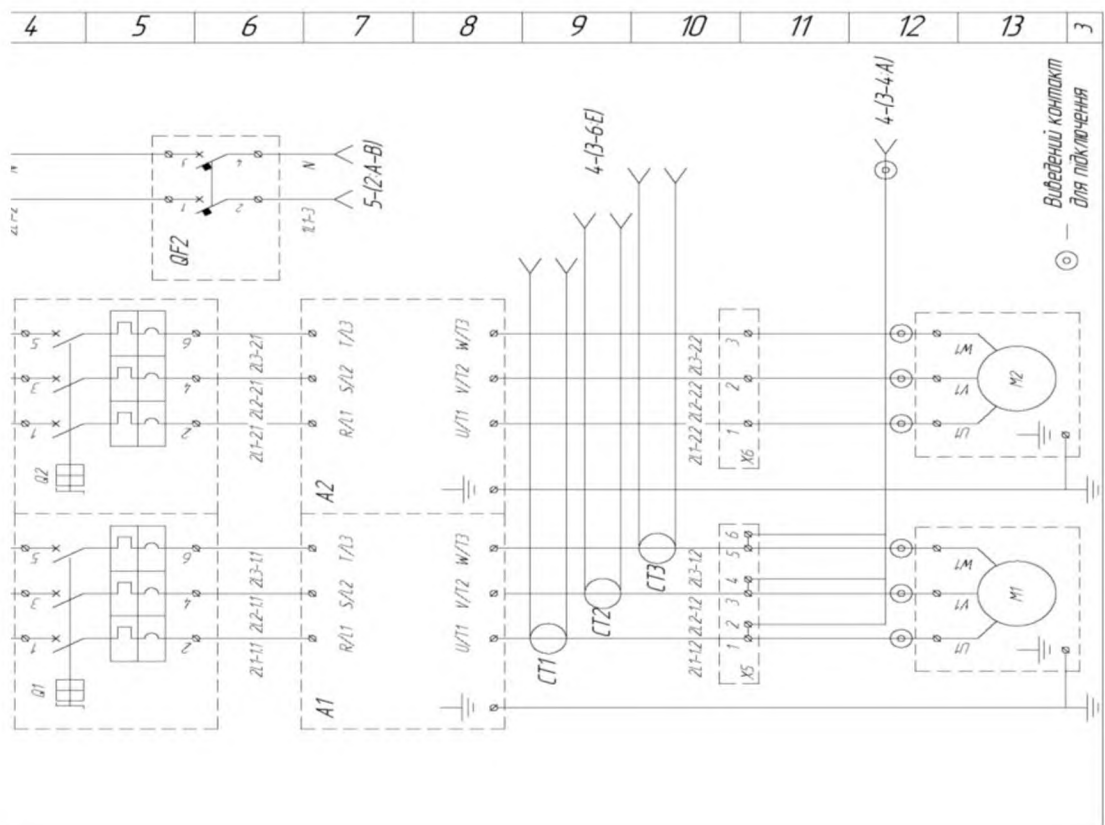


Рис. 3.45.– Друга частина підключення ПЧ до двигунів та ланцюгів керування

Тут Q1 та Q2 позначені автоматичні вимикачі захисту двигуна GZ1E08. Вони або плавкі запобіжники встановлюються перед перетворювачами частоти або двигуном при прямому пуску. Проте при прямому пуску двигуна необхідно замінити функції захисту ПЧ блоком універсального захисту двигуна.

QF2 – автоматичний вимикач UTrust 2p 1A 3 6kA призначений для захисту оперативних ланцюгів керування системи, а саме індикації, кнопок керування та вимірюючих приладів.

Оскільки даний автоматичний вимикач останній в схемі треба також обговорити й селективність захисту схеми, тобто при аварії на одному з

ланцюгів має вимкнутись саме він, а не вся схема. Селективність – один з найважливіших аспектів проектування, особливо в умовах виробництва. При аварії на одному з елементів має вимкнутися лише він і система, яка з ним зв'язана, а ніяк не повний цикл виробництва. Саме тому ввідний автоматичний вимикач має номінальний струм 6 А, що є максимально можливим струмом при роботі всіх приладів, а відхідні вимикачі мають забезпечувати чіткий ампераж кожен своєї лінії. Це означає, що правило «чим більше ампераж вимикача – тим краще» тут аж ніяк не працює! Якщо струм ПЧ 3.3 А, то автомат захисту двигуна має обертатися з вставкою у відповідних межах 3-4А, а не 15-20 А. Таке рішення призводить до некоректної роботи захисту і призводить до розвитку аварійних ситуацій.

Далі по черзі підключення трансформаторів струму для цифрового мультиметра або аналізатора мережі. У деяких випадках на передню панель виводять амперметри і вольтметри, тоді використовуються вимірювальні трансформатори струму або напруги. Для них передбачено спеціальні так звані кулачкові перемикачі для амперметра та вольтметра. Тут ще один нюанс, кулачковий перемикач для вольтметра **не підійде** для амперметра! Якщо вимірювальний трансформатор напруги спокійно може працювати в режимі холостого ходу, то при холостому ході вимірювальний трансформатор струму створює небезпечний потенціал, що обумовлено його будовою, тому неактивні обмотки останнього мають бути завжди закорочені або підключені до приладу.

A1 та A2 – позначені частотні перетворювачі версії ACS180 та ACS580. Тут все досить просто, сучасні ПЧ не потребують додаткового джерела і автоматично беруть живлення з ланки постійного струму всередині себе. Тобто необхідність буде тільки в правильному їх підключенні на клемі виводів оперативного ланцюга і заземленні.

Пакети клемних зажимів X5 та X6 створені для окремого виведення кабелю на навантаження, в даному випадку двох двигунів M1 та M2 які можуть бути механічно зв'язані.

Також через НО контактора КМ1 підключено індикацію лампи НЛВ1, тобто стан живлення. Тут ще раз показано, що маркування фази позначається непарними цифрами та числами.

Підключення мультиметра S-1 до його контактів живлення A1 та A2 також здійснюється через апарат захисту. В інструкції до експлуатації також пропонуються підключення й через запобіжники, тут по бажанню або на вимогу.

На контакти N, L1, L2, L3 паралельно приєднуємо клема перед двигуном, тобто це пари системи клем X5, тут же вони вказані для простоти прослідковування та монтажу.

Контакти k1-k3 та l1-l3 під'єднуються початки та кінці вимірювальний трансформаторів струму (див рис. 3.47).

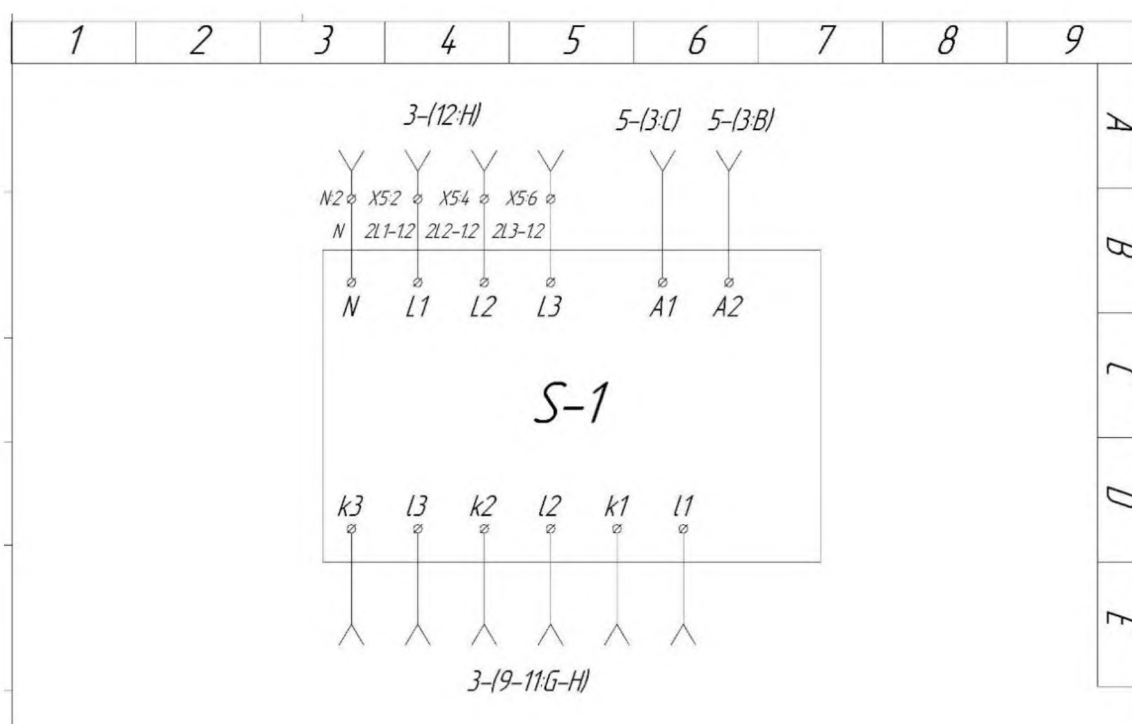


Рис. 3.47. - Підключення мультиметра

3.4. Підключення клем частотних перетворювачів

3.4.1. Підключення сигналів оперативних ланцюгів перетворювача частоти ACS180-04S-03A3-4

Дана модель ПЧ має дещо спрощену конфігурацію для підключення. В наявності лише два релейні виходи з загальним кінцем, тому індикація стану роботи буде виконана на 24В. Як уже обговорювалося раніше, кожен ПЧ має в собі вбудоване власне джерело живлення, однак його використання обмежено

лише на його власні потреби та сигналізацію. В даному стенді загальне керування, за виключенням ПЧ, реалізоване за допомогою змінної напруги за новим стандартом $230 \pm 10\% \text{ В}$, а силове – $0.4 \pm 10\% \text{ кВ}$. [18]

Для керування та сигналізації, згідно інструкції до частотного перетворювача ACS180-04S-03A3-4 буде задіяно наступні виходи: 24V та DGNG – плюс та загальний блока живлення, дискретні входи DI1 та DI2 – ПУСК/СТОП та реверс, DCOM – загальний цифрових входів, DO та DO COM – підключення індикації роботи, DO SRC - вихід додаткової напруги для цифрових входів, AI1/DI5, AGND та 10V – підключення потенціометра для регулювання частоти, S+, S1 та S2 – функція безпечного відключення крутного моменту(про неї в наступних пунктах) та індикація аварії – NC та COM. На схемі це виглядає наступним чином:

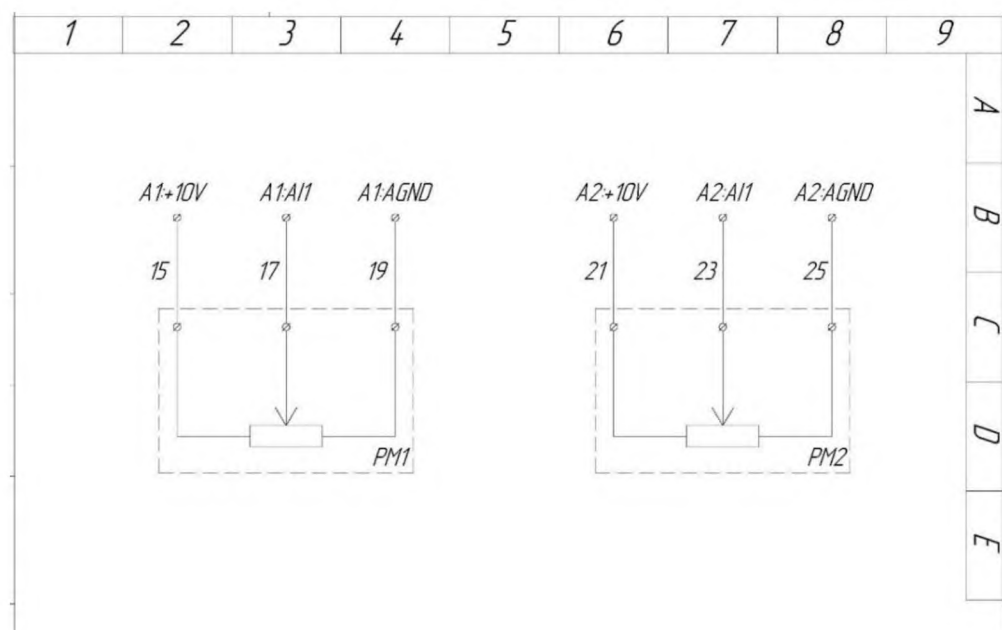


Рис. 3.48.– Підключення потенціометрів до аналогових входів/виходів ПЧ

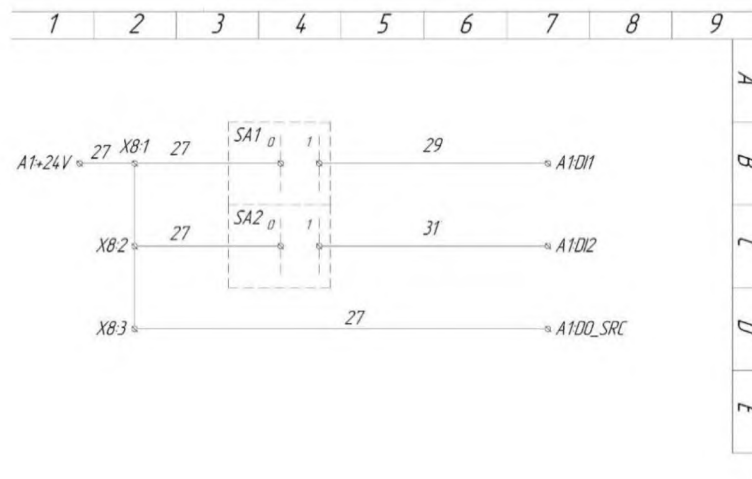


Рис. 3.49.– Підключення перемикачів ПУСК/СТОП, РЕВЕРС, та живлення додаткової напруги для цифрових входів

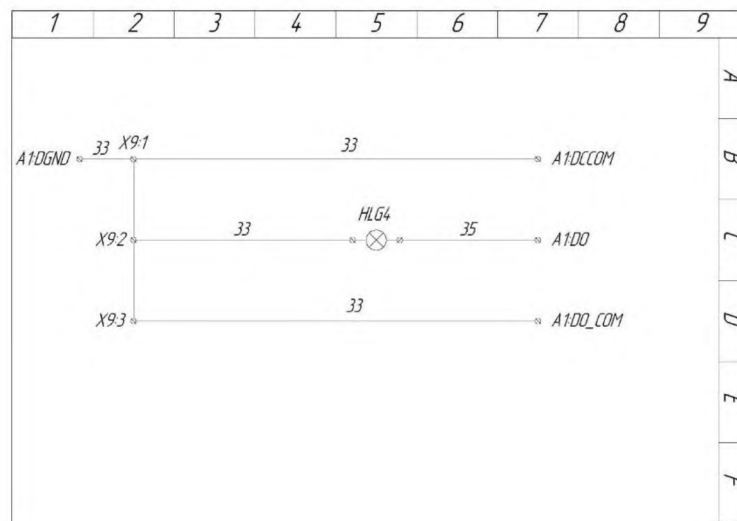


Рис 3.50.– Підключення загального виходу внутрішнього блока живлення до сигналізації і загальних цифрових виходів та входів

3.4.2. Підключення сигналів оперативних ланцюгів перетворювача частоти ACS580-01-03A3-4

Підключення другого перетворювача частоти майже ідентичне до першого, єдина різниця в тому, що 24В живлення підключається тільки до DI1, DI2 та двох загальних кінців релейних виходів відповідно R01C та R02C, які будуть показувати вимкнення приводу(готовність до роботи) та роботу, загальний вихід блока живлення через світлову індикацію на релейний вихід та на загальний для всіх цифрових входів DCOM.[16]

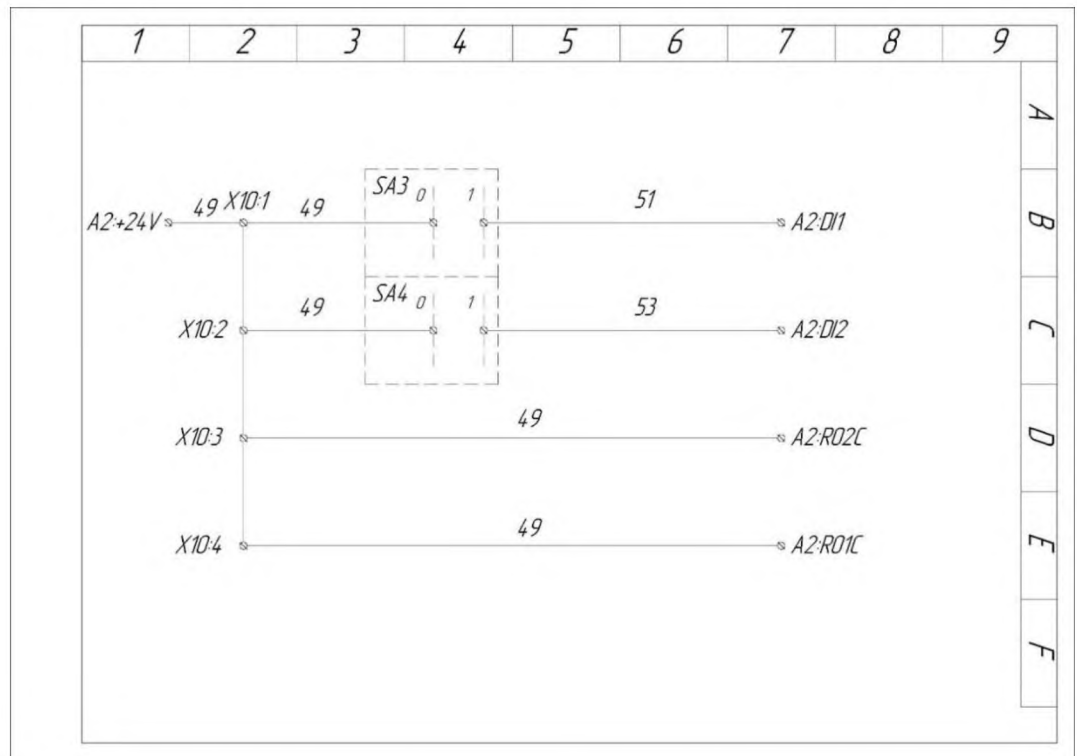


Рис. 3.51.– Підключення доріжки 24В на ПЧ ACS580-01-03A3-4

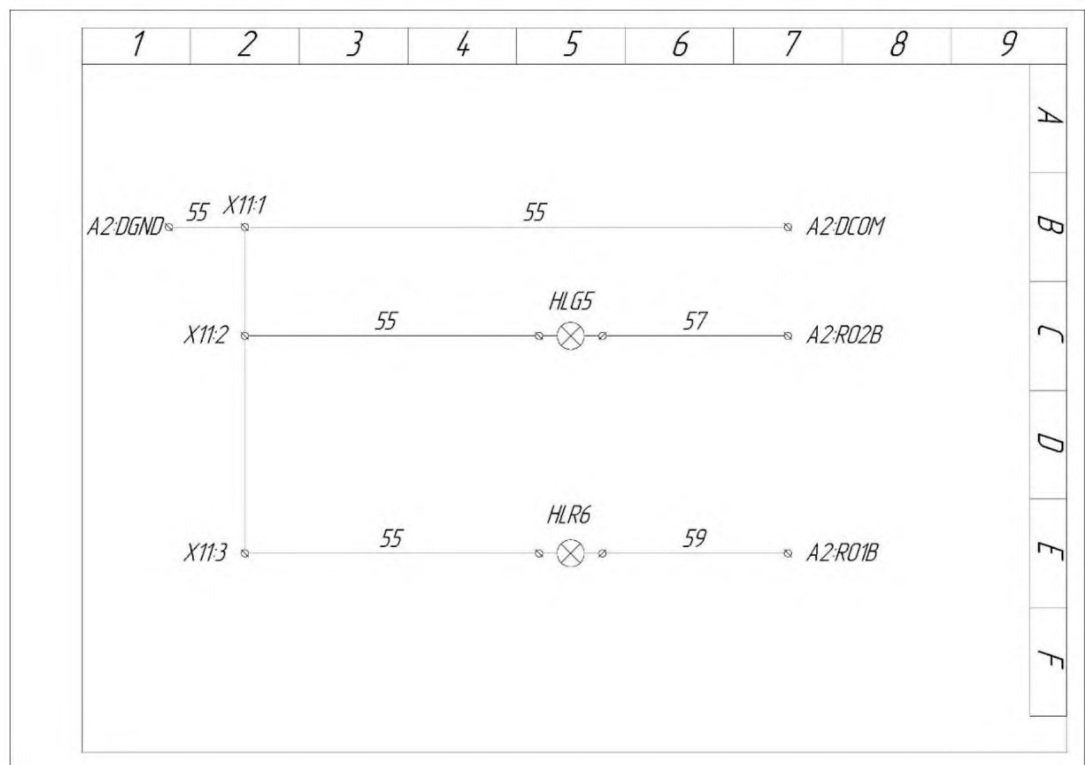


Рис. 3.52.– Підключення загального виходу джерела допоміжної напруги

Гальмівний резистор підключається до клеми поруч з силовими виводами R- та R+ (UDC+).

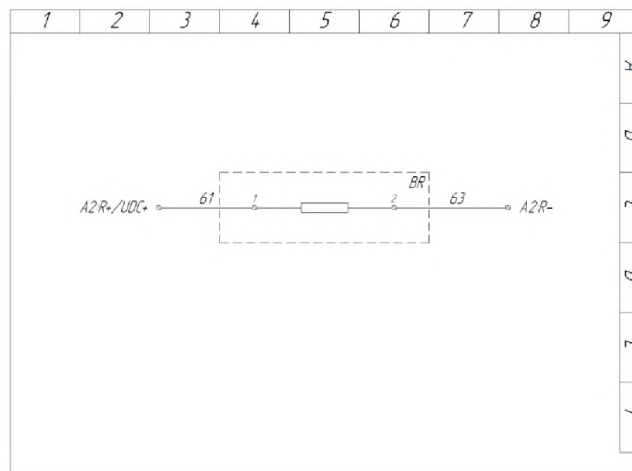


Рис. 3.53. – Схема підключення гальмівного резистора до перетворювача частоти ACS580-01-03A3-4

3.5. Створення 3-D моделі навчального стенду

Створення 3-D моделі є одним з найважливіших етапів при проектуванні будь-якої системи. Вона дає змогу оцінити, на скільки правильно та доцільно розміщувати той чи інший елемент в проекті. Також, під час створення моделі можуть бути знайдені будь-які критичні невдачі в розміщенні чи технічному рішенні. Це дає змогу на етапі проектування виправити дефекти і зменшити час на виправлення помилок при монтажі реального прототипу. Однак навіть 3-D модель не дає в повному обсязі оцінити ситуацію і при створенні макету можуть з'явитися деякі «нюанси».

Для зручності створення моделі, бажано спочатку створити 2-D вигляд стенду та приблизно уявити, що і де повинно знаходитися. Дане рішення може змінюватися не один раз, зважаючи на раціональність, естетичність та доступність розміщення кожного елементу. На рис. 3.54 та 3.55 наведено як приклад перші декілька варіантів розміщення елементів на монтажній плиті стенду. Причому слід зауважити, що при створенні навіть такої простої моделі, можна додумати та створити новий варіант розміщення елементів чи навіть переобладнати стенд.

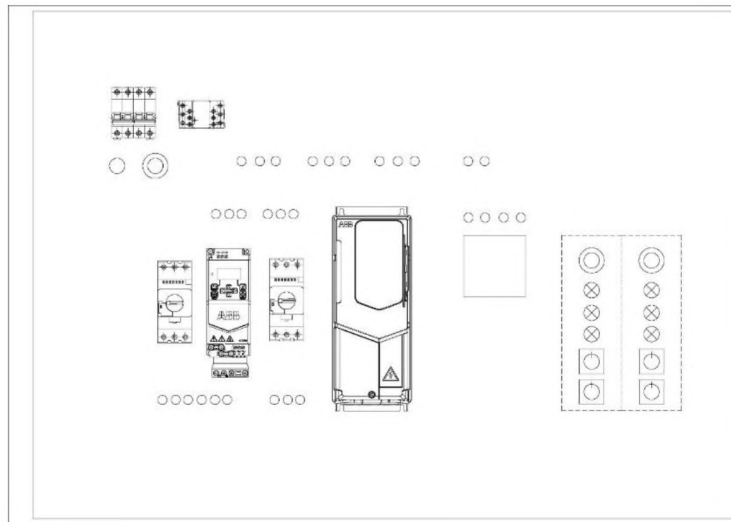


Рис. 3.54.–Варіант А стенду з двома перетворювачами частоти

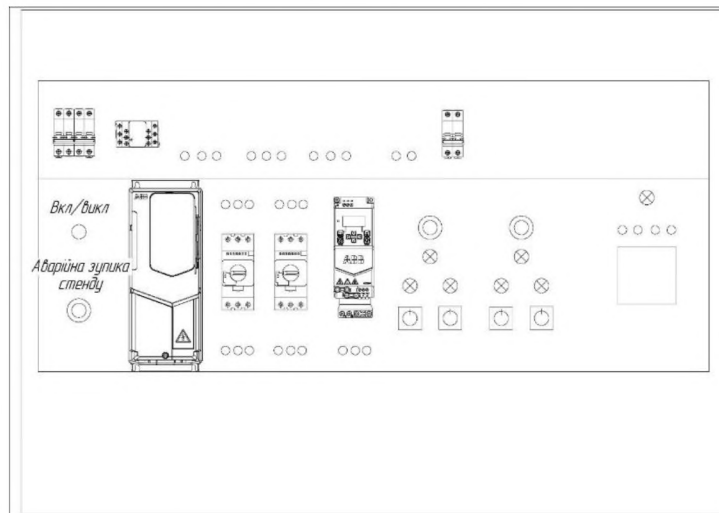


Рис. 3.55.– Варіант Б стенду з двома перетворювачами частоти

Фінальний варіант розміщення стенду після огляду, консультацій та приблизного розташування отриманих елементів зображено на рис 3.56:

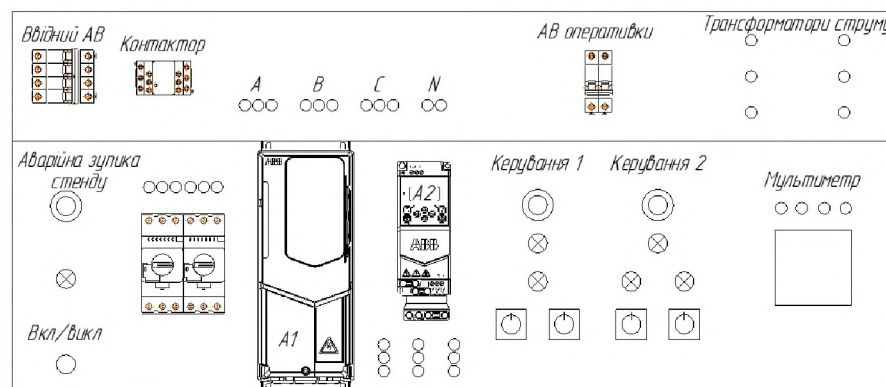


Рис. 3.56. – Фінальний план розміщення елементів для стенду

Опісля визначення з розташуванням основних компонентів схеми створюється в будь якій програмі по 3-D візуалізації модель стенду (це може бути і SOLID WORKS і AUTOCAD або будь-яка інша програма). Для цього викачуються готові моделі з сайту виробника приладів або створюються приблизні їх моделі та по чергово компонуються в одну збірку. Фінальний варіант моделі наведений на рис. 3.57:

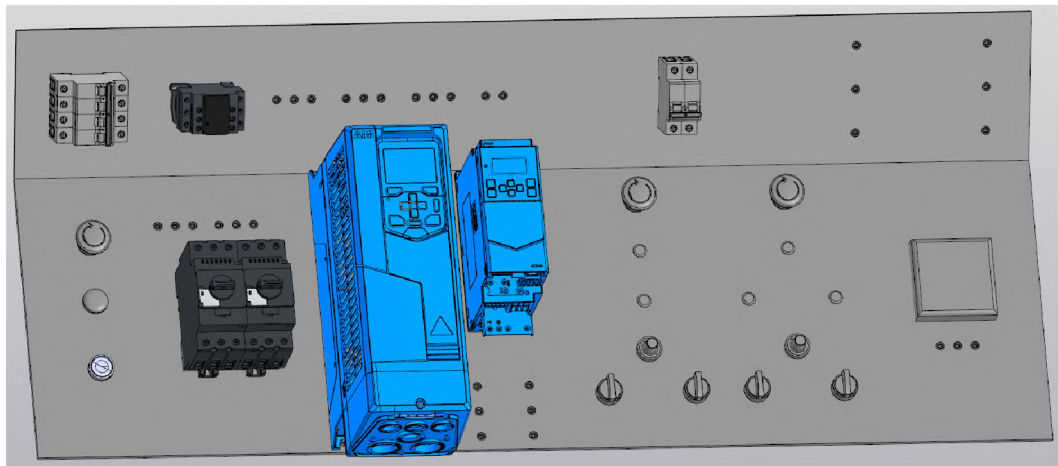


Рис. 3.57. – 3-D – модель лабораторного стенду

Надалі з даної моделі можна створити 2-D креслення для подальшого його підшивання до паспорту продукту.

3.6. Реалізація функції безпечного відключення крутного моменту STO

Дана функція безпечного відключення моменту наявна в будь-якому ПЧ і використовується як найвищий пріоритет аварії при відключенні приводу. Це означає, що розриваючи дане коло живлення, ПЧ вже не повернеться в нормальну роботу, поки не здійсниться перезапуск.

Для реалізації даної функції на клеммах перетворювача частоти є три або чотири підключення: живлення та контакт стану. Дана система працює наступним чином: в нормальному робочому режимі на обидва контакти стану присутній сигнал з клеми живлення, причому наявність сигналу дублюється за

допомогою S1 та S2 або I1 та I2 (STOA та STOB – маркування для перетворювачів частоти виробництва Schneider Electric) залежно від частотного перетворювача. Таким чином, втрата електричного зв'язку принаймні з одним із контактів переводить перетворювач частоти в повне блокування як його самого, так і силових напівпровідників, що створюють робочий момент для обертання двигуна. Залежно від типу та марки висвічується відповідна помилка на індикація перетворювача, яку практично неможливо усунути, лише перезапуском повністю системи, тобто зняттям напруги з силової частини схеми. Також, можлива опція програмування одного з входів ПЧ на його повне перезавантаження, після чого перетворювач частоти повернеться у стан очікування.[16],[18]

3.7. Процес збору стенду з нюансами монтажу

Перед тим як збирати шафу, необхідно також надрукувати маркування провідне, для елементів та позначення на самій шафі.

Як уже було сказано, за каркас стенду використовується один із старих непрацюючих стендів. З нього витягується все непотрібне та старе обладнання. Після чого замінюється монтажна плита. Вона буде виконана з паркету під розміри стенду. В шафах ж замовлених повсюди стоїть металева заземлена плита, тому слід враховувати даний факт, і по максимуму заземлити усі елементи. Вибір паркету обумовлений простішою роботою з останнім та складностями роботи з металом в сучасних умовах з частими перебоями світла та відсутністю інструментів.



Рис. 3.58. – Зовнішній вигляд монтажної плити

Після створення монтажної плити, на неї наносяться позначення під виріз для елементів, за заздалегідь створеним кресленням. Якщо ж в процесі монтажу, було прийняте рішення в зміні якогось елементу, то необхідно це відобразити й на кресленні, що далі буде використовуватися в паспорті продукту.

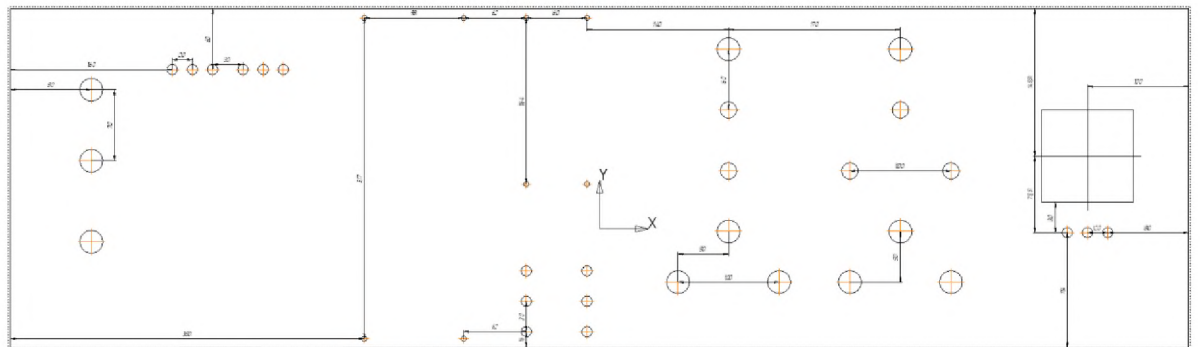


Рис. 3.59. – Розмітка отворів під елементи

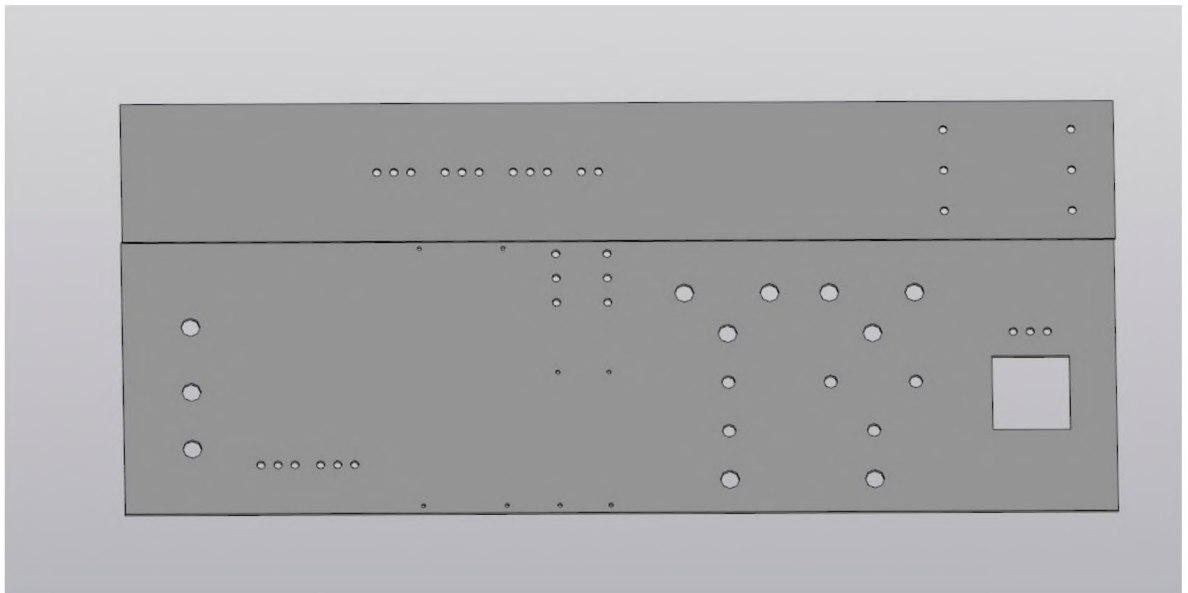


Рис. 3.60. – Готова монтажна плата

Далі найпростіший етап, це встановлення усіх елементів на свої місця, з обов'язковим позначенням кожного елемента зі зворотної сторони, тобто Х1, SB1, F1 і тд.

Після встановлення усі компоненти підключаються відповідно до схеми. Кожен провід зачищається, обжимається та маркується.

Після повної збірки стенду необхідно додатково перевірити усі з'єднання, переконатися що не виникне замикань і зробити пробний пуск. Якщо все підключено вірно, то мають запуститися ПЧ в режимі очікування, для подальшого налаштування, яке буде розглянуте в наступному розділі.



Рис. 3.61. – Вигляд стенду при першому пускі

3.8. Створення паспорту продукту та інструкції з експлуатації

Паспорт продукту – це документ, що містить в собі повну інформацію про виріб: виробник, технічні параметри, умови експлуатації тощо.

Інструкція з експлуатації – безпосередньо описує правила поводження з виробом, його функції, зовнішній вигляд та найменування тощо.

Крім того в повний перелік документів мають бути також прикріплені необхідні креслення, описи, додатки, сертифікація різного роду (випробування) і тому подібне.

3.8.1. Структура та склад паспорту продукту

Основні положення або структура паспорту продукту:

- Титульний аркуш;
- Зміст;
- Загальні відомості;
- Технічні характеристики;
- Комплект поставки;
- Транспортування та зберігання;
- Гарантія виробника;

- Відмітки про проведення робіт;
- Рекламації та свідоцтва (якщо є);
- Додатки.

На **«титульному листі»** вказується назва документу та виробу, місто та рік, коли і де був складений документ.

«Зміст» повинен бути чітким та відповідати реальності, для швидкого орієнтування в документі. Тут вказується перелік усіх пунктів з їх відповідними сторінками, включаючи додатки, сертифікати тощо.

В **«загальних відомостях»** вказують: назву виробу, замовника, дату випуску продукту, інформацію про виробника, короткий технічний опис продукту із зазначенням основних можливостей.

В пункті **«технічні характеристики»** перераховують основні параметри виробу: виробник, стандарт, напруга живлення/підключення, тип мережі, гранично допустимі значення відхилення основних показників (напруга, частота і тому подібне), габарити, потужність, основні характеристики головних елементів (їх також треба вказати), маса, додаткові пристрої тощо.

В **«комплект поставки»** заносять перелік елементів, який повинен отримати замовник. Тобто, коли до нього умовно прийде закрита коробка, що повинно там бути: сам стенд, його технічна документація, додаткові кріплення/елементи. Також вказується їх кількість.

«Транспортування та зберігання» вказує основні правила зі зберігання та транспортування упаковки/виробу, щоб при цьому залишити його в робочому стані та без пошкоджень. Також, тут можуть вказувати додаткові заходи з безпеки, наприклад якщо виріб крихкий або всередині знаходяться рідини тощо.

«Гарантія виробника» надається обов'язково і зазвичай надається на 6 – 12 місяців, з моменту купівлі обладнання.

У «**відмітках про проведення робіт**» заносять інформацію щодо будь-яких робіт з виробом: назву організації, яка робила, відповідальну особу, тип робіт та що саме змінювали/виправляли в стенді, додаткове поле для нотаток тощо. Також тут знаходяться пункти з електромонтажних робіт та пуско-налагоджуючих робіт (вказують зазвичай тільки їх).

«Рекламації» представляють собою таблицю з реєстрацією рекламацій щодо виробу, ПІБ відповідальної особи, куди/кому направлена створена рекламація тощо.

В останньому пункті «додатки» вказується додаткова інформація, тобто будь-які затверджені документи по виробу, сертифікати, вказівки, протоколи випробувань тощо.

3.8.2. Структура та склад інструкції з експлуатації

Основні положення або структура інструкції з експлуатації продукту:

- Титульний аркуш;
- Зміст (опціонально);
- Основні заходи з техніки безпеки при роботі з виробом;
- Принцип дії виробу;
- Схеми стенду (можна представити у вигляді додатку).

«**Титульний аркуш**», як і для паспорту, вказує назву документа та обладнання, до якого він складений, а також рік та місце де він складений.

«**Зміст**» зустрічається не завжди, але знову ж, для кращого орієнтування читача в документі, бажано його створити.

В «**Основних заходах з техніки безпеки при роботі з виробом**» вказують не тільки загальні положення при роботі з напругою для запобігання розвитку аварій, а й нюанси, що типові для конкретного виробу. В даному випадку виробу, до якого складений даний документ, що логічно.

Пункт «**принцип дії**» повинен описувати загальний вид шафи, назву на розміщення кнопок, індикації, силових елементів, налаштування при першому запуску виробу тощо. Далі вказують основні режими роботи, як їх включити, умови їх запуску та як вимкнути стенд, нюанси в роботі стенду, які можуть виникнути, за нормальної експлуатації та як їх уникнути/виправити.

В кінці необхідно додати відповідні креслення до шафи, для послідуоючої роботи з обслуговування виробу. Вони можуть представлені у вигляді окремого додатку або як наступні аркуші документу.

Висновок до третього розділу

Даний розділ дипломної роботи повністю описує практичну частину роботи на стендом, тобто: створення та позначення елементів на схемі, їх підключення, робота з мануалами перетворювачів тощо.

Також, була здійснена повна збірка стенду для подальшого проведення дослідів і створені паспорт та інструкція з експлуатації для отриманого виробу.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДИКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Налаштування перетворювачів частоти

Перед початком роботи будь-який перетворювач частоти необхідно налаштувати для роботи. Налаштування здійснюється за допомогою **«Посібника з мікропрограмного забезпечення ACS580, стандартна програма керування»** у випадку АВВ. Однак кожен виробник перетворювачів частоти надає збірник з переліком команд, які відповідають за тонке налаштування перетворювача. Основні параметри, які потрібно виставити для обраних перетворювачів частоти це:

- Виставлення параметрів двигуна
- Здійснення ідентифікації параметрів двигуна
- Програмування роботи через потенціометри
- Вибір регулювання

4.1.1. Налаштування ACS580-04S-03A3-4

Після подачі живлення на ПЧ, він очікує на перше налаштування. Спочатку вибір налаштування одиниць виміру: міжнародні або США, обираємо перший варіант.



Рис. 4.62. – Вибір одиниць виміру в налаштуваннях ПЧ

Далі вибір типу двигуна, в даному випадку обирається «AsynM» - асинхронний двигун. Також є пункт «PMSM» - двигун з постійними магнітами.

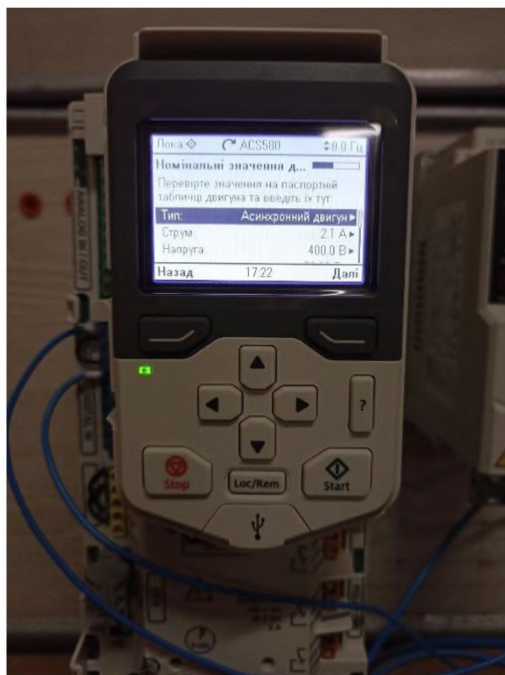


Рис. 4.63. – Налаштування двигуна, що підключається

Режим керування приводу: векторний або скалярний. Згідно інструкції, рекомендований режим векторний, а скалярний використовується лише якщо кількість двигунів може бути змінена, або номінальний струм привода відповідає 20% від номінального струму ПЧ. Залишаємо векторне керування, а в подальших дослідях просто зміниться режим для порівняння.

Далі були введені наступні паспортні параметри двигуна:

- Номінальна потужність – 0.75 кВт;
- Номінальний струм – А;
- Номінальна напруга – 400 В;
- Номінальна частота – 50 Гц;
- Номінальна швидкість – 1435 об/хв;
- Номінальний момент обертання – 5 Н·м;
- Номінальний $\cos \varphi$ – 0.65.

Номінальний момент обертання та коефіцієнт потужності йдуть як додаткові величини, тобто вказувати їх бажано, якщо вони є. В даному випадку $\cos \varphi$ вказаний в паспорті двигуна, а номінальний момент обертання можна знайти за наступною формулою:

$$M_N = \frac{60 \cdot P_N}{2 \cdot \pi \cdot n_N}, \text{ де} \quad (4.6)$$

M_N – номінальний момент обертання, Н·м;

P_N – номінальна потужність двигуна, Вт;

n_N – номінальна швидкість обертання двигуна в об/хв.

Для двигуна типу АИР 71В4 У2:

$$M_N = \frac{60 \cdot 750}{2 \cdot \pi \cdot 1390} = 5.15 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для двигуна типу LE3 A 80MB4:

$$M_N = \frac{60 \cdot 750}{2 \cdot \pi \cdot 1435} = 4.99 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тобто, значення практично однакові, тому і для першого ПЧ і для другого виставляється значення 5 Н·м.

Далі була здійснена перевірка правильності чергування фаз. При налаштуванні це можна змінити в самому перетворювачі, або в ручному режимі переключити кабель живлення. Правильне підключення виглядає наступним чином:

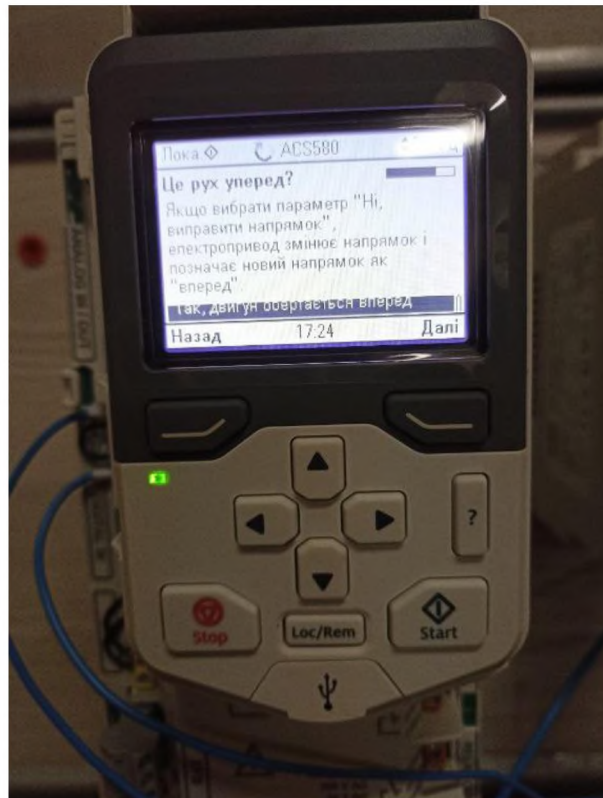


Рис. 4.64. – Виставлення параметра напрямку обертання двигуна

Наступним етапом було встановлення максимального значення частоти та швидкості обертання, щоб перетворювач зміг зробити плавний пуск системи. За умовчуванням стоїть 1435 об/хв та 50 Гц, тому параметри не змінюємо:



Рис. 4.65. – Параметри частоти та швидкості обертання двигуна

Макрос керування обрано «стандартний ABB», також є функція диспетчерського/ручного керування, керування за допомогою ПД, через шини Modbus, послідовного керування тощо.

4.1.2. Налаштування ACS180-01-03A3-4

Налаштування ACS180 налаштовується дещо складніше. Тут менше опису параметрів, як для версії з терміналом 580 серії і все розбито на коди, однак налаштування ідентичне.

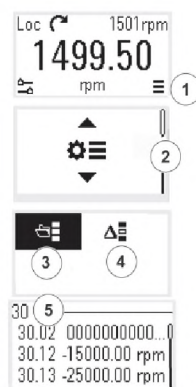


Рис. 4.66. – Налаштування параметрів двигуна в меню ПЧ ACS 180

Головне меню перетворювача налічує близько 11 і більше параметрів, в кожному з яких є свої підпункти.

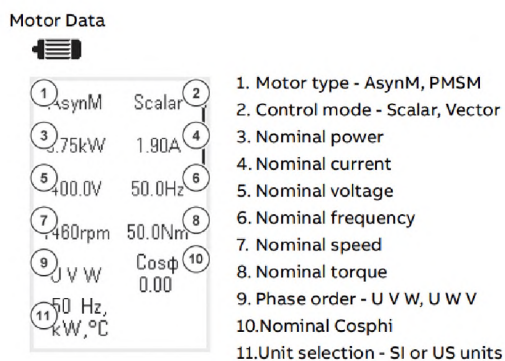


Рис. 4.67. – Меню налаштування двигуна

Меню керування дозволяє обрати налаштувати тип керування перетворювачем.

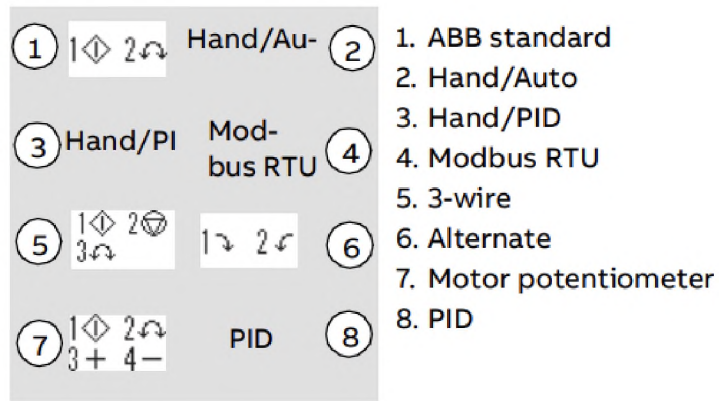


Рис. 4.68. – Налаштування типу керування перетворювачем частоти

Головний екран містить в собі основні параметри системи на даний момент, дозволи на запуск та додаткові налаштування, за необхідності. Крім того, тут є кнопки СТАР/СТОП, стрілки «ВВЕРХ-ВИНЗ-ВПРАВО-ВЛІВО», кнопка «ОК» та «НАЗАД».



Рис. 4.69. - Вигляд передньої панелі перетворювача частоти ACS 180

4.2. Експериментальне дослідження та порівняння роботи двох перетворювачів частоти.

На розробленому лабораторному стенді було проведено дослідження роботи двох перетворювачів частоти.

У межах дослідження виконано імітаційне порівняння двох перетворювачів частоти ABB ACS180 та ABB ACS580 під час роботи з одним і тим самим асинхронним двигуном потужністю 0,75 кВт.

Як основу використано математичну модель асинхронного двигуна в нерухомій двохкоординатній системі. Електрична частина описується потокозчепленнями статора і ротора та струмами, що забезпечує коректне відтворення електромагнітних перехідних процесів. Електромагнітний момент визначається на підставі взаємодії магнітного поля і струму, а механічна частина моделі включає інерцію та в'язке тертя, завдяки чому динаміка розгону і гальмування наближена до реальної. Для двигуна задано паспортні дані 400 В і 50 Гц, номінальна швидкість 1435 об/хв та номінальний момент близько 5 Н·м. Параметри електричної схеми заміщення та механічні параметри прийнято як характерні для двигуна класу 0,75 кВт, що дозволяє досліджувати загальні закономірності впливу алгоритмів керування без прив'язки до конкретної індивідуальної машини. Додатково враховано обмеження по максимально доступній фазній напрузі інвертора, що відповідає живленню від трифазної мережі 400 В.

Були отримані наступні дані.

Дані з перетворювача частоти ACS 180:

drive	f_Hz	wref_rpm	w_rpm	speed_err_rpm	Tl_Nm	Irms_A	Pout_W	PlossVFD_W	Pin_W	etaVFD_pct	Ein_Wh
"ACS180"	5	150	950.5	-800.5	2.99	5.72	782.36	35.66	818.03	95.64	0.69
"ACS180"	10	300	1195.1	-895.12	4.6	6.87	1181.8	36.03	1217.9	97.04	1
"ACS180"	15	450	1423.9	-973.87	6.16	7.69	1432.3	36.2	1468.5	97.54	1.19
"ACS180"	20	600	1579	-978.96	7.18	8.31	1633.5	36.31	1669.8	97.83	1.24
"ACS180"	25	750	271.4	478.6	0.18	3.8	0	38	38	0	0.03
"ACS180"	30	900	141.77	758.23	0.05	2.58	0	32.74	32.74	0	0.03
"ACS180"	40	1200	73.58	1126.4	0.01	1.91	0	27.87	27.87	0	0.02
"ACS180"	50	1500	39.25	1460.8	0	1.65	0	25.98	25.98	0	0.02

Таблиця 11. – Таблиця експериментальних значень для ACS 180

Дані з перетворювача частоти ACS 580:

drive	f_Hz	wref_rpm	w_rpm	speed_err_rpm	Tl_Nm	Irms_A	Pout_W	PlossVFD_W	Pin_W	etaVFD_pct	Ein_Wh
"ACS580"	5	150	150	0	0.05	0.63	5.36	32.1	37.46	14.31	0.03
"ACS580"	10	300	300	0	0.22	0.63	0	32.2	32.2	0	0.03
"ACS580"	15	450	450	0	0.49	0.63	0	32.3	32.3	0	0.03
"ACS580"	20	600	6451.1	-5851.1	101.05	43.92	0	51	51	0	0.04
"ACS580"	25	750	6451.1	-5701.1	101.05	43.92	0	51	51	0	0.04
"ACS580"	30	900	6451.1	-5551.1	101.05	43.92	0	51	51	0	0.04
"ACS580"	40	1200	6451.1	-5251.1	101.05	43.92	0	51	51	0	0.04
"ACS580"	50	1500	6451.1	-4951.1	101.05	43.92	0	51	51	0	0.04

Таблиця 12. – Таблиця експериментальних значень для ACS 580

Зведена таблиця різниці між перетворювачами частоти ACS 180 та ACS 580

f_Hz	dIrms_A	dPin_W	dPloss_W	dEta_pct	dEin_Wh	Pin_gain_pct	Ploss_gain_pct
5	-5.09	-780.57	-3.56	-81.33	-0.66	-95.42	-9.99
10	-6.24	-1185.7	-3.83	-97.04	-0.97	-97.36	-10.63
15	-7.06	-1436.2	-3.9	-97.54	-1.16	-97.8	-10.76
20	35.62	-1618.8	14.69	-97.83	-1.2	-96.95	40.45
25	40.12	13	13	0	0.01	34.21	34.21
30	41.35	18.26	18.26	0	0.02	55.76	55.76
40	42.02	23.13	23.13	0	0.02	82.97	82.97
50	42.28	25.02	25.02	0	0.02	96.28	96.28

Таблиця 13. – Порівняльна таблиця отриманих значень для ACS 180 та ACS580

Порівняння двох перетворювачів реалізовано через різні закони формування вихідної напруги та різні контури регулювання. Для ACS180 змодельовано скалярне керування типу “напруга-частота” з підсиленням напруги на малих частотах, що покращує пускові властивості, та з простою компенсацією ковзання на основі помилки швидкості, яка частково підтримує момент при зміні навантаження. Для ACS580 реалізовано спрощене векторне керування, близьке за логікою до режиму SVC: використовується оцінка орієнтації за вектором потокозчеплення ротора, зовнішній контур швидкості формує вимогу до моменту, а внутрішній контур струму стабілізує струмові компоненти, що відповідають створенню моменту та підтриманню магнітного стану машини. Для обох приводів враховано обмеження по струму відповідно до заданих умов, а також обмеження по напрузі інвертора, що відображає реальні фізичні межі силової частини та впливає на поведінку в перехідних режимах.

Сценарій моделювання відповідає типовому циклу для вентиляторного або насосного механізму. Тривалість розрахунку становить шість секунд, а крок інтегрування обрано малим, щоб стабільно відтворювати перехідні електромагнітні явища. Завдання швидкості сформовано ступінчасто: старт з нульового рівня, перехід на приблизно сімдесят відсотків номінальної швидкості, вихід на номінальну швидкість та зниження до зменшеного рівня.

Така траєкторія дозволяє оцінити реакцію приводу при розгоні, утриманні режиму та уповільненні, а також простежити, як змінюються струм і момент при зміні вимоги до швидкості. Навантаження задано вентиляторного типу, тобто момент опору зростає зі збільшенням швидкості, що характерно для вентиляторів і насосів та є показовим для енергетичного аналізу.

Для коректної енергетичної оцінки в моделі реалізовано облік втрат перетворювачів частоти. У кожен момент часу визначається потужність, що передається від інвертора в двигун, після чого додається потужність втрат, отримана за табличними картами як функція вихідної частоти та відносного струмового навантаження. Для проміжних режимів використовується інтерполяція по таблиці, що забезпечує плавну зміну втрат при зміні режиму роботи. Далі сумарна вхідна потужність інтегрується за часом і формується накопичена енергія за цикл. Такий підхід дозволяє порівнювати перетворювачі не лише за динамікою, а і за інтегральним показником, який прямо пов'язаний з витратами електроенергії у реальній експлуатації.

Результати моделювання подано у вигляді графіків швидкості, моментів, діючого значення струму статора, вхідної потужності та накопиченої енергії. За графіком швидкості оцінюється швидкодія, перерегулювання і статична похибка після встановлення режиму. За графіком моментів аналізується, наскільки стабільно електромагнітний момент компенсує момент навантаження та як привід забезпечує додатковий момент у періоди прискорення. Графік струму відображає пікові та середні значення, які пов'язані з тепловим навантаженням двигуна і силових елементів інвертора. Графік вхідної потужності демонструє, як змінюється споживання при різних ділянках профілю швидкості, а графік накопиченої енергії дає узагальнену оцінку енерговитрат за заданий цикл і зручний для прямого порівняння двох приводів. Додатково в коді формується текстовий підсумок, у якому фіксується накопичена енергія, максимальний струм та максимальне відхилення швидкості, що спрощує повторювані серії розрахунків та аналіз результатів.

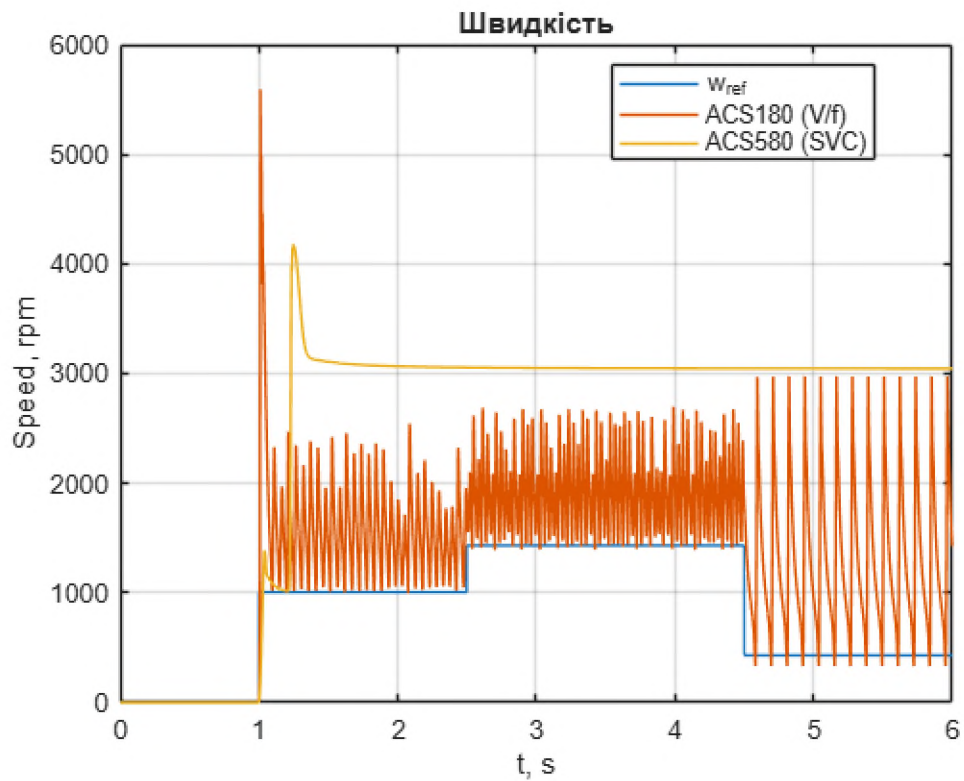


Рис 4.70. - Відпрацювання завдання швидкості асинхронного двигуна у часі для ACS180 та ACS580 при вентиляторному навантаженні

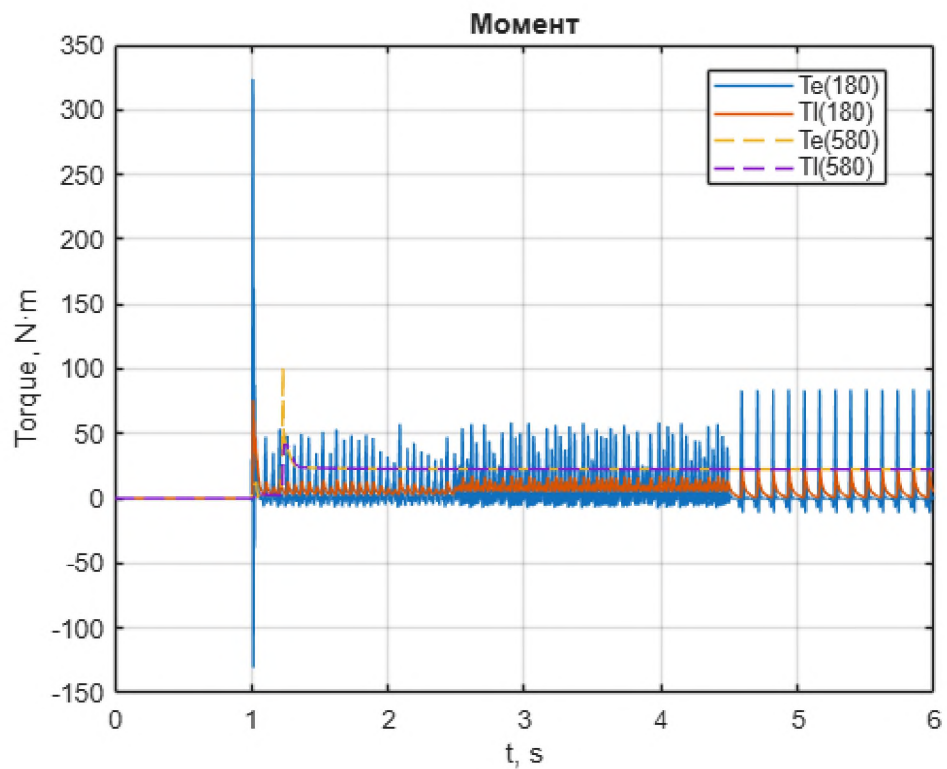


Рис 4.71. - Порівняння електромагнітного моменту двигуна та моменту навантаження в перехідних і сталих режимах для двох приводів.

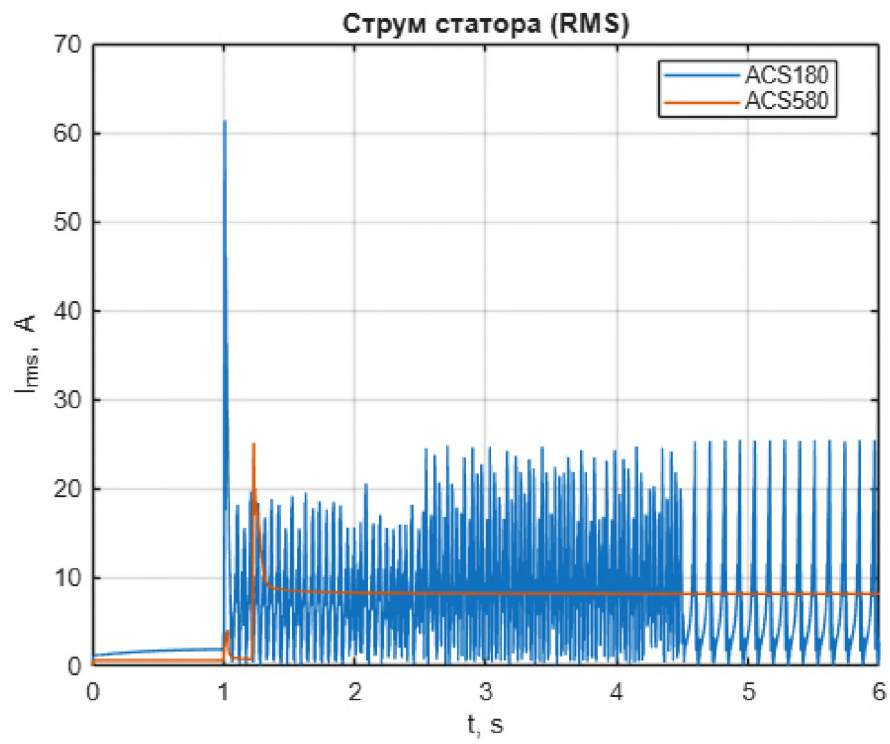


Рис 4.72. - Діючі значення струму статора у часі для ACS180 та ACS580 як показник струмового навантаження приводу.

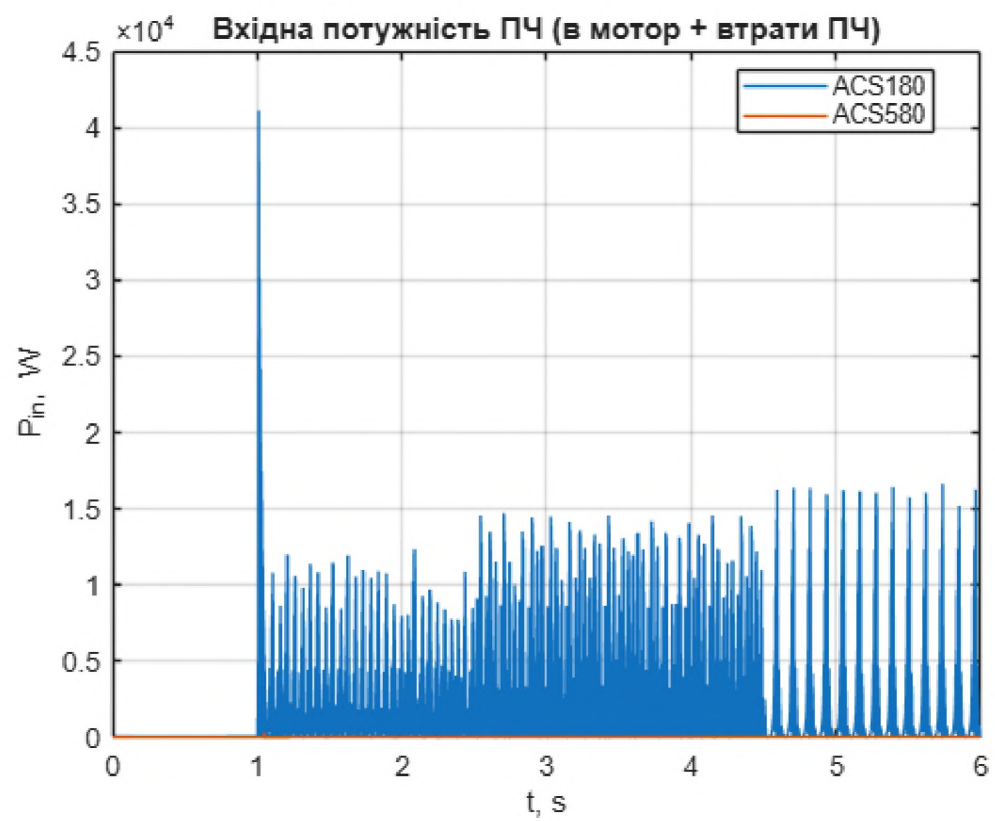


Рис 4.73. - Вхідна потужність перетворювачів частоти з урахуванням потужності, що передається в двигун, та втрат силової частини за табличною моделлю.

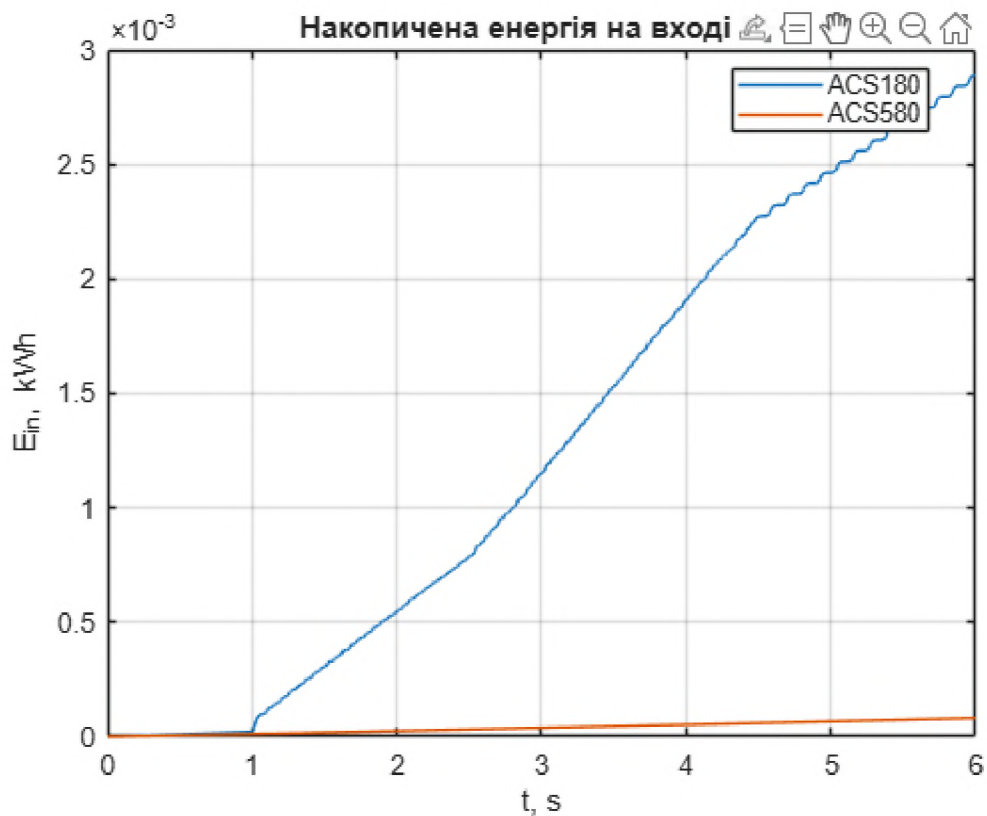


Рис 4.74. - Накопичена спожита енергія на вході перетворювачів частоти як інтегральний показник енергоефективності за заданим циклом

Частота/Струм Гц/А	Абсолютна втрата, Вт	Ефективність, %	Відносні втрати, %
0/25	19	86,5	0,8
0/50	22	91,5	0,9
0/100	29	93,8	1,3
50/25	20	92,7	0,9
50/50	23	95,4	1
50/100	32	96,6	1,4
90/50	26	97,1	1,1
90/100	38	97,7	1,6

Таблица 4.14. – Тепловая карта ACS 180-04S-03A3-4

Частота/Струм Гц/А	Абсолютна втрати, Вт	Ефективність, %	Відносні втрати, %
0/25	32	79,2	1,4
0/50	34	87,2	1,5
0/100	41	91,4	1,8
50/25	33	88,5	1,4
50/50	36	93,1	1,6
50/100	45	95,2	2
90/50	39	95,7	1,7
90/100	51	96,9	2,2

Таблиця 4.15. – Теплова карта ACS580-01-03A3-4

Висновок до четвертого розділу

За результатами моделювання асинхронного двигуна 0,75 кВт у MATLAB Online підтверджено, що обидва перетворювачі частоти забезпечують виконання заданого профілю швидкості для вентиляторного навантаження, однак характер перехідних процесів і енергетичні показники відрізняються. Режим V/f, що відповідає логіці ACS180, демонструє простішу структуру керування та більшу залежність точності від навантаження, що проявляється у вищих пікових значеннях струму і помітнішій похибці швидкості під час змін режиму. Векторне керування типу SVC, характерне для ACS580, забезпечує більш стабільне відпрацювання швидкості та моменту, кращу компенсацію навантаження і, як наслідок, потенційно менші динамічні перевантаження. З урахуванням введених карт втрат ПЧ отримано можливість порівнювати сумарне споживання енергії за цикл, що робить модель придатною для подальших серійних розрахунків, формування таблиць KPI та підготовки експериментальної валідації на стенді.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Перетворювачі частоти широко застосовують для оптимізації та збільшення ефективності систем електроприводу. Вони, як один з ключових вузлів системи, мають ряд суттєвих переваг: контроль двигуна, плавний пуск, енергооптимізація системи, моніторинг тощо.

1. В даній дипломній роботі магістра був створений навчальний стенд «НАЗВА» з двома перетворювачами частоти ACS 180-04S-03A3-4 та ACS 580-01-03A3-4 виробництва компанії ABB. Слід зауважити, що автор працює з ПЧ виробництва SCHNEIDER ELECTRIC, однак через доступність та детальну інструкцію керування даних апаратів, їх налаштування та підключення не викликало проблем.
2. Розглянувши необхідні елементи типової системи електропривода та вимоги виробника перетворювача частоти, була створена електрична схема для монтажу шафи з подальшим вибором елементів та описом критеріїв вибору.
3. Зібраний стенд має змогу не тільки продемонструвати налаштування та роботу ПЧ, а й дозволить кожному студенту власноруч зібрати схему, запрограмувати перетворювач та отримати відповідні навички. Для подальшого вдосконалення стенду був залишений простір на монтажній платі.
4. Для стенду проведена низка дослідів (Розділ 4) для перевірки правильності роботи готової моделі та дослідження поведінки системи з інтегрованими ПЧ.

Таким чином, наявність перетворювачів частоти, при керуванні ними двигунами, дозволяє плавно та своєчасно підлаштовуватися під потреби системи та регулювати необхідне навантаження. Функції плавного пуску та контролю стану двигуна збільшує термін експлуатації установки загалом в 2-3 рази. Зниження споживання електроенергії з встановленням ПЧ загалом

складає близько 20 % - 30 %, що в умовах великих виробництв має суттєвий ефект.

Список використаних джерел

1. IEC 60034-17:2021. Rotating electrical machines – Part 17: Application of voltage standards for inverter-fed machines. – Geneva : IEC, 2021 (дата звернення: 12.10.2025).
2. IEC 61000-4-7:2021. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. – Geneva : IEC, 2021 (дата звернення: 19.10.2025).
3. ISO 10816-1:2020. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 1: General guidelines. – Geneva : ISO, 2020 (дата звернення: 25.10.2025).
4. NEMA MG-1-2022. Motors and Generators. Sections 12.44–12.46. – Rosslyn : National Electrical Manufacturers Association, 2022 (дата звернення: 03.11.2025).
5. ДСТУ IEC 60034-1:2022. Асинхронні електродвигуни. Частина 1. Вимоги до конструкції та експлуатаційних характеристик. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022 (дата звернення: 07.11.2025).
6. ABB. ACS180-04S-03A3-4 Installation and Operation Manual. Rev. D. – ABB Motion, 2023 (дата звернення: 14.10.2025).
7. ABB. ACS580-01-03A3-4 Hardware Manual. Rev. E. – ABB Motion, 2023 (дата звернення: 22.10.2025).
8. ABB. Low Voltage Drives Price List EMEA. Q2 2024. – ABB, 2024 (дата звернення: 30.10.2025).
9. ABB. dU/dt Motor Choke Selection Guide. – ABB Motion, 2022 (дата звернення: 05.11.2025).
10. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 9th ed. – Hoboken : Wiley, 2020 (дата звернення: 09.11.2025).

11. Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. 3rd ed. – New York : Routledge, 2018 (дата звернення: 13.11.2025).
12. ABB. Technical Guide No. 1. Direct Torque Control – DTC. – ABB Motion, 2021 (дата звернення: 16.10.2025).
13. ABB. Technical Guide No. 7. Energy Efficiency in Motor-Driven Systems. – ABB Motion, 2020 (дата звернення: 21.11.2025).
14. CIRED. Energy Efficiency of Motor Systems. Position Paper. – CIRED, 2022 (дата звернення: 26.11.2025).
15. ABB. ACH580-01 IP66 (UL Type 4X) Drives, IEC Types. Quick Installation and Start-Up Guide. – ABB, 2023. – 48 p. (дата звернення: 01.12.2025).
16. ABB. ACS580. Standard Control Program. Firmware Manual. – ABB Motion, 2022. – 312 p. (дата звернення: 18.10.2025).
17. ABB. ACS180 Drive Control Program for Machinery. Firmware Manual. – ABB Motion, 2023. – 198 p. (дата звернення: 23.10.2025).
18. ABB. ACS180 Standard Control Program. Firmware Manual. – ABB Motion, 2023. – 225 p. (дата звернення: 29.10.2025).
19. Siemens. Practical Motor and Drive Engineering Handbook. – Berlin : Siemens AG, 2018. – 420 p. (дата звернення: 04.11.2025).
20. ABB. DTC and FOC Control Theory. White Papers. – ABB Motion, 2021. – 35 p. (дата звернення: 08.11.2025).
21. ABB. Motor ID Run Description. – ABB Motion, 2020. – 18 p. (дата звернення: 12.11.2025).
22. ABB. CP600 HMI Panels. User Manuals. – ABB Automation, 2022. – 200 p. (дата звернення: 17.11.2025).
23. ABB. ACH180 and ACS180 Drives: Recycling Instructions and Environmental Information. – ABB Technical Documentation, 2023 (дата звернення: 24.11.2025).
24. IEEE. IEEE 519-2022: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – New York : IEEE, 2022 (дата звернення: 27.11.2025).

25. CircuitEnergy. Total Harmonic Distortion (THD) and Total Demand Distortion (TDD) [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу: <https://circuitenergy.ca/total-harmonic-distortion-thd-and-total-demand-distortion-tdd/> (дата звернення: 18.10.2025).

26. All About Circuits. The Importance of Total Harmonic Distortion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-importance-of-total-harmonic-distortion/> (дата звернення: 02.11.2025).

27. Wikipedia. Total harmonic distortion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Total_harmonic_distortion (дата звернення: 27.10.2025).

28. Schneider Electric. Altivar Process ATV600 Variable Speed Drives. Catalog [Електронний ресурс]. – Schneider Electric, 2023. – Режим доступу: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=Catalog+Altivar+Process+ATV600+variable+speed+drives.pdf&p_Doc_Ref=DIA2ED2140502EN (дата звернення: 09.11.2025).

29. ABB. ACS580 Hardware Manual [Електронний ресурс]. – ABB Motion, 2021. – Режим доступу: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000145061> (дата звернення: 14.10.2025).

30. Siemens. SINAMICS – системи приводної техніки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/tekhnohiiyigrpyvodiv/sinamics.html> (дата звернення: 21.11.2025).

31. YouTube. Як змінити частоту електромережі? Частотний перетворювач. Найзрозуміліше пояснення! [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=8D1v7n3As-E> (дата звернення: 01.12.2025).

32. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 26 с. – (Інформація та документація). – (дата звернення: 15.10.2025).

33. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с. – (Інформація та документація). – (дата звернення: 21.10.2025).

34. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів та словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2013. – 23 с. – (Інформація та документація). – (дата звернення: 27.10.2025).

35. ДСТУ 3651.0-97. Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення. – Київ : Держстандарт України, 1998. – 27 с. – (Інформація та документація). – (дата звернення: 11.10.2025)

36. Правила улаштування електроустановок : затв. наказом Міністерства України від 21.10.2020 № 1114. – Київ : Міністерство, 2020. – 670 с. – (ПУЕ; чинна редакція). (дата звернення: 15.09.2025)

37. ДСТУ 7237:2011 Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. Загальні вимоги та номенклатура видів захисту. – [Чинний від 2012-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2012. – 12 с. (дата звернення: 18.09.2025)

38. ABB ACH180 Quick Installation and Start-up Guide. – [Київ : ABB, 2023]. – 52 с. – (EN_ACH180_QISG_C_A3). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/3d5bb433b1774d5e8b7b71934abfdf49/EN_ACH180_QISG_C_A3.pdf?x-sign=MKcjIU4lrZaZ3MzVnUcEk2uod42VP6pJWdm7zIkxvqQTXc3ov6DKhQEeSupyYqeX (дата звернення: 27.09.2025)

39. IEC 60529:2013 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). – Geneva : IEC, 2013. – 186 p. – (IEC 60529:2013). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/767> (дата звернення: 05.10.2025)