

Форма № Н-9.02

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та роботехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему **Лабораторний стенд по дослідженню роботи частотно-керovanого асинхронного електроприводу**Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гевленко А.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Борщ В.В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2021 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра

"Лабораторний стенд по дослідженню роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу"

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра містить 64 сторінок, 34 рисунків, 9 таблиць, 28 джерел.

Ключові слова: асинхронний двигун, частотно-регульований електропривод, лабораторний стенд, осцилограф, навантаження, спектральний аналіз сигналів

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розробка сучасного лабораторного стенду по дослідженню роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу.

Проаналізовано принцип роботи існуючих лабораторних стендів по дослідженню роботи частотно-керованого електропривода. Виявлені недоліки у роботі стендів та запропоновано макет нового стенду.

Розроблено функціональну схему, і на її основі складена принципова схема. Виконано аналіз низькочастотних гармонік та показаний у вигляді осцилограм і спектрів. Розроблено алгоритм керування перетворювача частоти Altivar 32 Altivar 71. Представлений перелік елементів.

Дослідницький стенд забезпечує:

- вивчення статичних і динамічних характеристик електроприводу у всьому діапазоні регулювання частоти електроприводу;
- пуск, регулювання частоти обертання, реверс і зупинку двигуна;
- регулювання величини навантаження на валу досліджуваного двигуна;
- захист перетворювача і двигуна від перевантажень і струмів короткого замикання;
- можливість дослідження струмів ротора і статора.

ABSTRACT

qualification work of the bachelor
"Laboratory stand for research of frequency-controlled asynchronous electric drive"

The bachelor's thesis contains 64 pages, 34 figures, 9 tables, 28 sources.

Keywords: asynchronous motor, frequency-regulated electric drive, laboratory stand, oscilloscope, load, spectral analysis of signals

The purpose of the bachelor's qualification work is to develop a modern laboratory stand to study the operation of frequency-controlled asynchronous electric drive.

The principle of operation of the existing laboratory stands for the study of the frequency-controlled electric drive is analyzed. Deficiencies in the work of the stands were revealed and a model of a new stand was proposed.

The functional scheme is developed, and on its basis the schematic scheme is made. The analysis of low-frequency harmonics is performed and shown in the form of oscillograms and spectra. The Altivar 32 Altivar 71 frequency converter control algorithm is developed. The list of elements is presented.

The research stand provides:

- study of static and dynamic characteristics of the electric drive in the whole range of frequency control of the electric drive;
- start, speed control, reverse and stop the engine;
- adjustment of the magnitude of the load on the shaft of the studied engine;
- protection of the converter and the motor against overloads and short-circuit currents;
- the possibility of studying the currents of the rotor and stator.

ВСТУП

Актуальність теми. Електропривод, який використовує високий коефіцієнт корисної дії в перетворенні електричної енергії в механічну, заснований на сучасних досягненнях перетворювальної техніки і ІТ-технології мікропроцесорних інформаційних систем керування часто вражає уяву швидкість розвитку. Можна сказати, що сучасний електропривод, все більше і більше ґрунтується на електродвигунах змінного струму, що володіють безспірними експлуатаційними перевагами, і який застосовується в усіх сферах від промислового виробництва до побутових пристроїв, є основою технічного прогресу. Всі великі електротехнічні компанії випускають регульовані електроприводи комплексно з комп'ютерними засобами автоматизації у вигляді програмованих систем, призначених для широкого використання.

Незважаючи на те що АД, винайшли досить давно, він рідко застосовувався в зв'язку з труднощами реалізації, особливостями керування. До недавнього часу найчастіше застосовувався асинхронний електропривод. Основною областю застосування АД до недавнього часу був нерегульований електропривод. В останні роки в зв'язку з розробкою і випуском електротехнічною промисловістю перетворювачів частоти і напруги стали створюватися регульовані асинхронні ЕП з характеристиками, які не поступаються за своїми показниками ЕП постійного струму.

Сучасний асинхронний електропривод являє собою електротехнічний пристрій, що включає в себе новітні розробки в теорії і практиці створення мікропроцесорів, силових напівпровідникових приладів, захисту від різних перешкод, програмних напрацювань в галузі керування та інтерфейсів, а також створення надійних і високоефективних електродвигунів. Для динамічного керування асинхронного електродвигуна найбільш поширений спосіб орієнтованого по потокозчепленню ротора векторного керування (Бляшки, 1971).

Тому метою кваліфікаційної роботи бакалавра є розробка сучасного лабораторного стенду по дослідженню роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- вивчити методи спектрального аналізу на базі асинхронних електроприводів для вивчення і проведення дослідження роботи перетворювачів частоти при різних режимах керування.;

- проаналізувати роботу існуючих лабораторних стендів по дослідженню роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу, виявити недоліки;

- розробити функціональну схему стенду, обрати засоби автоматизації стенду;

- розробити схему електричну принципіву;

- розробити методіку програмування перетворювачів частоти;

- виконати дослідження роботи частотно-керованого асинхронного електропривода без та з навантаженням.

Дослідницький стенд повинен забезпечувати:

- вивчення статичних і динамічних характеристик електроприводу у всьому діапазоні регулювання частоти електроприводу;

- пуск, регулювання частоти обертання, реверс і зупинку двигуна;

- регулювання величини навантаження на валу досліджуваного двигуна;

- захист перетворювача і двигуна від перевантажень і струмів короткого замикання;

- можливість дослідження струмів ротора і статора.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Актуальність впровадження сучасних систем керування

В даний час системи електроприводу міцно займають лідируюче місце серед приводних пристроїв і забезпечують безперебійну і надійну роботу електроприводів в багатьох областях виробництва і життєдіяльності людини. Впровадження нових технологій, а також розробка і поява нових пристроїв і виробів в наш час неминуче. Вони дозволяють полегшити різні процеси нашої життєдіяльності. Однак, як і всьому новому і незвичному для нас, даними технологіями необхідно навчитися, а, як відомо, процес навчання досить складний. Дане твердження можна застосувати і до програмних продуктів, і до різних, виробів і пристроїв.

Асинхронний регульований електропривод знаходить останнім часом все більше поширення в різних галузях промисловості. Сучасний асинхронний електропривод реалізований на базі силової напівпровідникової техніки із застосуванням мікропроцесорного керування. Його можливості дозволяють організувати регулювання вихідних координат електроприводу в широкому діапазоні, з високою швидкістю і точністю. На даний момент на багатьох підприємствах інтенсивно оновлюється програмна база.

Як приводний двигун останнім часом найбільшого поширення знаходить асинхронний двигун. Відомо, що асинхронний в кілька разів дешевше колекторного двигуна постійного струму, має менші габарити, може бути виконаний на істотно більшій швидкості при тій же потужності, надійний і простий в експлуатації, так як ротор двигуна не має електричного контакту (або іскор і не вимагає постійного обслуговування).

До сих пір самим найпоширенішим способом регулювання продуктивності таких об'єктів є використання засувки або регулюючих клапанів, але сьогодні доступним стає частотне регулювання асинхронного

двигуна, який приводить в рух, наприклад, робоче колесо насосного агрегату, вентилятора.

При використанні частотних перетворювачів, забезпечується плавне регулювання швидкості обертання ротора, дозволяє в більшості випадків відмовитися від використання редукторів, варіаторів, дроселів та іншої апаратури.

Останнім часом регульований асинхронний електропривод з перетворювачами частоти зазнав дуже істотних змін в своєму розвитку, це пов'язано, перш за все, з досягненнями в області силової електроніки і мікропроцесорної техніки, на основі яких були розроблені перетворювачі частоти, щоб забезпечити керування асинхронними короткозамкненими двигунами. Висока швидкість обробки інформації сучасними процесорами дала поштовх модернізації старих і розробці нових алгоритмів керування системою «перетворювач частоти - асинхронний двигун» (ПЧ – АД).

Для розуміння питань, пов'язаних з керуванням асинхронним двигуном, а також для досягнення максимальної ефективності використання систем ПЧ – АД, необхідно глибоке розуміння фізичних явищ в двигуні, перетворювачі і системі в цілому.

Крім того, для побудови енергоефективних систем необхідно враховувати динамічні характеристики приводу, що представляє певні труднощі.

У векторному керуванні досить багато позитивних моментів, але воно має ряд проблем – частина яких пов'язана з виникненням гармонік в струмах ротора і статора.

Для того щоб підтвердити ці особливості векторної системи керування, необхідно розібратися в теорії векторного керування, розробити стенд, і провести експерименти з асинхронним приводом у т.ч. спектральний аналіз струмів ротора і статора.

1.2 Аналіз сучасних систем керування електроприводом

1.2.1 Скалярне керування

Одним із способів керування асинхронними двигунами в електроприводах з регульованою швидкістю є застосування закону $U/f = \text{const}$, який забезпечує підтримку потокозчеплення статора на номінальному рівні в основному діапазоні зміни швидкості.

При збільшенні швидкості відбувається ослаблення поля, а при зниженні – падає перевантажувальна здатність.

Якщо закон керування $U/f = \text{const}$ використовувати в розімкнутих системах, кутова швидкість асинхронного двигуна при роботі під навантаженням буде відрізнятися від заданого значення на величину частоти ковзання (частота ковзання дорівнює круговій електричній частоті струму ротора).

До переваг цих приводів можна віднести їх високу стійкість. Вони стійко працюють навіть при критично низьких швидкостях, де векторне керування не в змозі підтримати стабільність. Так само скалярне керування саме по собі простий пристрій, також надійний, і дешевий в реалізації. При роботі можна підключити будь-яку кількість двигунів, і це ніяк не позначиться на керуванні.

Існує кілька принципів одночасного регулювання частоти і напруги.

Найчастіше прагнуть зберегти постійною перевантажувальну здатність електродвигуна, зробити так, щоб при всіх режимах відношення максимального моменту до моменту сил опору залишалось постійним: $\lambda = M_n/M_c = \text{const}$. При постійному моменті навантаження $M_c = \text{const}$ напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно частоті.

Основне застосування скалярного керування знаходить в приводах, не вимогливих до динамічних характеристик системи. Одна з важливих переваг скалярного методу є можливість одночасного керування групою електродвигунів. Скалярне керування може бути застосовано для більшості

практичних випадків використання частотного електроприводу з діапазоном регулювання частоти обертання до 1:40.

Для зміни частоти напруги в ланцюг статора двигуна включають перетворювач частоти ПЧ (тиристорний, транзисторний, електромашинний), що дозволяє при зміні на вході напруги керування по напрузі $U_{уп}$ змінювати амплітуду напруги $U_1 = var$ на виході ПЧ при сталості частоти. Зміна на вході напруги керування частотою U_{yf} забезпечує регулювання частоти $f_1 = var$ на виході ПЧ при сталості амплітуди U_1 .

Не слід забувати, що вираз для МК отримано для Г-образної схеми заміщення з усіма її припущеннями. На рисунку 1.1 приведені механічні характеристики для закону $U_1/f_1 = const$.

При зміні частоти характеристики переміщуються паралельно природній механічній характеристиці, що нагадує регулювання швидкості двигуна незалежного збудження змінної напруги. Коефіцієнт посилення по частоті k_f для спрощеної структурної схеми можна визначити за механічними характеристиками при $U_1 = const$ и $\omega = const$.

$$k_f = \frac{\Delta M}{\Delta f_1} = \frac{M_H}{f_1 \cdot S_H} = \frac{M_H}{\alpha \cdot f_{1H} \cdot S_H}; \quad (1.1)$$

де: $\alpha = f_1/f_{1H}$ – частота в в.о .

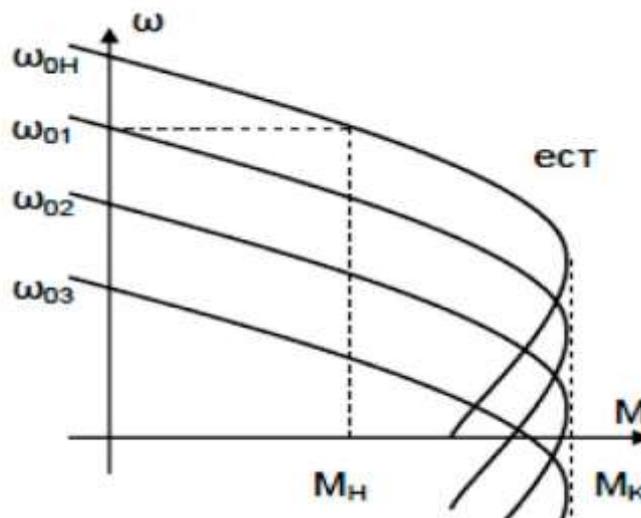


Рисунок 1.1 – Схема і штучні механічні характеристики при $f_1 = var$ и $U_1/f_1 = const$

$$\alpha S = \frac{f_1}{f_{1н}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega_{0н}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0н}}; \quad (1.2)$$

Абсолютне ковзання, що відрізняється від відносного ковзання s тим, що в знаменнику замість ω_0 , що змінюється при $f_1 = \text{var}$, з'явилася $\omega_{0н}$, від частоти не залежить. Абсолютне ковзання αs дозволяє оцінювати жорсткість механічної характеристики, струми в роторному ланцюзі і в замкнених системах дозволить вирішувати деякі завдання.

Для того щоб розуміти причини, переваги і недоліки векторного керування потрібно розібратися з теоретичними положеннями керування систем.

Теоретичне положення системи векторного керування АД

1.2.2 Векторне керування

Метод керування електродвигунами змінного струму, який дозволяє незалежно і з малою інерційністю регулювати швидкість обертання і момент на валу електродвигуна.

Суть векторного керування полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу.

Іншими словами контролюється величина і кут просторового вектора. Векторне керування в порівнянні з скалярним володіє відносно високою продуктивністю.

Під векторним керуванням (на відміну від скалярного керування) розуміють таке регулювання електродвигуна, при якому сигнали виробляються на підставі математичної моделі електродвигуна. При цьому математична модель повинна забезпечувати не тільки керування шляхом формування гармонійних струмів, а й забезпечувати керування магнітним потоком ротора. У літературі процес векторного керування часто описується як процес взаємодії керуючого пристрою з так званим «просторовим вектором» обертовим з частотою поля двигуна.

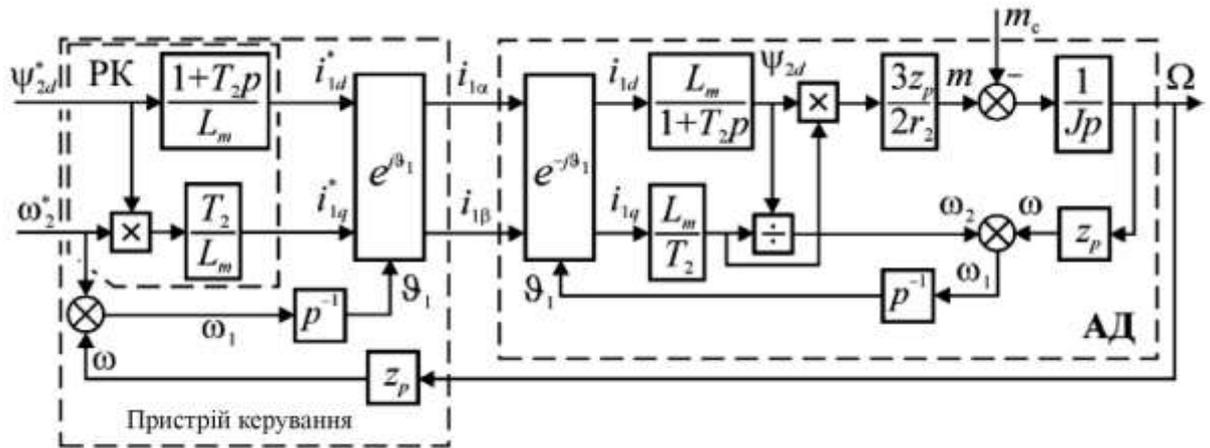


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи струмового керування

При побудові систем трансекторного керування в тій або в іншій формі використовуються математичні моделі асинхронного двигуна, що дозволяють створити незалежні канали керування поздовжніми і поперечними складовими струму статора. Розглянемо спочатку на прикладі струмового керування, тобто такої системи керування, яка формує фазні струми статора. Для спрощення виразів обмежимося двофазним поданням машини, тому що відмінність його від трифазного полягає в несуттєвому для нашої задачі перетворенням числа фаз множенням на постійні коефіцієнти. Для електромагнітного моменту асинхронного двигуна керованого струмом статора слідує, що регулювання може проводитися двома сигналами: потокозчеплення ψ_{2d} , а також частотою ротора ω_2 або поперечною складовою струму статора i_{1q} . Спочатку на системі з керуючими сигналами ψ_{2d} і ω_2 . У середині АД (рис.1.2), поздовжня i_{1d} і поперечна i_{1q} складові формуються з синусоїдальних фазних струмів $i_{1\alpha}$ і $i_{1\beta}$ переходом до синхронної системи координат за допомогою ротора $e^{j\varphi_1}$. Тому, якщо в пристрої керування (ПУ) здійснити зворотне перетворення $e^{j\varphi_1}$, що зв'язує складові струму i_{1d} і i_{1q} потокозчеплення ψ_{2d} і частотою ротора ω_2 , то вхідними сигналами будуть координати, що визначають електромагнітний момент АД. Елемент пристрою керування, який реалізує передавальні функції $i_{1d} = F(\psi_{2d})$ і $i_{1q} = F(\omega_2, \psi_{2d})$

називається зазвичай блоком розв'язки координат (РК), тому що він формує сигнали, відповідні незалежним (розв'язаним, розділеним) проекціям вектора струму статора. Якщо в якості вхідних сигналів пристрою керування використовувати ψ_{2d} і i_{1q} .

За структурною схемою рисунка 1.2 можна простежити, що передавальна функція блоків, включених між точками схеми відповідним сигналам потокозчеплення і частоти ротора дорівнює одиниці ($\psi_{2d} = \Psi_{2d}$; $\omega_2 = \omega_2$). Також можна відзначити, що пристрій керування рисунка 1.2 може виконувати свої функції тільки за тієї умови, що параметри АД, що входять до передавальної функції його ланок відповідають істинним значенням, в іншому випадку виникає неузгодженість систем координат двигуна і пристрою керування, що приводить до втрати працездатності приводу. Ця обставина створює труднощі при реалізації систем векторного керування на практиці (тому що параметри АТ змінюються в процесі роботи). Зокрема це відноситься до значень активних опорів. Система керування на рисунку 1.2 передбачає формування струмів в обмотках статора, що володіє властивостями джерела струму. Однак на практиці можливе використання джерел ЕРС або напруги. Власне, це стосується тільки блоку розв'язки координат. При виборі для ПУ тих же вхідних сигналів (ψ_{2d} і ω_2), очевидно, що використання цих функцій скрутне і на практиці помилки виконання математичних операцій і відхилення параметрів АД від значень включених в передавальні функції ланок приведуть до повної непрацездатності пристрою. Полегшити завдання можна, якщо врахувати, що ротор АТ володіє дуже великою електромагнітною постійною часу і його потокозчеплення може змінюватися тільки відносно повільно, тобто $d\psi_{2d}/dt \approx \hat{0}$.

Структурна схема пристрою керування, в якому реалізовані ці функції складніша, ніж пристрій керування для системи з формуванням струму статора АД (рис.1. 2). Крім того, в ньому використані наближені вирази, що вносять

помилку в динамічних режимах. Тому можна зробити висновок, що системи керування з формуванням напруги статора застосовуються рідко.

У сучасній практиці виготовлення систем керування електродвигунами, що використовують принципи векторного контролю, розглядають два основних підходи до реалізації векторного керування. Перший має на увазі використання датчика зворотного зв'язку по швидкості в контурі керування. Другий передбачає керування без датчика зворотного зв'язку. Перший варіант дозволяє реалізувати найбільш точно по швидкості і моменту керування електродвигунами. Друге може бути привабливим в силу фінансових аспектів.

Векторне керування електроприводами в даний час має серйозне поширення в промисловості. В даний час, перетворювачі частоти реалізують керування двигунами з використанням алгоритмів векторного керування, що застосовують для електроприводів верстатів (ЧПУ).

Практика заміни верстатних приводів постійного струму на асинхронні електродвигуни з векторним керуванням останнім часом отримує все більшу популярність.

Для верстатного парку принцип векторного керування, як правило, реалізують з використання датчиків зворотного зв'язку.

Системи векторного керування без датчиків зворотного зв'язку можна використовувати у випадках, коли необхідно в режимі пуску забезпечити гарантований значний момент на валу асинхронного електродвигуна. Наприклад, такі системи використовують для глибоких насосів в системах водопостачання. Частотні перетворювачі з векторним керуванням випускають практично всі великі виробники перетворювачів частоти. Серед них японські фірми Fuji, Omron, Schneider, і ін.

1.2.3 Векторне бездатчикове керування

Векторне бездатчикове керування дозволяє відчутно збільшити діапазон керування до 1: 1000 і вище, точність регулювання по швидкості – до сотих часток відсотка, точність по моменту – до одиниці відсотка.

У частотно - регульованих асинхронних електроприводах векторне керування пов'язано як зі зміною частоти і поточних значень змінних (напруги, струму статора, потокозчеплення), так і з взаємною орієнтацією їх векторів в декартовій системі координат.

За рахунок регулювання і амплітудних значень змінних, і фазових кутів між їх векторами досягається найбільш якісне регулювання швидкості, моменту і струму асинхронного двигуна, як в статиці, так і динаміці.

У тих випадках, коли установка датчика швидкості утруднена – наприклад, при модернізації існуючих систем електроприводу, або неможлива за конструктивними особливостями приводу, застосовується бездатчикова система керування.

Алгоритм роботи цієї системи керування ґрунтується на інформації, що надходить тільки від датчиків струму і напруги статора двигуна.

За вимірними статорних струмів і напруг можуть бути обчислені всі необхідні для побудови системи керування змінні. До таких змінних відносяться, кут повороту і модуль вектора потокозчеплення ротора. Модуль вектора використовується для організації зворотного зв'язку в контурі керування потокозчеплення ротора, а кут повороту застосовується для орієнтації обертаючої системи координат. Неможливість їх прямого вимірювання робить необхідним формування систем розрахунку цих координат на підставі диференціальних рівнянь. В якості вхідних параметрів розглядаються складові просторових векторів напруг і струмів статора в стаціонарній системі координат, а в якості вихідних змінних – модуль вектора потокозчеплення ротора і його кут повороту в просторі щодо стаціонарної системи координат.

Векторне керування, будучи видом модального керування, володіє всіма його перевагами: модальна САК не вимагає перевірки на стійкість; не вимагає введення додаткових коригуючих пристроїв; введення модальних ЗШ, в силу їх без інерційності, не підвищує порядок об'єкта і не порушує його керованість і спостережливість; відносна простота і економічність технічної реалізації модальних САК.

У той же час при неточності моделі, невірному обліку зовнішніх збурень і змінних параметрів керування втрачає стійкість («розвалюється»).

Клас систем керування без застосування зовнішніх датчиків зворотного зв'язку по швидкості широко затребуваний через складні умови експлуатації деяких приводів і прагнення підвищити надійність електроприводу з одночасним зниженням його собівартості. Векторне керування застосовується в тому випадку, коли в процесі експлуатації навантаження може змінюватися на одній і тій же частоті, тобто немає чіткої залежності між моментом навантаження і швидкістю обертання, а також у випадках, коли необхідно отримати розширений діапазон регулювання частоти при номінальних моментах, наприклад, 0...50 Гц для моменту 100% від $M_{ном}$, це дозволяє збільшити діапазон керування, точність регулювання, підвищити швидкодію електроприводу. Цей метод забезпечує керування крутним моментом двигуна. Момент, що обертає визначається струмом статора, який створює збудливе магнітне поле. При безпосередньому керуванні моментом необхідно змінювати крім амплітуди і фази статорного струму, тобто вектор струму. Векторний спосіб керування перетворювачем частоти здійснює якісне керування електродвигуном, ніж скалярний. Налаштування такого перетворювача вимагає більш глибоких знань в області пристрою електроприводу і електричних машин.

Переваги векторного керування:

- висока точність регулювання швидкості;
- швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження практично не відбувається зміни швидкості;

- збільшений діапазон керування і точність регулювання;
- знижуються втрати на нагрів і намагнічування.

До недоліків векторного керування можна віднести:

- необхідність завдання параметрів електродвигуна (включаючи R і L обмотки);
- велика обчислювальна складність;
- несинусоїдальність струмів і напруги;
- не можна керувати кількома двигунами;
- в разі неправильних параметрів ведення–виникає збій.

Всі електричні машини працюють схожим чином. В теорії електроприводу навіть існує поняття «узагальнена електрична машина», до якої зводять роботу інших. Для того щоб уточнити недоліки, плюси і мінуси векторного керування, був розроблений стенд, а також проведений спектральний аналіз.

Спектральний аналіз сигналів. Спектральний аналіз полягає в розкладанні сигналу на його частотні або спектральні складові і оцінці або вимірі їх характеристик – амплітуди, фази, потужності, спектральної щільності потужності та ін.

Основними методами спектрального аналізу є фільтрові (методи смугового аналізу), без фільтрового, параметричного, поточного і змінного аналізу. До параметрів аналізаторів спектра відносяться: число каналів аналізу; час спостереження і число відліків або довжина оброблюваної реалізації; смуга аналізу, що не перевищує для дискретних сигналів основної смуги спектра; дозвіл по частоті, зворотне, пропорційне часу аналізу і відповідне різниці частот двох сусідніх дозволених частотних складових сигналу. Спектральний аналіз стаціонарних гармонійних сигналів. Спектр аналогового сигналу зосереджений в обмеженій смузі частот і його параметри можуть бути оцінені за допомогою спектральних характеристик дискретного еквівалента, який формується після попередньої аналогової фільтрації на виході АЦП.

РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Огляд існуючих лабораторних стендів

Для вивчення механічних характеристик різних типів електродвигунів, що застосовуються в промисловості, розроблено значну кількість різноманітних лабораторних комплексів. При цьому використовуються як найпростіші стенди з двигунами постійного струму, в яких використовується аналогова вимірювальна техніка, так і сучасні комп'ютеризовані комплекси по дослідженню характеристик двигунів постійного струму і асинхронних машин [1–4].

Вищевказаний лабораторний стенд призначений для вивчення студентами способів керування і режимів роботи електроприводів змінного струму, що живляться від перетворювачів частоти з ШІМ. Зовнішній вигляд лабораторного стенду представлений на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вид лабораторного стенду

Стенд складається з двох основних компонентів, а саме панелі керування і електромеханічної системи взаємопов'язаних двигунів змінного струму: асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором і синхронного двигуна з постійними магнітами. На валу асинхронного двигуна для забезпечення стійкої роботи системи на низьких швидкостях використаний циліндричний редуктор Transtehno з коефіцієнтом редукції 1:3. Вали досліджуваних машин з'єднані між собою пасовою передачею, що дозволяє досліджувати

характеристики електромеханічної системи з урахуванням впливу пружного зв'язку. Як датчик зворотного зв'язку по швидкості використовується фотоімпульсний датчик повороту (енкодер), встановлений на валу синхронного двигуна. Панель керування електродвигунами містить сервоперетворювач TSTA-20C для керування синхронним двигуном, перетворювач частоти E82EV152K4C Lenze для регулювання швидкості асинхронного двигуна, а також вимірювальні прилади TPM202 OVEN з універсальними аналоговими входами.

Керування швидкістю обертання синхронного двигуна здійснюється за допомогою зовнішнього перемикача, що подає команду на дозвіл роботи, потенціометра, підключеного до аналогового входу сервоперетворювача для завдання напруги керування, а також прихованого тумблера для перемикання режимів роботи системи.

Керування перетворювачем частоти Lenze здійснюється за допомогою тумблера дозволу роботи і кнопок керування SB1, SB2, що забезпечують регулювання швидкості двигуна в режимі «мотор потенціометра». В цьому випадку при натисканні кнопки SB1 швидкість обертання асинхронного двигуна починає збільшуватися і стабілізується на заданому рівні при відпуску кнопки. При натисканні кнопки SB2 швидкість аналогічним чином зменшується.

Для відображення поточних параметрів роботи взаємозалежної системи електроприводу використовуються пульти індикації даних перетворювачів і вимірювальні прилади TPM202 OVEN. До входів приладів підключені аналогові виходи сервоперетворювача і перетворювача частоти (навантаження і фактична швидкість з TSTA-20C, струм двигуна з E82EV152K4C).

При дослідженні статичних характеристик електроприводу з синхронним двигуном навантаження формується за рахунок зміни частоти обертання асинхронного двигуна. Струм статора синхронної машини фактично визначається різницею синхронних швидкостей обертання досліджуваного і навантажувального двигунів.

При дослідженні статичних характеристик з асинхронним двигуном сервоперетворювач, керуючий синхронним двигуном переводиться в режим прямого керування моментом за допомогою тумблера. В цьому випадку сервосистема формує абсолютно м'яку характеристику, і швидкість обертання системи визначається завданням по швидкості обертання асинхронного двигуна.

Наявність у сервоперетворювача інтерфейсу RS232, що забезпечує передачу даних по протоколу Modbus RTU, призводить до можливості зняття не тільки статичних, але також і динамічних характеристик досліджуваних електромеханічних систем. При цьому студенти отримують можливість досліджувати вплив коефіцієнтів ПІ-регулятора швидкості сервоперетворювача, зняти криві перехідних процесів при пуску і зміні навантаження. Однією з особливостей використовуваного сервоперетворювача є можливість запуску автоматичного налаштування для системи керування контуру стабілізації швидкості. У цьому випадку студенти можуть порівняти якість перехідних процесів при параметрах ПІ-регулятора швидкості, отриманих при теоретичних розрахунках, обраних емпіричним шляхом, а також після процедури автоматичного налаштування. Як засіб візуалізації динамічних характеристик при пуску і регулювання використовується програмне забезпечення TED Servo Software.

Стенд призначений для демонстрації і дослідження роботи частотно-регульованого 3-фазного асинхронного двигуна, використовується для придбання і закріплення практичних навичок керування асинхронним двигуном за допомогою перетворювача частоти.

Стенд містить пристрій для отримання 3-фазної напруги змінної частоти (частотний перетворювач) і асинхронний двигун, навантаження на який може змінюватися вручну за допомогою простого фрикційного гальма, засобів контролю і керування.

Лабораторний стенд містить достатній набір технічних засобів для демонстрації роботи частотно-регульованого 3-фазного асинхронного

двигуна, дослідження і для набуття практичних навичок керування асинхронним двигуном за допомогою перетворювача частоти. Основу стенду складають перетворювач частоти і асинхронний двигун.

Існують і інші способи керування частотою обертання двигуна, але частотний перетворювач є на сьогоднішній день найсучаснішим і ефективним, до того ж, реалізація так званого векторного керування дозволяє позбутися від більшості недоліків властивих частотному керування асинхронним двигуном. Розвиток «інтелекту» перетворювача дозволяє отримати масу інших корисних функцій і навіть будувати локальні САР, наприклад на насосах для підтримки рівня рідини, для стабілізації тиску в трубопроводі і ін.

Загальний вигляд стенду представлений на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Лабораторний стенд «Частотне керування асинхронним двигуном» фірми Сіменс

- 1– асинхронний двигун; 2 – частотний перетворювач Micromaster 440;
 3– гальмо; 4– датчик швидкості обертання асинхронного двигуна (енкодер);
 5– органи дистанційного керування частотним перетворювачем; 6– шасі

Шасі несе на собі частотний перетворювач, асинхронний двигун з датчиком частини обертання, гальмо, органи ручного керування і кнопку включення стенда.

Частотний перетворювач живиться від мережі 220 В, 50 Гц. Він створює на своєму виході 3-фазну напругу потрібної частоти і амплітуди, яка подається на обмотку статора асинхронного двигуна (АД).

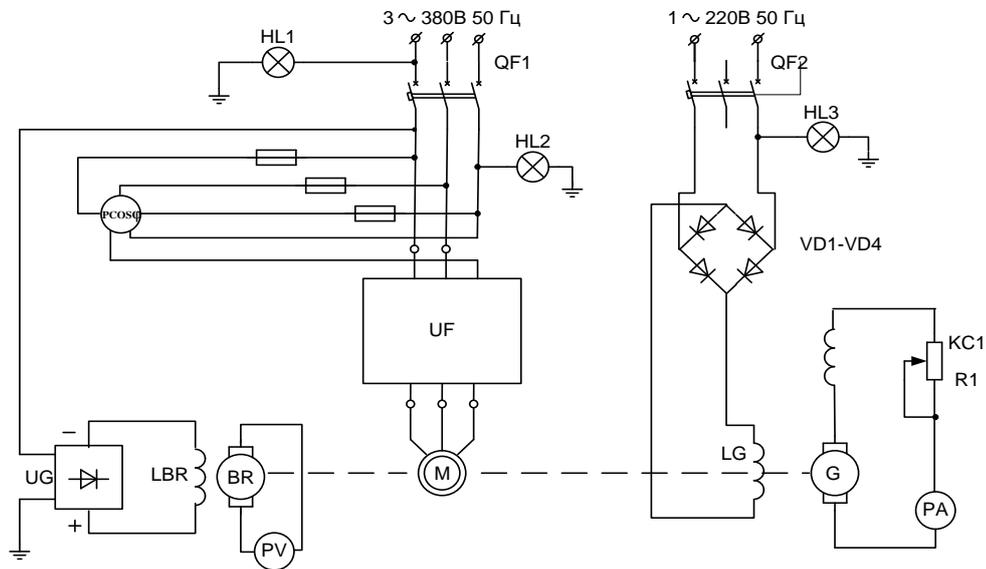


Рисунок 2.3 – Принципова схема лабораторного стану

Лабораторна установка повинна забезпечувати:

- зняття статичних і динамічних характеристик електроприводу у всьому діапазоні регулювання частоти електроприводу;
- пуск, регулювання частоти обертання, реверс і зупинку двигуна;
- регулювання величини навантаження на валу випробуваного двигуна;
- можливість дослідження декількох перетворювачів частоти;
- захист перетворювача і двигуна від перевантажень і струмів короткого замикання;
- енергозберігаючі рішення.

Лабораторний стенд складається з макета робочого місця, обладнаного трифазним асинхронним двигуном, перетворювачем частоти, програмованим логічним контролером, а також набором різних периферійних пристроїв. Зовнішній вигляд стану представлений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд і розташування елементів стенду

Здійснити керування і моніторинг різних параметрів можна за допомогою настільного персонального комп'ютера і програмного забезпечення, встановленого на ньому.

Даний стенд складається з наступних компонентів:

1. Автоматичні вимикачі (рис. 2.4, №1) – пристрої, призначені для комутації електричної мережі, а також для захисту кабелів і проводів від струмів перевантаження, і короткого замикання.

2. Клемники (рис. 2.4, №2) – пристрій, призначений для спрощення комутації проводів.

3. Джерело живлення 220 / 24В 60Вт (рис. 2.4, №3) – на даному стенді включене в ланцюг живлення ПЛК після автоматичного вимикача QF1.

4. Контролер Mitsubishi Alpha XL A12-14MR-D (рис. 2.4, №4) – програмований логічний пристрій, призначений для керування двигуном.

5. Реле 24VDC 2CO зображені на рисунку 2.4 під номером 5.

6. Частотний перетворювач FR-E720S-030SC-EC (рис. 2.4, №6) – пристрій, що служить для керування двигуном змінного струму, що конвертує постійну напругу і частоту мережі в змінну напругу із змінною частотою.

7. Асинхронний трифазний двигун 5A1 63B4 – електродвигун потужністю 0,37 кВт, зображений на рисунку 2.4 під номером 7.

8. Панель ручного керування (рис. 2.4, №8) – служить для ручного керування стендом і складається з наступних компонентів:

1. Потенціометр 1 кОм
2. Потенціометр 5 кОм
3. Перемикач 2 пол. (6 шт.)
4. Перемикач 3 пол.
5. Вольтметр стрілочний 0...10В
6. Вольтметр стрілочний 0...25В
7. Сигнальна лампа (6 шт.)
9. Датчик Холла (рис. 2.4, №9) – необхідний для підрахунку оборотів двигуна.

Стенд має два автоматичних вимикача, які комутують два незалежні один від одного ланцюга живлення.

Автоматичний вимикач під позначенням QF1 призначений для комутації ланцюга живлення програмованого логічного контролера, реле, керуючих входів частотного перетворювача. Даний ланцюг має напругу 24В постійного струму після джерела живлення.

Автоматичний вимикач під позначенням QF2 призначений для комутації ланцюга живлення частотного перетворювача і трифазного асинхронного двигуна. Даний ланцюг має напругу 220В змінного струму.

Враховуючі всі недоліки у роботі існуючих лабораторних стендів існує необхідність у створенні сучасного лабораторного стенду с точною автоматикою.

2.2 Розробка функціональної схема стенду

Виходячи з вище означеної задачі розроблений дослідний стенд, всі елементи стенду розміщені і закріплені на твердій негорючій основі. Для запобігання травмуванню осіб, які працюють зі стендом, передбачений

захисний кожух, що закриває всі обертові частини стенду, струмопровідні елементи ізольовані, передбачено захисне заземлення.

Функціональна схема зображена на рисунку 2.5.

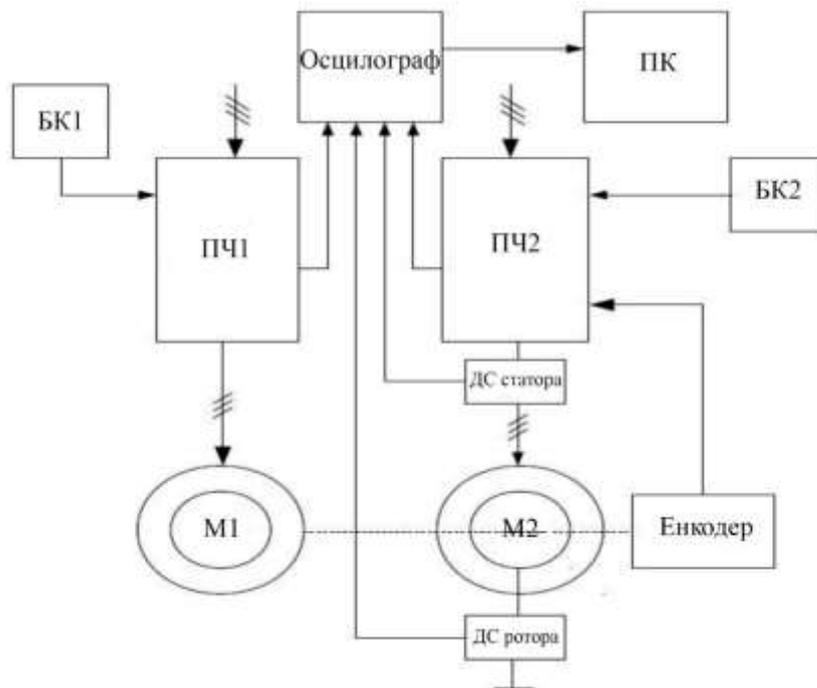


Рисунок 2.5 – Функціональна схема стенду

Стенд укомплектований агрегатом, що складається з двох асинхронних двигунів один з яких – короткозамкнений двигун (М1), другий – двигун з фазним ротором (М2) вала з'єднується жорсткою муфтою. У ланцюзі ротора і статора включені датчики струму ротора і статора (ДСр, ДСст). Керування двигунами проводиться окремо за допомогою двох різних перетворювачів частоти (ПЧ1, ПЧ2), це дозволяє використовувати один з двигунів в якості досліджуваного, а інший – як навантажувальну машину. Перетворювачі частоти можуть управлятися як з панелі керування самого перетворювача частоти так і зовнішнього блоку керування (БУ1, БУ2).

Вихідні сигнали з аналогового виходу (ПЧ1, ПЧ2 і з датчика струмів) вимірюються осцилографом (ОС) і фіксуються на персональному комп'ютері (ПК) за допомогою спеціального програмного забезпечення (ПЗ).

На даному стенді можуть досліджуватися не тільки сталі режими: механічні характеристики, криві зміни частоти, напруги, струму статора і ін.

При різних способах частотного керування, а й динамічні режими холостого ходу, і з навантаженням при різних законах керування і різних значеннях компенсацій.

2.3 Перетворювач частоти Altivar 71 SchneiderElectric

Перетворювач частоти Altivar 71 (рис.2. 6) призначений для двигунів потужністю до 3 кВт з однофазним живленням. У частотних перетворювачів Altivar 71 реалізований весь функціонал і досвід SchneiderElectric у виробництві перетворювачів частоти.



Рисунок 2.6 – Перетворювач частоти Altivar 71 (ATV71HU30M3)

Завдяки наявності можливості підключення до перетворювача частоти датчика зворотного зв'язку по швидкості, Altivar 71 успішно вирішує приводні завдання, такі як пакувальне обладнання, системи керування становищем різних механізмів, а також обробляюче обладнання (дерево), обладнання текстильного виробництва і т.п. Наявність безлічі опціональних плат (існує можливість встановлення до 3-х одноразового), робить перетворювач частоти Altivar 71 досить гнучким інструментом, легко інтегрованим в будь-яку систему керування підприємства, а також і його обладнання.

Основні особливості Altivar 71:

- простота програмування і введення в експлуатацію;
- вбудована функція керування моментом двигуна;
- вбудований набір мікропрограм для різних застосувань;

– вбудована функція керуванням гальмом двигуна.

Режими роботи Altivar 71, закони керування реалізовані в перетворювачі частоти:

Керування асинхронним двигуном:

- векторне керування;
- закон залежності напруга/частота за двома або п'яти точках;
- векторний без датчика зворотного зв'язку за швидкістю;
- векторний з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю;
- система адаптації потужності.

Для синхронного двигуна:

- векторне керування в розімкнутій системі.

Входи/виходи керування Altivar 71:

- кількість програмованих дискретних входів – 6;
- кількість аналогових входів – 2;
- кількість аналогових виходів – 1;
- кількість вбудованих реле – 2.

Розташування силових клем Altivar 71 зображені на рисунку 2.7.

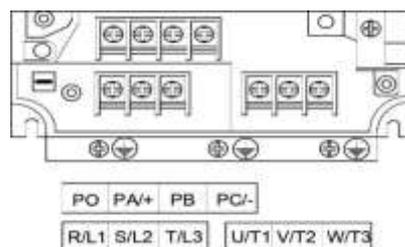


Рисунок 2.7 – Розташування силових клем

PO – вивід + проміжної ланки постійного струму; PA/+ – підключення гальмівного опору (вивід -); PB – підключення гальмівного опору; PC/ - – вивід проміжної ланки постійного струму; R/L1, S/L2, T/L3 – підключення двигуна; U/T1, V/T2, W/T3 – мережеве живлення

Перетворювач частоти додатково має інтерфейсну карту фотоімпульсного датчика, що забезпечує роботу електроприводу з алгоритмом векторного керування потоком з датчиком зворотного зв'язку, що дозволяє

отримувати характеристики незалежно від моменту навантаження на валу двигуна:

- момент при нерухомому двигуні;
- стабілізація швидкості;
- точна підтримки моменту;
- зменшення часу реакції при набиранні моменту;
- поліпшення динамічних характеристик в перехідних режимах.

При інших законах керування (векторне керування по напрузі, скалярне керування U/f) інтерфейсна карта імпульсного датчика дозволяє поліпшити статичну точність системи регулювання швидкості.

Інтерфейсна карта імпульсного датчика забезпечує також завдання керуючого сигналу на перетворювач Altivar 71 з виходу датчика. Таке застосування призначене для синхронізації швидкостей декількох приводів. Картка стане в призначене для неї місце в ПЧ.

Живлення(забезпечується карткою). Напруга 5 В (від 5 до 5,5 В).

Максимальний струм 200 мА.

Захищений від коротких замикань і перевантаження.

Максимальна частота 300 кГц.

Вхідні сигнали А, -А, В, -В.

Опір 440 Ом.

Кількість імпульсів на один оборот валу датчика <5000.

Максимальна частота на верхній швидкості не повинна перевищувати 300 кГц.

Підключений енкодер призначений для вимірювання лінійних і кутових переміщень. Дії енкодерів засновані на вимірюванні кута повороту лінійних переміщень, що дає високу точність. При наявності імпульсного енкодера жорстко закріпленого на валу електродвигуна, стандартний асинхронний електродвигун виконує функції високоточного регульованого електроприводу.

Під енкодером мають на увазі контролери, які будуть давати можливість контролювати стан електромеханічного пристрою. При його допомозі можна буде без зусиль виконати визначення положення обертаючої вісі. При його допомозі можна виконувати вимірювання довжини і відстані, а також з'являється можливість виконувати установку переміщення інструменту. Енкодер одержав широке застосування в сфері металообробки, в автоматах для фасування, в упаковці та розливі, в випробувальних стендах. Саме вони змогли стати альтернативою сельсину, які раніше мали свою широку сферу застосування (рис.2.8).



Рисунок 2.8 – Енкодер TRD-S500 – VD

2.4 Перетворювач частоти Altivar 32 SchneiderElectric



Рисунок 2.9 – Перетворювач частоти Altivar 32

Перетворювач частоти Altivar 32 (рис.2.9) призначений для керування трифазними асинхронними і синхронними двигунами з напругою живлення

від 200 до 500 В і потужністю до 1,5 кВт, вихідна частота 0,1...599 Гц, перехідний момент 170 – 200% номінального моменту двигуна.

При розробці перетворювача частоти на стадії проектування враховувалися вимоги виробників обладнання, воно дозволяє забезпечити сумісність з виробничими механізмами.

Перетворювач частоти має ширину 45 або 60 мм, при цьому економлячи простір, що займає механізм.

Перетворювачі частоти цілком можуть встановлюватися впритул один до одного, а також в невеликих за розміром шафах керування, можливість підключення автоматичного вимикача безпосередньо до перетворювача частоти, а так само вбудований Bluetooth, що дає дистанційне регулювання і установку параметрів через мобільний телефон або персональний комп'ютер.

Кількість входів-виходів:

- Вхід – 3 аналогових, 6 дискретних;
- Вихід – 1 аналоговий (0...10 В; 0...20 мА), 1 дискретний, 2 релейних.

Комутаційні можливості:

Вбудовані – Modbus, CANopen, Bluetooth Altivar 32 мають можливість реалізації наступних законів керування:

- закони керування «напруга/частота»: U/f по 2 і U/f по 5 точкам;
- векторне керування потоком в розімкнутій системі;
- квадратичний закон Kn^2 (для керування насосами, вентиляторами);
- енергозберігаючі режим для асинхронних двигунів;
- векторне керування потоком в розімкнутій системі для синхронних двигунів.

Вбудований блок логічних функцій ATV Logic дозволяє реалізувати в перетворювачі частоти алгоритми, використовувані в простих системах керування такі як логічні, арифметичні операції.

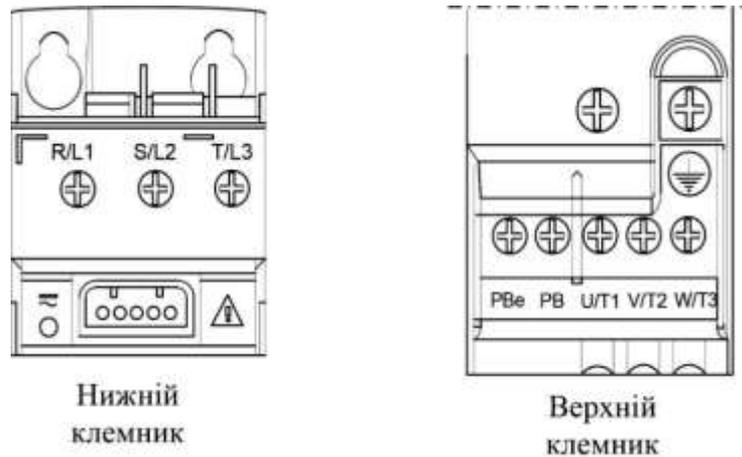


Рисунок 2.10 – Розташування силових клем

PBe – підключення гальмівного опору (вивід +); PB – підключення гальмівного опору; R/L1, S/L2, T/L3 – мережеве живлення; U/T1, V/T2, W/T3 – підключення двигуна

2.5 Вибір осцилографа



Рисунок 2.11 – Осцилограф

Цифровий осцилограф на базі ПК Hantek DSO-2090 USB (рис. 2.11.) – портативний двоканальний цифровий USB-осцилограф з смугою пропускання 40 МГц і частотою дискретизації в реальному часі 100 Мвиб/с. Осцилограф не вимагає джерела живлення, і живиться автономно від USB-роз'ємів.

За допомогою компактного осцилографа-приставки Hantek DSO-2090 USB можна проводити математичну обробку сигналів і курсорні вимірювання.

Програмне забезпечення дозволяє повністю використовувати всі функції, а для ознайомлення з можливостями програми передбачено демо - режим.

Особливості:

- 2 каналу і додатковий канал зовнішньої синхронізації;
- розрядної АЦП 9 біт;
- курсорне вимірювання;
- математичні операції: додавання, віднімання, множення, ділення;
- збереження даних в форматах TXT, BMP, JPG, MS Excel/Word, збереження конфігурації програмного забезпечення під Windows.

Функція калібрування щупів.

- Живлення від 2x USB - роз'ємів, один з яких використовується також для передачі даних на ПК.

Технічні характеристики наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Hantek DSO - 2090 USB

Параметр	Значення
Частота дискретизації в реальному часі	100 Мвиб/с (1 каналу) 50 Мвиб/с (2 канали)
Смуга пропускання МГц	40
Розрядність АЦП	8 бит/канал
Масштаби амплітуд	10 мВ ~ 5 В / справ при збільшенні × 1. 100 мВ ~ 50 В / справ при збільшенні × 10 1 В ~ 500 В / справ при збільшенні × 100 10 В ~ 5 кВ / справ при збільшенні × 1000
Вхідний імпеданс	1 МОм 25 пФ
Похибка по постійному струму	±3%

2.6 Розробка принципової схеми

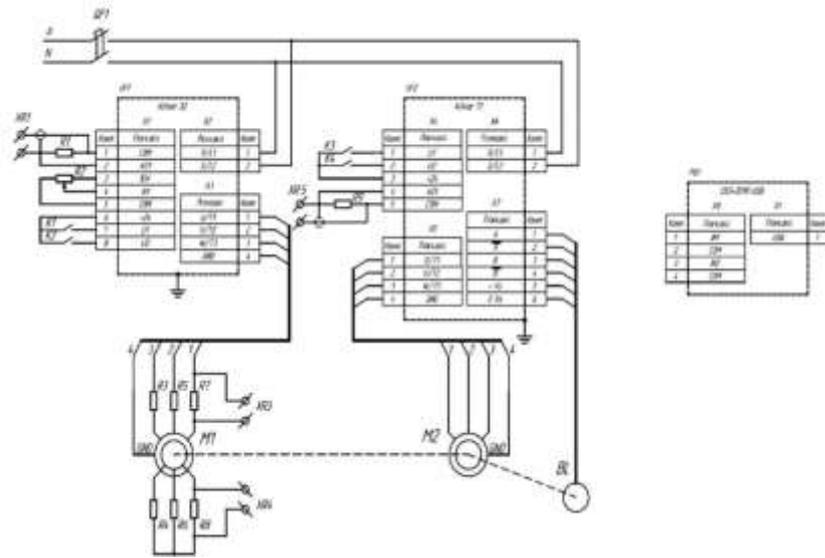


Рисунок 2.12 – Принципова схема

Таблиця 2.2 – Список елементів принципової схеми

Позиція	Найменування	Кількість	Примітка
	Перетворювач частоти		
UZ1	ATV32HU15M2	1	
UZ2	ATV71HU30M3	1	
	Резистори		
R1, R9	4,7 кОм МЛТ-0,5-5%	2	
R2	10 кОм СПЗ-4М-5%	1	
R3-R8	1 Ом SQP-10-5%	6	
	Пристрої комутації		
S1	Автоматичний вимикач	1	
K1-K4	Тумблер KN3(B)-201A-A1	4	
	Електродвигун		
M1	Лабораторний (аналог AIP03B4Y3)	1	
M2	AIP03B4Y3	1	
	Датчик швидкості		
BR	TRD-S500VD	1	
	Осцилограф		
OS1	DSO-2090 USB	1	

2.7 Технічні характеристики стенду

Лабораторний стенд призначений для вивчення роботи і зняття характеристик асинхронного електродвигуна з частотним керуванням. У електромашинному агрегаті один електродвигун є досліджуваним, а інший є творцем активного і реактивного навантаження на вал досліджуваного електродвигуна.

Стенд (рис.2.13) укомплектований двома асинхронними електродвигунами, які управляються перетворювачами частоти підключених до програмованого логічного контролера. Дослідницький стенд змонтований на твердій негорючій основі 600x1300мм розташованим в горизонтальному положенні, всі елементи закріплені. У лівій частині стенду знаходяться електромашинний агрегат (рис.2.13), що складається з двох асинхронних електродвигунів марки АІР63В4У3.

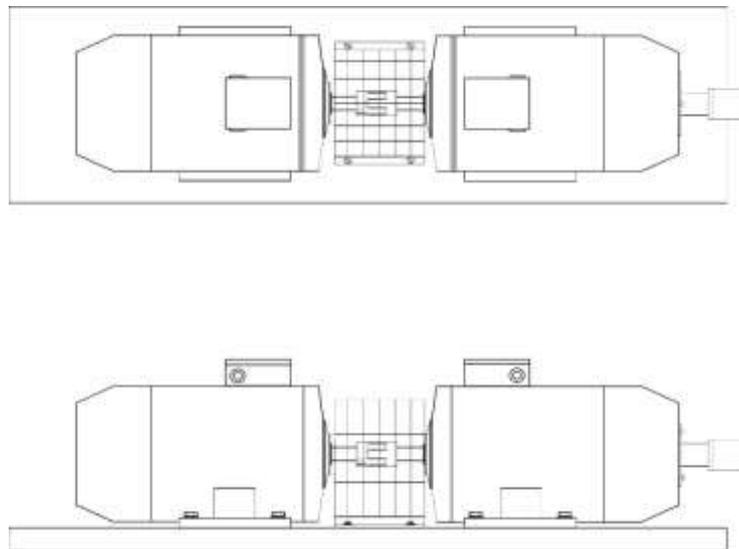


Рисунок 2.13 – Електромашинний агрегат

Електричні двигуни закріплені на загальній рамі. Вали машин жорстко з'єднані гнучкою сполучною віброгасною муфтою з поліуретановою вставкою марки ВF – 30 – 8 – 12, яка має можливість передавати високий крутний момент, а також здатність поглинати крутильні вібрації і ударні навантаження.

Для запобігання травмування осіб, які працюють зі стендом, передбачений захисний кожух, що закриває всі обертові частини стенду.

Один з електродвигунів має закріплений на його задній панелі цифровий датчик переміщення (енкодер) який кріпиться за допомогою перехідного пристрою, вали двигуна і енкодера з'єднані між собою жорсткою сполучною муфтою.

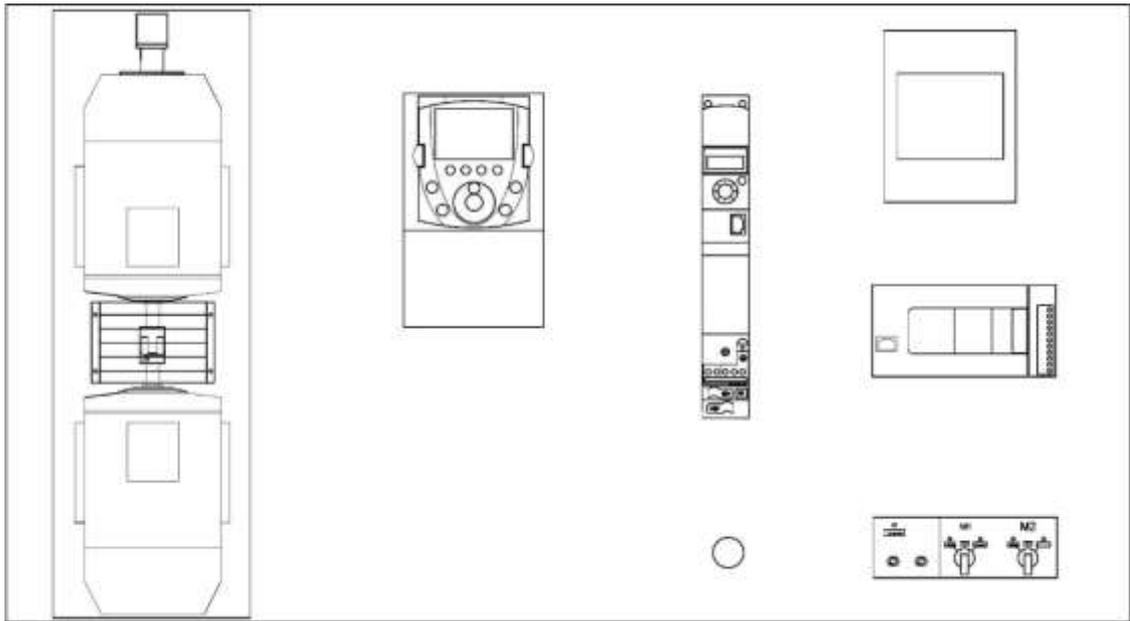


Рисунок 2.14 – Дослідницький стенд

У центральній частині дослідного стенду (рис.2.14) розташовані два перетворювача частоти Altivar 71 і altivar 32.

Перетворювач частоти Altivar 71 має додаткову вбудовану інтерфейсну карту фото-імпульсного датчика для підключення енкодера.

На силову клемну колодку X1 перетворювача UZ1, UZ2 підключається:

- R/L1 S/L2 T/L3 напруга мережі живлення;
- GND захисне заземлення.

На силову клемну колодку X2 перетворювача UZ1, UZ2 підключається силовий кабель електродвигуна.

Знизу розташована кнопка аварійної зупинки грибоквого типу.

У правій частині дослідного стенду знаходяться: програмований логічний контролер, пульт керування і силовий блок.

Таблиця 2.3 – Перетворювач частоти «Altivar32»

Найменування параметру	Значення
Номинальна потужність кВа	1,4
Номинальний вихідний струм А	1,5
Напруга живильної мережі В	220
Кількість фаз	3
Діапазон зміни вихідної частоти Гц	0,1–599
Захист по струму	170

Таблиця 2.4 – Перетворювач частоти «Altivar71»

Найменування параметру	Значення
Номинальна потужність кВа	2,4
Номинальний вихідний струм А	2,25
Напруга живильної мережі В	220
Кількість фаз	3
Діапазон зміни вихідної частоти Гц	10–1000
Захист по струму	220 протягом 2 с

Таблиця 2.5 – Плата для підключення датчика зворотного зв'язку по швидкості

Найменування параметру	Значення
Напруга	5 В (от 5 до 5,5 В)
Максимальний струм мА	200
Максимальна частота кГц	300
Вхідні сигнали	А, А-, В, В-
Опір Ом	400
Кількість імпульсів на один оборот валу датчика	< 5000
Максимальна частота на верхній швидкості не більше кГц	300

Перетворювач забезпечує як підтримку незмінним заданого закону регулювання співвідношення U/f (постійний потік двигуна) або векторне керування. Закон зміни U/f програмується. Силовий канал перетворювача здійснює двоступеневе перетворення електричної енергії – випрямлення напруги нерегульованим випрямлячем з подальшим інвертуванням випрямленої постійної по величині напруги. Алгоритм ШІМ забезпечує взаємопов'язане регулювання частоти f і величини U вихідної напруги по заданому закону, формує синусоїдальну форму кривої струму приводного асинхронного двигуна.

2.8 Закони керування перетворювачів частоти

Перетворювач частоти Altivar32 призначений для керування трифазними асинхронними і синхронними двигунами з напругою живлення від 200 до 500 В і потужністю від 0,18 до 15 кВт, вихідна частота 0,1...599Гц, перехідний момент 170 – 200% номінального моменту двигуна. Altivar32 має можливість реалізації наступних законів керування:

- закон керування «напруга/частота»: U/f по 2 і U/f по 5 точкам;
- векторне керування потоком по напрузі, в розімкнутій системі;
- квадратичний закон Kn^2 (для керування насосами, вентиляторами);
- енергозберігаючий режим для асинхронних двигунів;
- векторне керування потоком в розімкнутій системі для синхронних двигунів.

Серія перетворювачів частоти Altivar71 призначена для двигунів потужністю від 0,37 до 630 кВт. Перетворювачі частоти мають перехідний момент – 220% протягом 2 сек, 170% номінального моменту двигуна протягом 60 с. Основні особливості Altivar71:

- простота програмування і введення в експлуатацію;
- вбудована функція керування моментом двигуна;
- вбудований набір мікропрограм для різних застосувань;

– вбудована функція керуванням гальмом двигуна.

Режими роботи Altivar71, закони керування реалізовані в перетворювачем частоти:

Керування асинхронним двигуном:

- векторне керування потоку і по напрузі;
- закон залежності напруга/частота за двома або п'яти точках;
- векторний без датчика зворотного зв'язку по швидкості;
- векторний з датчиком зворотного зв'язку по швидкості;
- система адаптації потужності;

Для синхронного двигуна:

- векторне керування в розімкнутій системі.

2.9 Принцип частотного керування

Принцип частотного методу керування швидкістю АД полягає в зміні частоти живлення асинхронного двигуна. Якщо не враховувати падінням напруги в ланцюзі статора, то можна вважати, що напруга на обмотці статора дорівнює ЕРС. Змінюючи частоту f_1 напруги живлення, можна відповідно до вираження (2.1) незмінному числі пар полюсів p змінювати швидкість (кутову) обертання магнітного поля статора.

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}; \quad (2.1)$$

де: f – частота напруги живлення;

p – кількість пар полюсів двигуна.

Цей спосіб дає плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні. Регулювання швидкості не супроводжується збільшенням ковзання асинхронного двигуна, тому втрати потужності при регулюванні невеликі.

2.10 Програмування перетворювачів частоти

Програмування перетворювача частоти, пристосування його до певної задачі виробляють шляхом зміни його параметрів, що налаштовуються. Кожен з таких параметрів і має код, ім'я та ряд значень. Ім'я (наприклад, [Acceleration2]) використовується при програмуванні з графічного терміналу. Код складається з декількох символів (не більше 4 латинські літери та цифри) і застосовується при програмуванні з терміналу, вбудованого в ПЧ. Присвоєння параметру потрібного значення і є змістом програмування.

Параметри, як і їх значення, можуть бути різного типу:

- цифровими (значення максимальної частоти HSP = 60 Гц);
- текстовими (FAILidOnE).

Параметри для доступу впорядковані в тематичні меню і підменю.

Деякі параметри одночасно присутні в декількох меню. Сукупність декількох тематично близьких параметрів, що реалізують деяку прикладну задачу (керування електромагнітним гальмом, перемикання темпів і т.п.) називають функцією. Деякі параметри, які реалізують функцію, розміщуються в підменю і стають доступними тільки після її активізації. Оскільки в експлуатації можуть перебувати перетворювачі частоти як з англійськими, так і русифікованими графічними терміналами, а також з вбудованим терміналом, прийняті наступні правила написання імен та кодів меню (параметрів), а також значень останніх:

- ім'я меню (підменю) графічного терміналу дається в квадратних дужках і пишеться великими англійськими або російськими літерами (наприклад, [1.4 MOTOR CONTROL], [1.4 КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ]);

- коди меню і параметри вбудованого терміналу даються без дужок англійськими літерами у вигляді, наближеному до індикації на терміналі, причому код меню завжди закінчується тире (наприклад, drC – для меню і SFr – для параметра);

– ім'я та текстове значення параметра на графічному терміналі дається в квадратних дужках курсивними англійськими або російськими літерами (наприклад, [Ratedmotorpower] або [ТАК]);

– текстове значення параметра на вбудованому терміналі дається без дужок англійськими літерами у вигляді, максимально наближеному до індикації на терміналі (наприклад, PEnd, dOnE);

– при згадці імен меню або параметрів їх коди, а також англійські та російські версії зазвичай даються через кому;

– у виразах типу [Авто-налаштування] = [НІ], [Standardmot. freq] = [50 Hz], tUn = YES зліва від знака рівності знаходиться ім'я параметра, праворуч – присвоєне йому значення. Деякі параметри змінюються автоматично і служать лише для читання. Частина параметрів можна змінювати при обертвовому двигуні, інші – тільки при нерухомому. Сукупність значень параметрів утворює конфігурацію ПЧ. Її можна зберегти для подальшого використання. Кожен з параметрів має значення за замовчуванням. Деякі параметри пов'язані один з одним. Внаслідок цього окремі параметри можуть стати доступними тільки при певних значеннях іншого. Крім того, в ряді випадків зміна одного параметра може змінити значення іншого. Зміна параметрів можливо за допомогою таких засобів:

- вбудованого чотири-розрядного терміналу;
- людино-машинного інтерфейсу (графічної панелі програмування), що підключається ззовні;
- комунікаційної мережі: ModBus, CANOpen і ін.;
- персонального комп'ютера. Залежно від кваліфікації користувача можливі 4 рівня доступу до параметрів:
 - базовий ([Basic], bAS – доступ до деяких найбільш вживаним меню і підменю, призначення тільки однієї функції для програмованого входу;
 - стандартний ([Standard], StD – доступ до всіх меню і підменю, призначення тільки однієї функції для програмованого входу (рівень доступу за замовчуванням));

– розширений ([Advansed], AdU) – доступ до всіх меню і підменю, призначення декількох функцій для кожного входу;

– експертний ([Expert], EPr – доступ до всіх меню і підменю, а також до додаткових параметрів, призначення декількох функцій для кожного входу.

У запропонованому варіанті стенду обидва перетворювача частоти зроблені однією фірмою проте є деякі відмінності керування . Перетворювач частоти Altivar71 має керування з'ємного графічного терміналу, який може бути встановлений безпосередньо на лицьовій панелі перетворювача частоти (над вбудованим терміналом) або винесено на дверцята шафи. Він дозволяє:

- налаштувати перетворювач і керувати ним;
- відображати поточний стан перетворювача частоти;
- зберігати і відновлювати інформацію в незалежній пам'яті терміналу;
- переносити налаштування з одного ПЧ на інший.



Рисунок 2.15 – Графічний термінал

На терміналі (рис.2.15) розташовані:

- графічний дисплей;
- функціональні кнопки F1, F2, F3, F4;
- кнопка STOP/RESET для зупинки приводу або скидання несправності;
- кнопка RUN для запуску приводу;
- кнопка ESC для відмови поточного значення параметра або поточного меню і повернення до попереднього вибору;
- кнопка FWD/REV для зміни напрямку обертання приводу;

– навігаційна рукоятка для зміни значення раніше обраного параметра, переходу від рядка до рядка меню, зміни рівня завдання при керуванні з терміналу (обертання +/-), а також для збереження поточного значення параметра або входу в обране раніше меню або параметр (натискання, ENT).

Восьми рядковий графічний дисплей (рис.2.15) при заводському налаштуванні відображає:

У рядку 1 (рядку стану):

1) код стану ПЧ;

2) активізований канал керування: Term (клемник логічних і аналогових входів); НМІ (людино машинний інтерфейс); MDB (вбудований ModBus); CAN (вбудований CANopen); NET (комунікаційна карта); APP (програмована карта вбудованого контролера);

3) поточна задана частота;

4) поточний струм двигуна;

У рядку 2 – ім'я поточного меню, підменю або параметра;

У рядках 3...7 (екран відображення) – вміст поточного меню (підменю), значення поточного параметра, заданих параметрів відображення);

У рядку 8 (рядок підказок) – підказки про поточні функції функціональних кнопок.

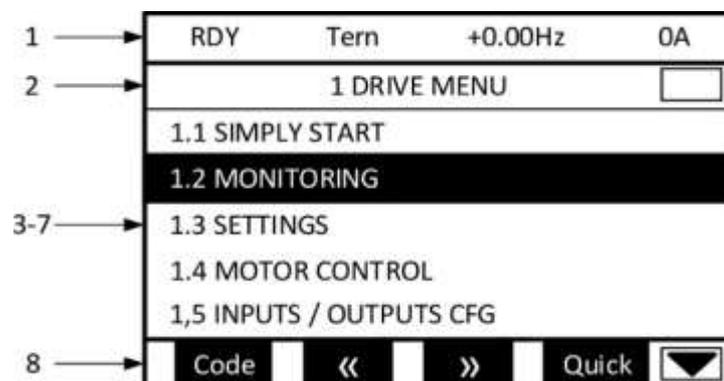


Рисунок 2.16 – Графічний дисплей

Алгоритм налаштування законів керування за допомогою графічного дисплея приведений на рисунку 2.17.

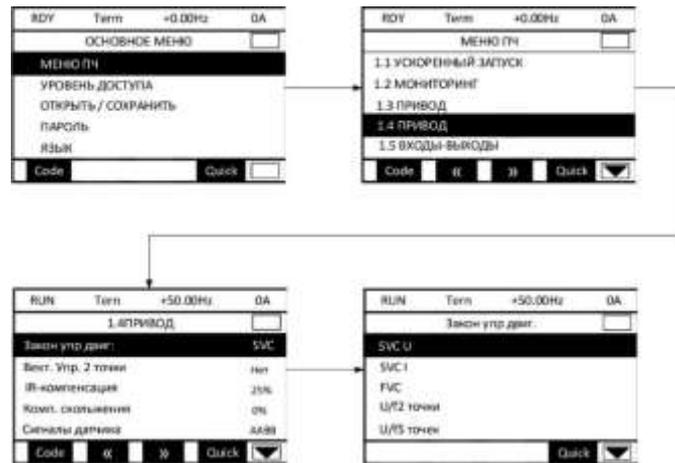


Рисунок 2.17 – Приклад вибору закону керування Altivar71

Таким чином можна вибрати наступні закони керування:

SVCU – векторне керування по напрузі;

SVCI – векторне керування по струму;

FVC – векторне керування з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю;

U/f₂ точки – скалярне керування по 2 точкам;

U/f₅ точок – скалярне керування по 5 точкам;

Перетворювач частоти Altivar32 має керування з вбудованого терміналу (рис. 2.18).

Вбудований термінал включає в себе: 1 клавіша ESC, використовується для навігації по меню (повернення) і налаштування параметрів відмову. 2 Навігаційна клавіша використовується для навігації по меню (вгору або вниз) і налаштування параметрів (збільшення або зменшення значень, або вибору параметрів). 3 Кнопка Enter натискання на навігатор використовується для навігації по меню (наступний) і використовується для підтвердження вибору.

Чотирьох сегментний дисплей надає користувачеві необхідну інформацію для програмування і виведення інформації про стан перетворювача частоти. Керування з вбудованого терміналу здійснюється відповідно до структурного меню (рис. 2.19).

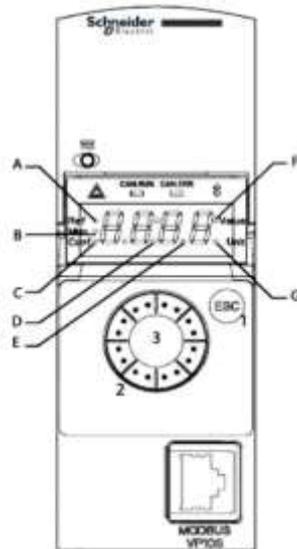


Рисунок 2.18 – Вбудований термінал

A – обраний режим завдання швидкості; B – обраний режим моніторингу; C – обраний режим конфігурації; D – десяткова точка для відображення режимів параметрів 1/100 значення; E – десяткова точка для відображення режимів параметрів 1/10 значення; F – поточне значення відображуваного параметра; G – одиниці відображення змінюваного параметра

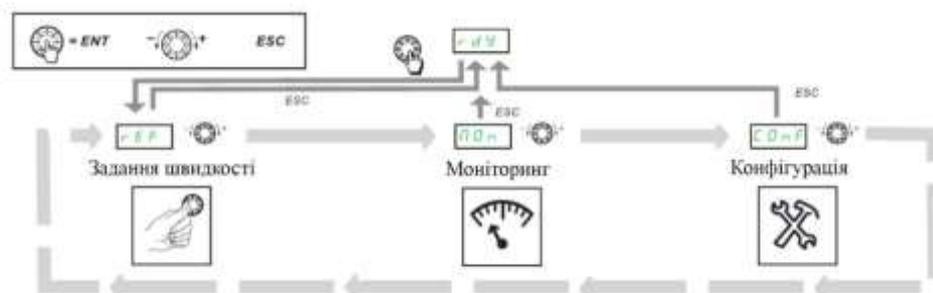


Рисунок 2.19 – Структура меню

На прикладі було розглянуто вибір закону керування перетворювача (рис.2.20).



Рисунок 2.20 – Приклад вибору закону керування

UUC – векторне керування по напрузі; Std – скалярне керування по 2 точкам; UF5– скалярне керування по 5 точкам; Syn – керування синхронним двигуном; Ufa – U/F квадратичний закон; hLd – енергозберігаючий закон

Незважаючи на те, що обидва перетворювача випущені однією фірмою і мають схожість в алгоритмах керування, при цьому вони мають відмінності в законах керування. Altivar 71 реалізує векторне керування по струму і векторне керування з датчиком зворотного зв'язку за швидкістю, які відсутні в Altivar 32, але проте, Altivar 32 реалізує квадратичний закон U/F і енергозберігаючий закон, що відсутній в Altivar 71.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Дослідження роботи частотно-керованого асинхронного електропривода без навантаження

На установці імітувались різні навантажувальні режими роботи АД при бездатчиковому векторному керуванні: під навантаженням, і без нього, при частоті 10 Гц, 30 Гц, 50 Гц.

Знято також осцилограми струму двигуна при роботі в режимі під навантаженням і на холостому ході.

1. На даних дослідів зображені й описані діаграми без навантаження.

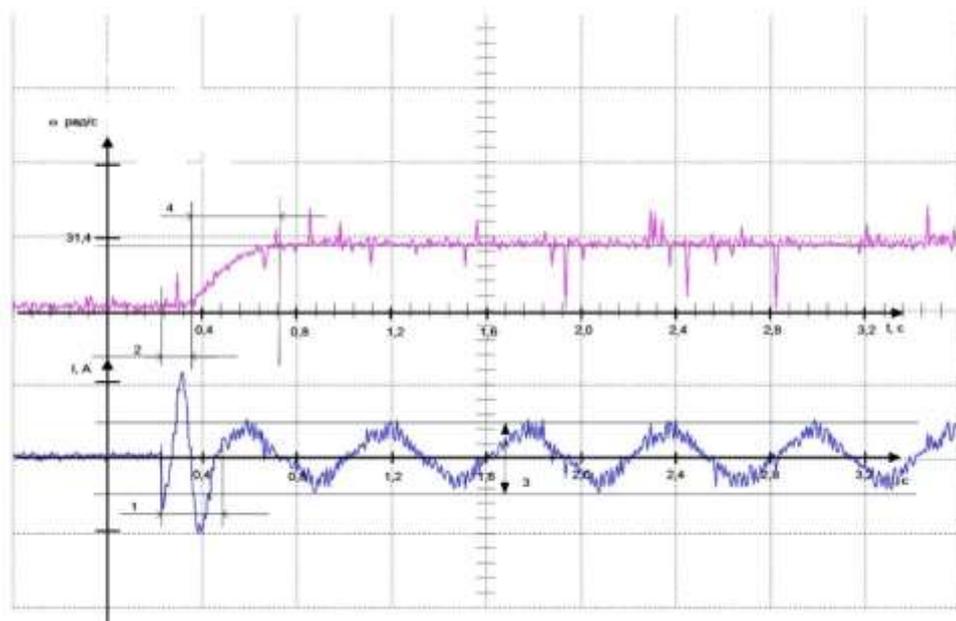


Рисунок 3.1 – Осцилограма розгін 10 Гц

На рисунку 3.1 ми бачимо розгін до 10 Гц.

На осцилограмі показані початкові пускові струми (1), на верхній вісі (2) ми бачимо пуск (поштовх) двигуна; і як збільшується швидкість до номінальної швидкості (4), при частоті 10 Гц. (3) нам показує робочий струм на холостому ході, що дорівнює 0,5 А. При подачі напруги на статор частотою 10 Гц швидкість повинна складати:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 10}{2}; \quad (3.1)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10}{2} = 31,4 \text{ рад / с.}$$

Різниця швидкостей ротора та змінного потоку і буде частотою струму ротора, що дорівнює $f = 2,0$ Гц.

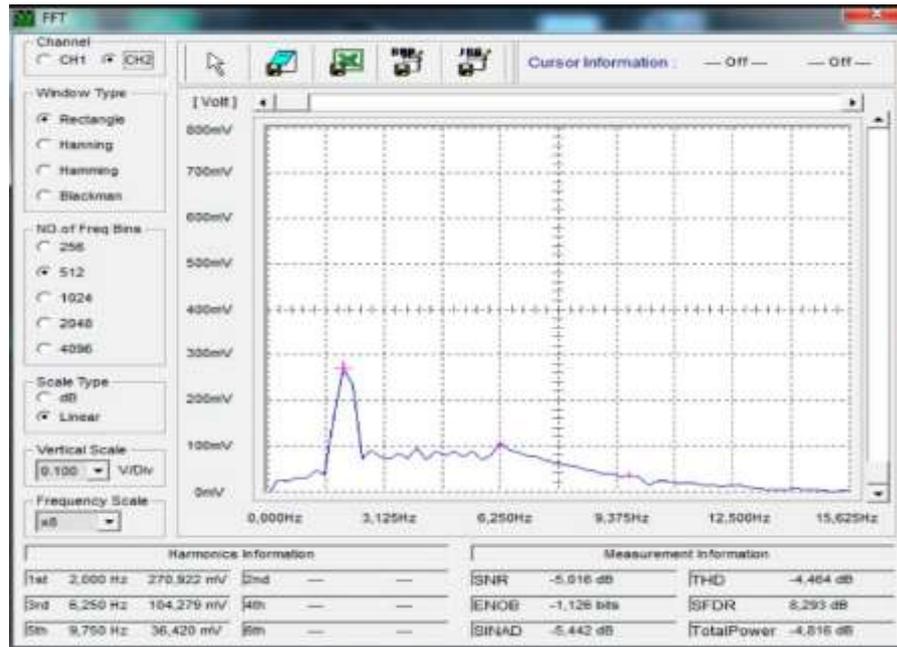


Рисунок 3.2 – Спектр

На графіку 3.2 представлені спектр струму двигуна при роботі без навантаження.

Спектральний аналіз дозволяє оцінити стрибок амплітуди усталеного значення, а також при набірні навантаження до номінальної швидкості і показує холостий хід. На графіку наведено три основні гармоніки: 1 - а 2,0 Гц, що має амплітуду 270,922 мВ, 2 - а 6,25 при 104,279 мВ, 3 - а відповідно 9,75 при 36,420 мВ. Також ми бачимо незначні низькочастотні гармоніки рівні частоті 3,906 Гц і напрузі 100 мВ. Переведемо гармоніки в відносні одиниці:

3-тя гармоніка

$$\frac{104,279}{270,922} = 0,38 \text{ в.о.} \quad (3.2)$$

5-я =0,13в.е.

Низькочастотна гармоніка 0,01в.о.

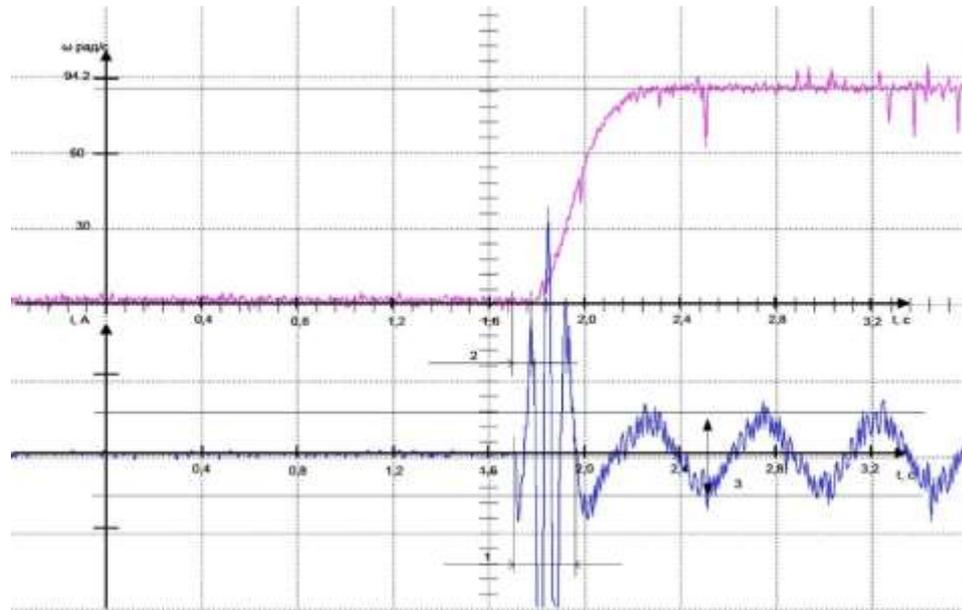


Рисунок 3.3 – Осцилограма розгін до 30 Гц

На рисунку 3.3 ми бачимо пускові струми (1), а також збільшення амплітуди струму. При подачі напруги на статор частотою 30 Гц швидкість холостого ходу:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 30}{2}; \quad (3.3)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2} = 94,2 \text{ рад / с.}$$

Після, ми бачимо вже усталений режим холостого ходу (3) рівний 0,6 А.

На спектральному аналізі, який показаний на графіку 3.4, видно незначний стрибок амплітуди рівний 2,25 Гц і відповідно збільшення низькочастотних гармонік рівним 3Гц і 115 мВ (0,31 в.о.) відповідно.

3-а гармоніка =0,28 в.о.

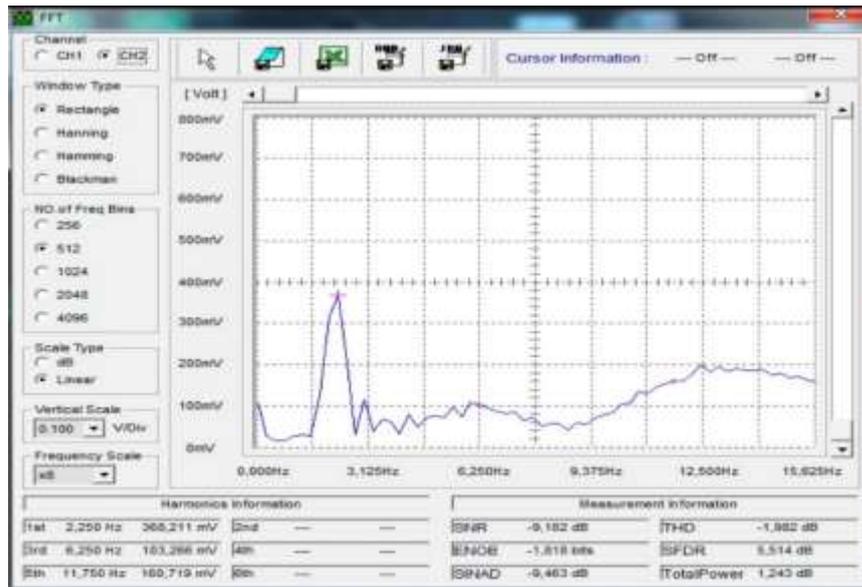


Рисунок 3.4 – Спектр

5-a=0,43 в.о.

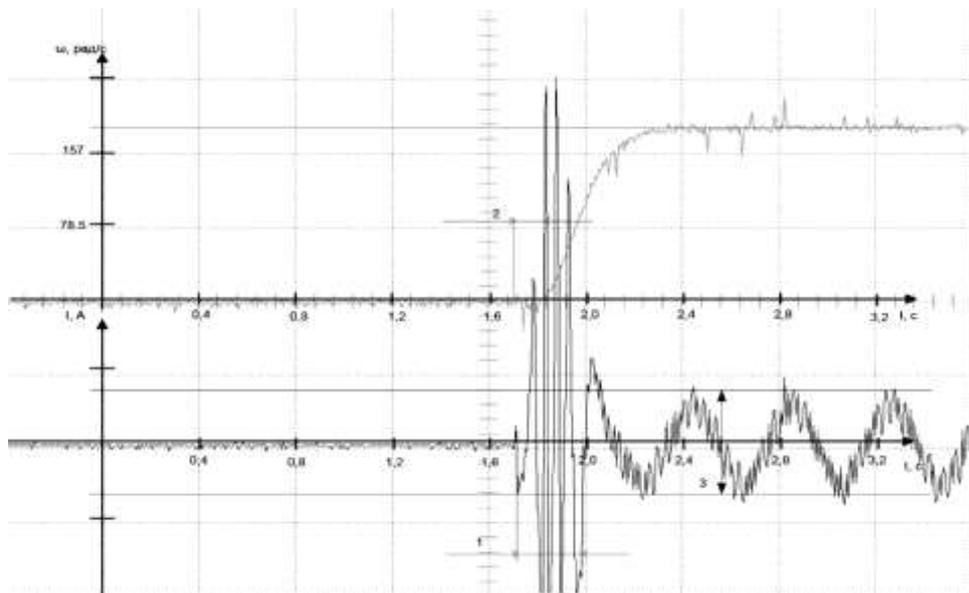


Рисунок 3.5– Осцилограма розгін до 50 Гц

На заключному рисунку 3.5, при частоті 50 Гц ми побачили різке збільшення амплітуди пускових струмів (1). При подачі напруги на статор частоти 50 Гц швидкість холостого ходу дорівнює:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 50}{2}; \quad (3.4)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад / с.}$$

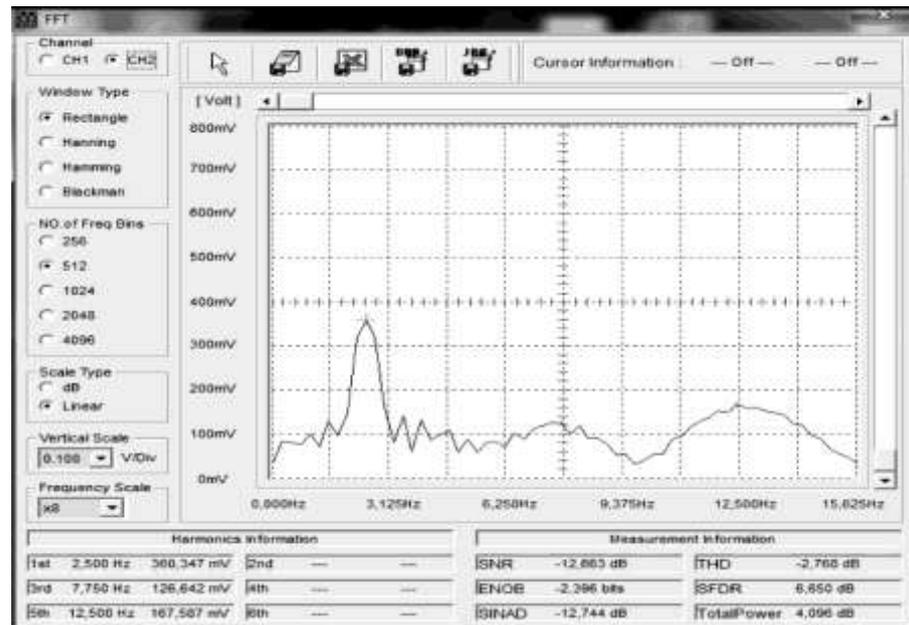


Рисунок 3.6 – Спектр

Після, ми бачимо вже усталений режим холостого ходу (3) рівний 0,7 А. На осцилограмі основна гармоніка дорівнює 2,5 Гц при 360,347 мВ відповідно. Спектральний аналіз показаний на рисунку 3.6 показує нам частоту 3 - і гармоніки 7,75 Гц при 126,642 мВ (0,35 в.о.), 5 - і 12,5 Гц при 167,587 мВ (0,46 в.о.), і збільшення низькочастотних гармонік 2,9 Гц при 140 мВ. (0,38 в.о.).

3.2 Дослідження роботи частотно-керованого асинхронного електропривода з навантаженням

На даних досліджах зображені й описані діаграми з навантаженням. На рисунку 3.7 ми бачимо роботу двигуна на холостому ходу при частоті статора 10 Гц і переходом з накидом навантаження 10 Гц. Осцилограма показує, що на нижній вісі показані струми ротора на холостому ходу (1) рівні 0,5 А, після накидання навантаження амплітуда струму в момент накиду починає зростати (2) до 2А. На верхній вісі в момент накиду навантаження ми бачимо, що двигун

зупиняється, швидкість падає до нуля (3), переходячи в подальшому в трансформаторний режим.

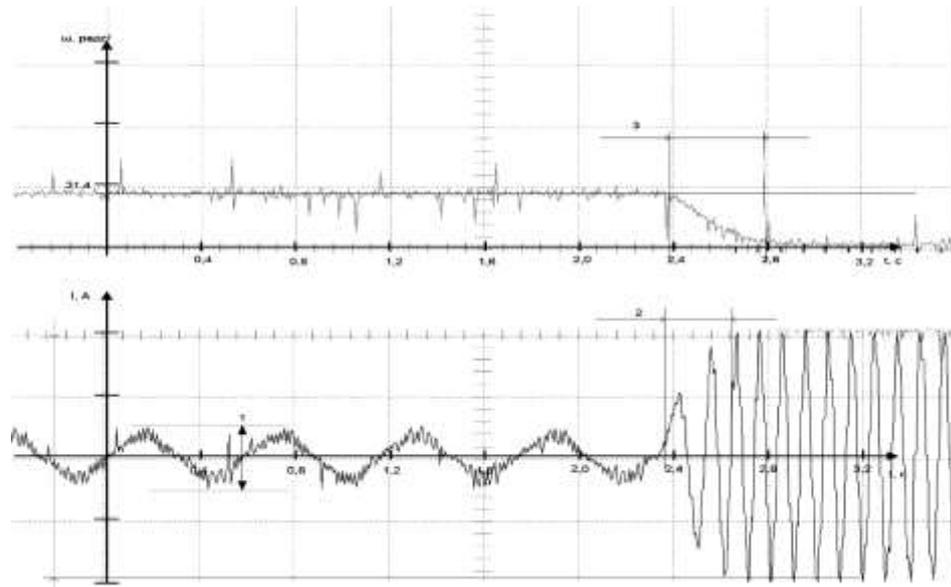


Рисунок 3.7 – Осцилограма з навантаженням 10 Гц

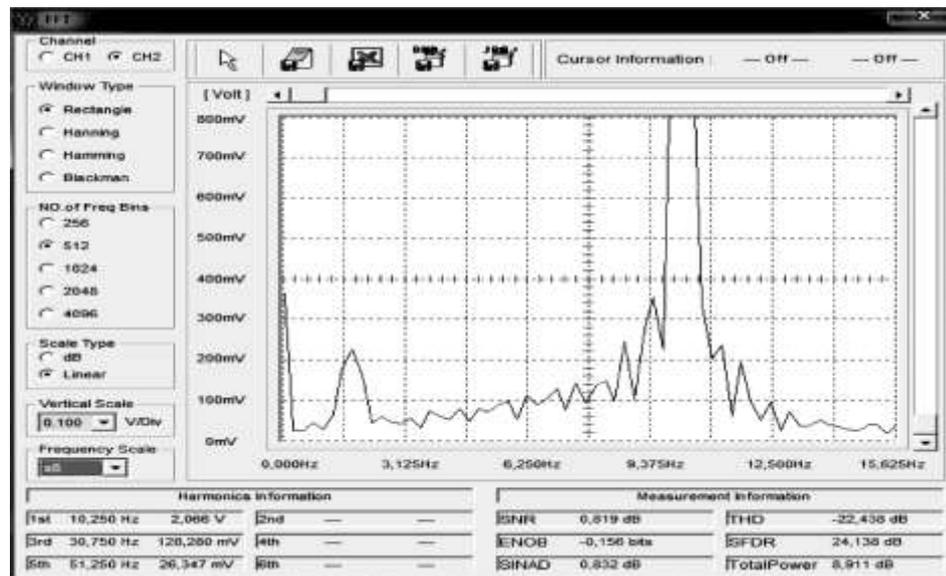


Рисунок 3.8 – Спектр

На спектральному аналізі показано, що на холостому ходу присутня велика кількість низькочастотних гармонік. При набиранні навантаження відбувається великий стрибок напруги до значення 2,066 В. Перед навантаженням можна побачити підвищений стрибок амплітуди, що є піком

низькочастотних гармонік 9,375 Гц при 340 мВ, 8,593 Гц при 240 мВ відповідно. Переведемо також гармоніки в відносні одиниці:

$$3\text{-тя} = 0,062 \text{ в.о.}$$

$$5\text{-а} = 0,012 \text{ в.о.}$$

$$\text{Низькочастотна} = 0,11 \text{ в.о.}$$

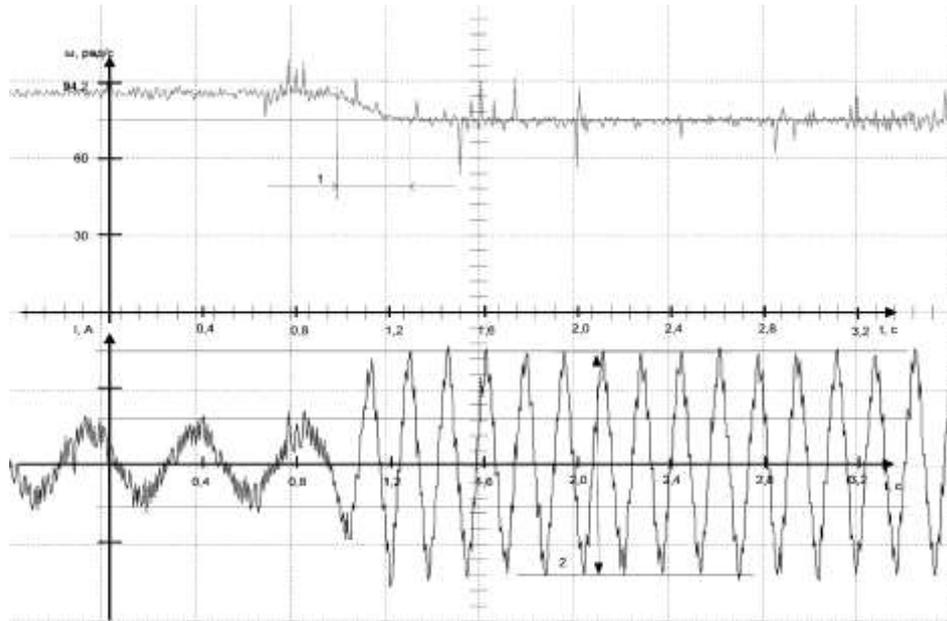


Рисунок 3.9 – Осцилограма з навантаженням 30 Гц

На рисунку 3.9 бачимо роботу холостого ходу двигуна при частоті 30 Гц, і накидом навантаження. Перехідний процес проходить плавно (1). Час переходу не змінюється. На нижній вісі ми бачимо збільшення амплітуди струму усталеного режиму 1,5 А (2),. При подачі напруги на статор швидкість становить:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 30}{2}; \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2} = 94,2 \text{ рад / с.}$$

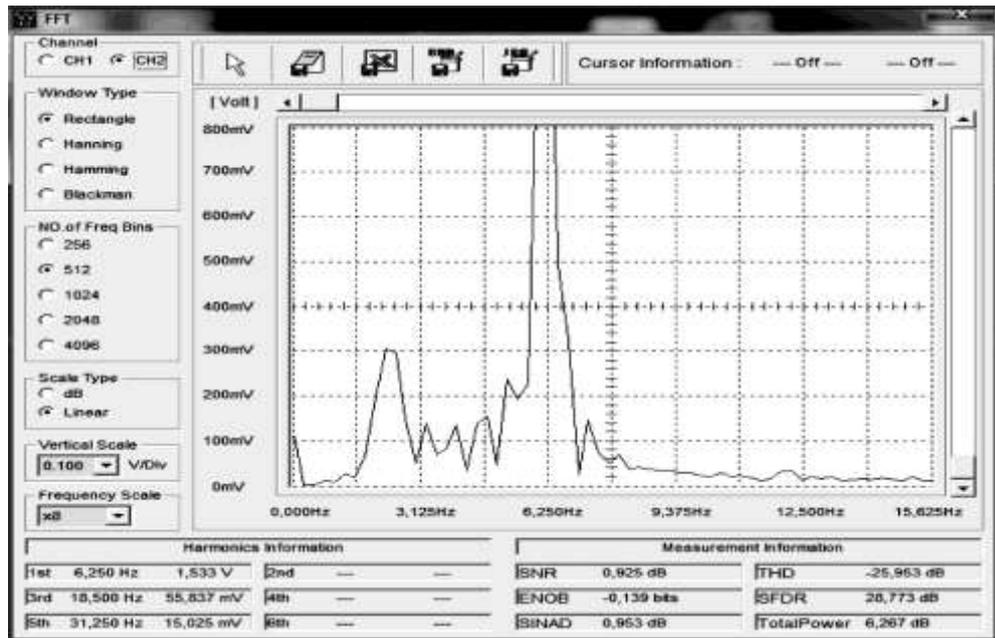


Рисунок 3.10 – Спектр

Спектральний аналіз показує нам більш високі низькочастотні гармоніки на холостому ходу до накидання навантаження, яскраво виражені амплітуди рівні 5,468 Гц і 230 мВ (0,03 в.о.), 4,687 Гц – 150 мВ (0,097 в.о.), 3,135 Гц – 140 мВ (0,091 в.о.). При набиранні навантаження напруга зростає до 1,533 В, після чого низькочастотних гармонік стає менше.

3-тя = 0,03 в.о. 5-а = 0,009 в.о.

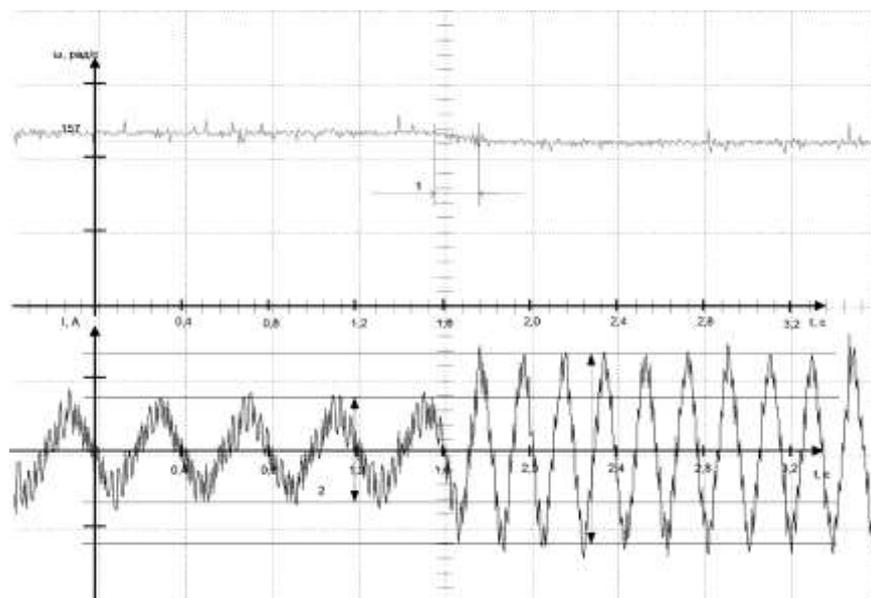


Рисунок 3.11 – З навантаженням 50 Гц

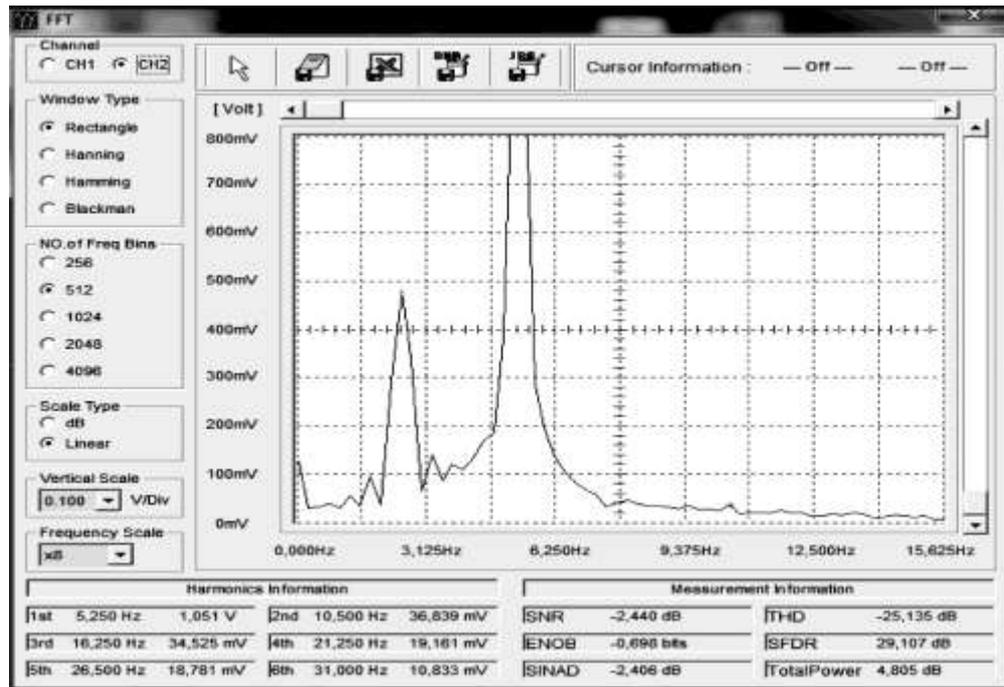


Рисунок 3.12 – Спектр

На заключному рисунку зображена діаграма холостого ходу двигуна з навантаженням 50 Гц. Перехідний процес практично мінімальний (1). На нижній вісі, в момент накиду навантаження амплітуда струму дорівнює 0,6 А (2), збільшується і стає рівною 1,4А (3).

Спектральний аналіз показує стрибок амплітуди холостого ходу двигуна рівний 50 Гц 2,343 і 480мВ. При набиранні навантаження напруга збільшується до 1,051 В. В проміжку між холостим ходом і навантаженням видна лише одна низькочастотна гармоніка 3,3 Гц і 130 мВ (0,12 в.о.).

Після чого низькочастотні гармоніки практично відсутні.

3-тя гармоніка = 0,03 в.о.

5-а = 0,01 в.о.

Таблиця 3.1 – Зведені характеристики основних і низькочастотних гармонік і їх амплітуди без навантаження

Найменування показника			Величина		
			10Гц	30Гц	50Гц
Без навантаження	1-а гармоніка	Частота (Гц)	2,0	2,25	2,5
		Амплітуда (МВ)	270,922	368,211	126,642
	3-а гармоніка	Частота (Гц)	6,25	6,25	7,75
		Амплітуда (в.о.)	0,38	0,28	0,35
	5-а гармоніка	Частота (Гц)	9,75	11,75	12,5
		Амплітуда (в.о.)	0,13	0,43	0,46
	Низько частотні гармоніки	Частота (Гц)	3,906	3,0	2,9
		Амплітуда (в.о.)	0,01	0,3	0,38

Таблиця 3.2 – Зведені характеристики основних і низькочастотних гармонік і їх амплітуди з навантаженням

Найменування показника			Величина		
			10Гц	30Гц	50Гц
З навантаженням	1-а гармоніка	Частота (Гц)	10,25	6,25	5,25
		Амплітуда (В)	2,066	1,533	1,051
	3-а гармоніка	Частота (Гц)	30,75	18,5	16,25
		Амплітуда (в.о.)	0,062	0,03	0,03
	5-а гармоніка	Частота (Гц)	51,250	31,25	26,5
		Амплітуда (в.о.)	0,012	0,009	0,01
	Низько частотні гармоніки	Частота (Гц)	8,593	5,468	3,3
		Амплітуда (в.о.)	0,11	0,15	0,12
		Частота (Гц)		4,687	
		Амплітуда (в.о.)		0,097	
		Частота (Гц)		3,135	
		Амплітуда(в.о.)		0,091	

Таблиця 3.3 – Порівняльна основна і низькочастотна гармоніка для скалярного керування без навантаження

Найменування показника			Величина		
			10Гц	30Гц	50Гц
Без навантаження	1-а гармоніка	Частота (Гц)	1,75	1,75	1,75
		Амплітуда (мВ)	222,764	282,621	344,398
	Низькочастотні гармоніки	Частота (Гц)	2,78	2,73	3,51
		Амплітуда (в.о.)	0,42	0,25	0,4

Таблиці 3.4 – Порівняльна основна і низькочастотна гармоніка для скалярного керування з навантаженням

Найменування показника			Величина		
			10Гц	30Гц	50Гц
З навантаженням	1-а гармоніка	Частота (Гц)	10,0	4,75	4,0
		Амплітуда (мВ)	1566	821,848	911,097
	Низькочастотні гармоніки	Частота (Гц)	7,42	2,34	2,73
		Амплітуда (в.о.)	0,12	0,14	0,21
		Частота (Гц)	8,53	3,51	3,51
		Амплітуда (в.о.)	0,17	0,17	0,24
		Частота (Гц)	9,18	3,9	
		Амплітуда (в.о.)	0,26	0,26	

ВИСНОВОК

Аналіз розгону приводу на холостому ході на частоті відповідних 30 Гц – 94 рад/с показує, що векторне розімкнуте керування і векторне замкнуте по швидкості практично ідентичні, мають однаковий час перехідного процесу 0,6 сек., однакову частоту усталеного ротора струму 2,25 Гц. Схожі спектри в діапазоні від 6 до 15 Гц (у системи з датчиком швидкості максимальне значення в цій області доводиться на 9,5 Гц, а в системі без датчика керування на 13–14 Гц). Пускові струми в системі без датчика векторного керування на 30% більше. При цьому в системі з датчиком швидкості, швидкість обертання строго дорівнює завданням. При скалярному керуванні частота усталеного роторного струму 1,75 Гц, час розгону 0,4 сек., спектр не містить збільшення від 9 до 15 Гц. Від сюди випливає, що при розгонах, скалярне керування ефективніше векторних, застосовуваних перетворювачів ATV 71.

Аналіз роботи під навантаженням. Досліджувався режим роботи при набиранні навантаження на частоті обертання відповідно 30 Гц. Умова експерименту, початкова швидкість 0,5 А, кінцева швидкість усталеного режиму 1,5 А. Час перехідного процесу 0,6 сек. Аналіз спектральних складових векторний без датчика керування максимальна складова струму ротора має частоту 6,25 Гц, напруга 1,53 В, а система з датчиком має частоту усталеного роторного струму 8,75 Гц., напруга 1,9 В. Скалярне керування має максимальне значення при частоті 4,75 Гц. і відповідно напруга 821 мВ. У діапазоні від 2 - х до 4 - х Гц всі системи мають багато-пікові спектри, дещо менші при скалярному керуванні.

Частота роторного струму в сталому режимі дуже наочно свідчить про ефективність алгоритму. Велика частота роторного струму відповідає більшому ковзанню. Найбільша частота роторного струму в нашому випадку у векторного керування з датчиком швидкості 8,75 Гц. проти 6,25 без датчика керування і 4,75 у скалярного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Волович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств/ Г.И. Волович. – 3-е изд. – М.: Додэка-XXI, –2011. – 235с.
2. Вальков В.М., Вертин В.Е. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. М.: «Госстройиздат», 2005, с. 295.
3. Галай М. В. Імпульсні, цифрові та релейні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, 2002. – 222 с.
4. Галай М. В. Лінійні неперервні системи автоматичного керування: навчальний посібник: – Полтава: ПолтНТУ, 2001. – 140 с.
5. Гончар В.Ф., Тищенко Л.П. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. – К.: Вища школа, 1989. – 343 с.
6. Гончар В.Ф. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. – К.: Вища школа, 1985. – 208 с.
7. Зайцев, Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования: учебное пособие для студентов вузов/ Г.Ф. Зайцев. - 2-е изд. перераб. И доп. – Киев: Выща школа, –1988. – 431 с.
8. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы системы: учебник для вузов/ Н.Н. Иващенко. -4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, –1978. – 736 с
9. Єлисовецький О.О., Патук І.І. Комп'ютеризований лабораторний стенд для дослідження характеристик синхронних машин. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 08–09 квітня. – Кременчук, 2010. – С. 125–126.
10. Казачковский Н.Н. Программирование преобразователя частоты *Altivar 71*/ Казачковский Н.Н. – Методические материалы: –Днепропетровск, 2007. – 105 с.

11. Прітченко О.В., Гаїбов Д.Х., Марченко С.В., Корогод Є.Г. Комп'ютеризований лабораторний комплекс по дослідженню регульованих замкнутих електроприводів змінного та постійного струму. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07–08 квітня. – Кременчук, 2011.– С. 49–50.
12. Лещук О.Ю., Хребтова О.А., Гладир А.І. Лабораторний комплекс для дослідження взаємопов'язаних частотно-регульованих електроприводів. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07–08 квітня. – Кременчук, 2011. – С. 113–114.
13. Панченко К.С., Артеменко А.Н. Компьютеризированный лабораторный стенд для исследования тягового электропривода постоянного тока. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Збірник наукових праць ІХ Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07–08 квітня. – Кременчук, 2011. – С. 129–130.
14. Тихонов О.Н., В.А. Олейников. Автоматическое управление технологическими процессами. // "Недра". – 1986.- С. 412.
15. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями.
16. Учебное пособие/ А.А. Усольцев – СПб: СПбГУ ИТМО, – 2006, – 94с.
17. *SchneiderElectric ATV71HU30M3* Технические характеристики продукта – 5 с.
18. *SchneiderElectric ATV32HU15M2* Технический паспорт продукта – 4с.
19. *SchneiderElectricAltivar 71* Краткое руководство пользователя – 28 с.
20. *SchneiderElectricAltivar 32* Руководство по программированию – 319с.

21. *SchneiderElectricAltivar 32* Руководство по установке – 51 с.
22. *SchneiderElectricAltivar 71* Руководство по установке – 49 с.
23. *SchneiderElectricAltivar 71* Руководство по программированию – 286с.
24. Шишов О. В., Современные технологии промышленной автоматизации: учебник / . Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – 273 с.
25. Шебітченко В. Г., Стрижеус Д. У Розрахунок статичних параметрів елементів автоматизованого електропривода: навчальний посібник: Полтава: ПОЛТНТУ, 2010. - 107 с.
26. Шебітченко В. Г., Шефер О. В., Бороздін М. К. Датчики й регулятори в автоматизованому електроприводі: навчальний посібник: Полтава: ПОЛТНТУ, 2011. - 88 с.
27. Шефер О. В., Скрильник О. М. Асинхронні машини: посібник із модуля "Асинхронні машини": Полтава, ПОЛТНТУ, 2008. - 183 с.
28. Щербина А.Н. Промышленные контроллеры. Программирование контроллеров Twido: учеб. пособие / А.Н. Щербина, И.А. Стариков – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2014.-197 с.

Додаток 1

SECTION 1 ANALYTICAL PART

1.1 The relevance of the introduction of modern control systems

At present, electric drive systems are firmly in the lead among drive devices and ensure uninterrupted and reliable operation of electric drives in many areas of human production and life. The introduction of new technologies, as well as the development and emergence of new devices and products in our time is inevitable. They facilitate various processes of our life. However, as well as everything new and unusual for us, these technologies need to be learned, and, as you know, the learning process is quite complex. This statement can be applied to software products and to various products and devices.

Asynchronous adjustable electric drive has recently become

increasingly common in various industries. Modern asynchronous electric drive is implemented on the basis of power semiconductor technology with the use of microprocessor control. Its capabilities allow you to organize the adjustment of the output coordinates of the electric drive in a wide range, with high speed and accuracy. At the moment, the software base at many enterprises is being intensively updated.

As a drive motor, the asynchronous motor has recently become the most widespread. It is known that an asynchronous is several times cheaper than a DC collector motor, has smaller dimensions, can be made at a significantly higher speed at the same power, reliable and easy to operate, as the motor rotor has no electrical contact (or sparks and does not require constant service).

Until now, the most common way to control the performance of such objects is the use of valves or control valves, but today it becomes available frequency control of an induction motor that drives, for example, the impeller of a pump unit, fan.

When using frequency converters, provides smooth regulation of the rotor speed, allows in most cases to abandon the use of gearboxes, variators, chokes and other equipment.

Recently, the adjustable asynchronous drive with frequency converters has undergone very significant changes in its development, this is primarily due to advances in power electronics and microprocessor technology, based on which frequency converters have been developed to control induction short-circuited motors. The high speed of information processing by modern processors has given impetus to the modernization of old and the development of new control algorithms for the system "frequency converter - induction motor" (inverter - AD).

To understand the issues related to the control of an induction motor,

as well as to achieve maximum efficiency in the use of inverter - AD systems, it is necessary to have a deep understanding of the physical phenomena in the motor, converter and the system as a whole.

In addition, to build energy-efficient systems, it is necessary to take into account the dynamic characteristics of the drive, which presents certain difficulties.

In vector control there are many positive aspects, but it has a number of problems - some of which are associated with the emergence of harmonics in the currents of the rotor and stator.

In order to confirm these features of the vector control system, it is necessary to understand the theory of vector control, develop a stand, and conduct experiments with asynchronous drive, including spectral analysis of rotor and stator currents.

1.2 Analysis of modern electric drive control systems

1.2.1 Scalar control

One way to control induction motors in speed-controlled electric drives is to apply the law $U / f = \text{const}$, which provides support for stator flux at the nominal level in the main speed range.

As the speed increases, the field weakens, and as the speed decreases, the overload capacity decreases.

If the control law $U / f = \text{const}$ is used in open systems, the angular speed of the induction motor when operating under load will differ from the set value by the slip frequency (slip frequency is equal to the circular electric frequency of the rotor current).

The advantages of these drives include their high stability. They work steadily even at critically low speeds, where vector control is unable to

maintain stability. Similarly, scalar control in itself is a simple device, also reliable and cheap to implement. During operation, you can connect any number of motors, and this will not affect the control.

There are several principles of simultaneous regulation of frequency and voltage.

Most often try to keep constant the overload capacity of the motor, to make so that in all modes the ratio of the maximum torque to the moment of resistance remains constant; $\lambda = M_n / M_s = \text{const}$. At a constant load moment $M_c = \text{const}$, the voltage on the stator must be regulated in proportion to the frequency.

The main application of scalar control is in drives that do not require dynamic characteristics of the system. One of the important advantages of the scalar method is the possibility of simultaneous control of a group of electric motors. Scalar control can be applied to most practical cases of using a frequency electric drive with a speed control range of up to 1:40.

To change the voltage frequency in the stator circuit of the motor include an inverter frequency converter (thyristor, transistor, electromachine), which allows when changing the input voltage control voltage U_{up} to change the voltage amplitude $U_1 = \text{var}$ at the inverter output at constant frequency. The change at the input of the frequency control voltage U_{uf} provides control of the frequency $f_1 = \text{var}$ at the output of the inverter at a constant amplitude U_1 .

It should not be forgotten that the expression for MK is obtained for the L-shaped substitution scheme with all its assumptions. Figure 1.1 shows the mechanical characteristics for the law $U_1 / f_1 = \text{const}$.

When the frequency changes, the characteristics move parallel to the natural mechanical characteristic, which resembles the regulation of the motor speed of independent excitation of alternating voltage. The gain on

the frequency kf for a simplified block diagram can be determined by the mechanical characteristics at $U1 = \text{const}$ $\omega_0 = \text{const}$.

$$k_f = \frac{\Delta M}{\Delta f_1} = \frac{M_s}{f_1 \cdot S_n} = \frac{M_s}{\alpha \cdot f_{1n} \cdot S_n}; \quad (1.1)$$

where: $\alpha = f_1 / f_{1n}$ - frequency in v.o.

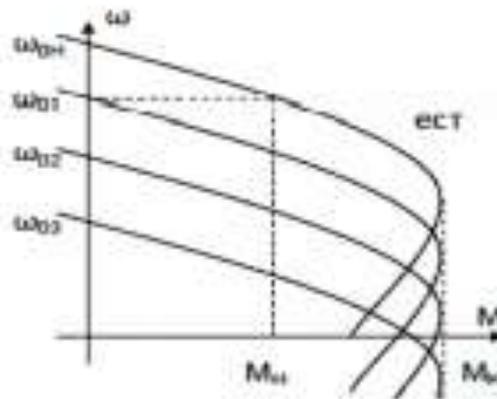


Figure 1.1 - Scheme and artificial mechanical characteristics at $f_1 = \text{var}$ $U1 = \text{const}$

$$\alpha S = \frac{f_1}{f_{1n}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0}{\omega_{0n}} \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{0n}}; \quad (1.2)$$

Absolute slip, which differs from relative slip s in that in the denominator instead of ω_0 , which changes at $f_1 = \text{var}$, appeared ω_{0n} , does not depend on the frequency. Absolute slip αs allows to estimate rigidity of mechanical characteristic, currents in a rotor circuit and in the closed systems will allow to solve some problems.

In order to understand the causes, advantages and disadvantages of vector control, you need to understand the theoretical provisions of system control.

Theoretical position of the vector control system BP

1.2.2 Vector control

A method of controlling AC motors that allows you to independently and with low inertia to adjust the speed and torque on the motor shaft.

The essence of vector control is to control not only the magnitude and frequency of the supply voltage, but also the phase.

In other words, the magnitude and angle of the spatial vector are controlled. Vector control in comparison with scalar possesses rather high productivity.

Vector control (as opposed to scalar control) is understood as the regulation of an electric motor, in which signals are produced on the basis of a mathematical model of the electric motor. The mathematical model must provide not only control by forming harmonic currents, but also control the magnetic flux of the rotor. In the literature, the process of vector control is often described as the process of interaction of the control device with the so-called "spatial vector" rotating with the frequency of the motor field.

Therefore, if in the control device (PU) to perform the inverse transformation e/φ_1 , which connects the components of the current i_{1d} and i_{1q} current coupling ψ_{2d} and the rotor frequency ω_2 . The input signals will be the coordinates that determine the electromagnetic moment of the BP. The element of the control device that implements the transfer functions $i_{1d} = F(\psi_{2d})$ and $i_{1q} = F(\omega_2, \psi_{2d})$ is usually called the coordinate decoupling unit (LC), because it generates signals corresponding to independent (resolved, separated) projections stator current vector. If використовувати ψ_{2d} and i_{1q} are used as input signals of the control unit.

According to the block diagram of Figure 1.2, it can be seen that the transfer function of the blocks connected between the points of the circuit by the corresponding flux signal and rotor frequency is equal to one ($\psi_{2d} = 2d; \omega_2 = 2$). It can also be noted that the control device of Figure 1.2 can perform its functions only the condition that the parameters of the BP included in the transfer function of its links correspond to the true values, otherwise there is a mismatch of coordinate systems of the engine and control device, which leads to loss of drive. The control system in Figure 1.2 provides for the formation of currents in the stator windings, which has the properties of a current source. However, in practice it is possible to use EMF or voltage sources. In fact, this applies only to the unit. When choosing for the PU the same input signals (ψ_{2d} and ω_2), it is obvious that the use of these functions is difficult and in practice errors in mathematical operations and deviations of the parameters of the BP from the values included in the transfer functions of the units will lead to complete inoperability of the device. The task can be facilitated if we take into account that the rotor AT has a very large electromagnetic time constant and its flux coupling can change only relatively slowly, ie $d\psi_{2d} / dt \approx$.

The block diagram of the control device in which these functions are implemented is more complex than the control device for the system with the formation of the stator current of the BP (Fig. 1. 2). In addition, it uses approximate expressions that introduce an error in dynamic modes. Therefore, it can be concluded that control systems with stator voltage generation are rarely used.

In modern practice of manufacturing control systems for electric motors using the principles of vector control, two main approaches to the implementation of vector control are considered. The first involves the use of a speed feedback sensor in the control circuit. The second involves control without a feedback sensor. The first option allows you to implement the most accurate in speed and torque control of electric motors. The second can be attractive due to the financial aspects.

Vector control of electric drives is now widespread in the industry. Currently, frequency converters implement motor control using vector control algorithms used for electric machine tools (CNC).

The practice of replacing DC machine drives with asynchronous electric motors with vector control has recently become increasingly popular.

For the machine park, the principle of vector control is usually implemented using feedback sensors.

Vector control systems without feedback sensors can be used in cases where it is necessary to provide a guaranteed significant torque on the shaft of an induction motor in the start-up mode. For example, such systems are used for submersible pumps in water supply systems. Vector-controlled frequency converters are produced by almost all major manufacturers of frequency converters. Among them are the Japanese firms Fuji, Omron, Schneider, and others.

1.2.3 Vector sensorless control

Vector sensorless control allows you to significantly increase the control range to 1: 1000 and above, the accuracy of speed control - up to hundredths of a percent, the accuracy of the moment - up to one percent.

In frequency - regulated asynchronous electric drives vector control is connected both with change of frequency and current values of variables (voltage, stator current, flux coupling), and with mutual orientation of their vectors in the Cartesian coordinate system.

Due to the regulation of both the amplitude values of the variables and the phase angles between their vectors, the highest quality control of the speed, torque and current of the induction motor is achieved, both in statics and dynamics.

In cases where the installation of the speed sensor is difficult - for example, when upgrading existing electric drive systems, or impossible due to the design features of the drive, a sensorless control system is used.

The algorithm of this control system is based on information coming only from the current and voltage sensors of the motor stator.

According to the measured stator currents and voltages can be calculated all the variables needed to build a control system. Such variables include the angle of rotation and the modulus of the flux coupling vector of the rotor. The vector module is used to organize the feedback in the flow control circuit of the rotor, and the angle of rotation is used to orient the rotating coordinate system. The impossibility of their direct measurement makes it necessary to form systems for calculating these coordinates on the basis of differential equations. The components of the spatial vectors of voltages and currents of the stator in the stationary coordinate system are considered as input parameters, and as the output

variables - the modulus of the flux coupling vector of the rotor and its angle of rotation in space relative to the stationary coordinate system.

Vector control, being a type of modal control, has all its advantages: modal SAC does not require stability testing, does not require the introduction of additional corrective devices; introduction of modal SS, by virtue of their inertia, does not increase the order of the object and does not violate its controllability and observation; relative simplicity and cost-effectiveness of technical implementation of modal SAC.

At the same time, due to the inaccuracy of the model, incorrect accounting of external perturbations and variable control parameters, it loses stability ("falls apart").

The class of control systems without the use of external speed feedback sensors is widely demanded due to the difficult operating conditions of some drives and the desire to increase the reliability of the electric drive while reducing its cost. Vector control is used when the load can change at the same frequency during operation, ie there is no clear relationship between load torque and speed, as well as in cases where it is necessary to obtain an extended range of frequency control at rated torques, for example, 0 ... 50 Hz for a moment of 100% from M_{nom} , it allows to increase control range, accuracy of adjustment, to increase speed of the electric drive. This method provides control of engine torque. The torque is determined by the stator current, which creates an exciting magnetic field. When directly controlling the torque, it is necessary to change in addition to the amplitude and phase of the stator current, ie the current vector. The vector method of control of the frequency converter carries out qualitative control of the electric motor, than scalar. Setting up such a converter requires more in-depth knowledge in the field of electric drive devices and electric machines.

Advantages of vector control:

- high accuracy of speed regulation;
- fast reaction to change of loading: at change of loading practically there is no change of speed;
- increased control range and control accuracy;
- Heating and magnetization losses are reduced.

The disadvantages of vector control include:

- the need to set the parameters of the motor (including R and L windings);
- great computational complexity;
- non-sinusoidal currents and voltages;
- it is impossible to control several engines;
- in case of incorrect parameters of conducting – there is a failure.

All electric machines work in a similar way. In the theory of electric drive, there is even the concept of "generalized electric machine", which reduces the work of others. In order to clarify the disadvantages, pros and cons of vector control, a stand was developed and spectral analysis was performed.

Spectral analysis of signals. Spectral analysis consists in the decomposition of a signal into its frequency or spectral components and the evaluation or measurement of their characteristics - amplitude, phase, power, power spectral density, etc.

The main methods of spectral analysis are filter (band analysis methods), without filter, parametric, current and variable analysis. The parameters of spectrum analyzers include: the number of analysis channels; observation time and number of samples or length of the processed implementation; analysis band not exceeding for the discrete

proportional to the analysis time and corresponding to the frequency difference of two adjacent allowed frequency components of the signal. Spectral analysis of stationary harmonic signals. The spectrum of the analog signal is concentrated in a limited frequency band and its parameters can be estimated using the spectral characteristics of the discrete equivalent, which is formed after the previous analog filtering at the ADC output.

Аналіз існуючих лабораторних стендів по дослідженню роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу



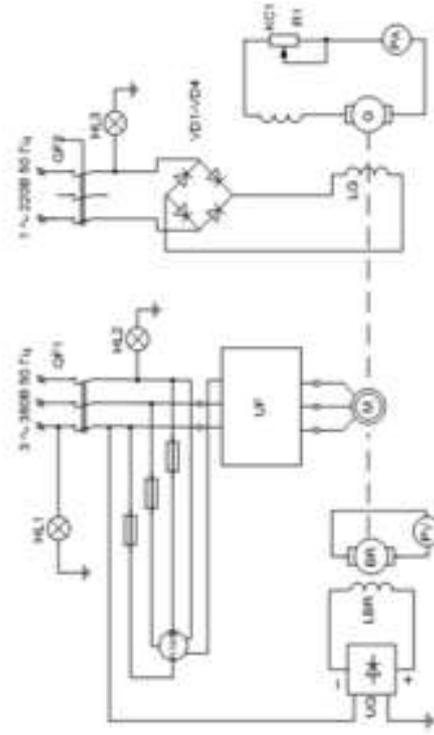
Дослідницький стенд №1



Дослідницький стенд №3

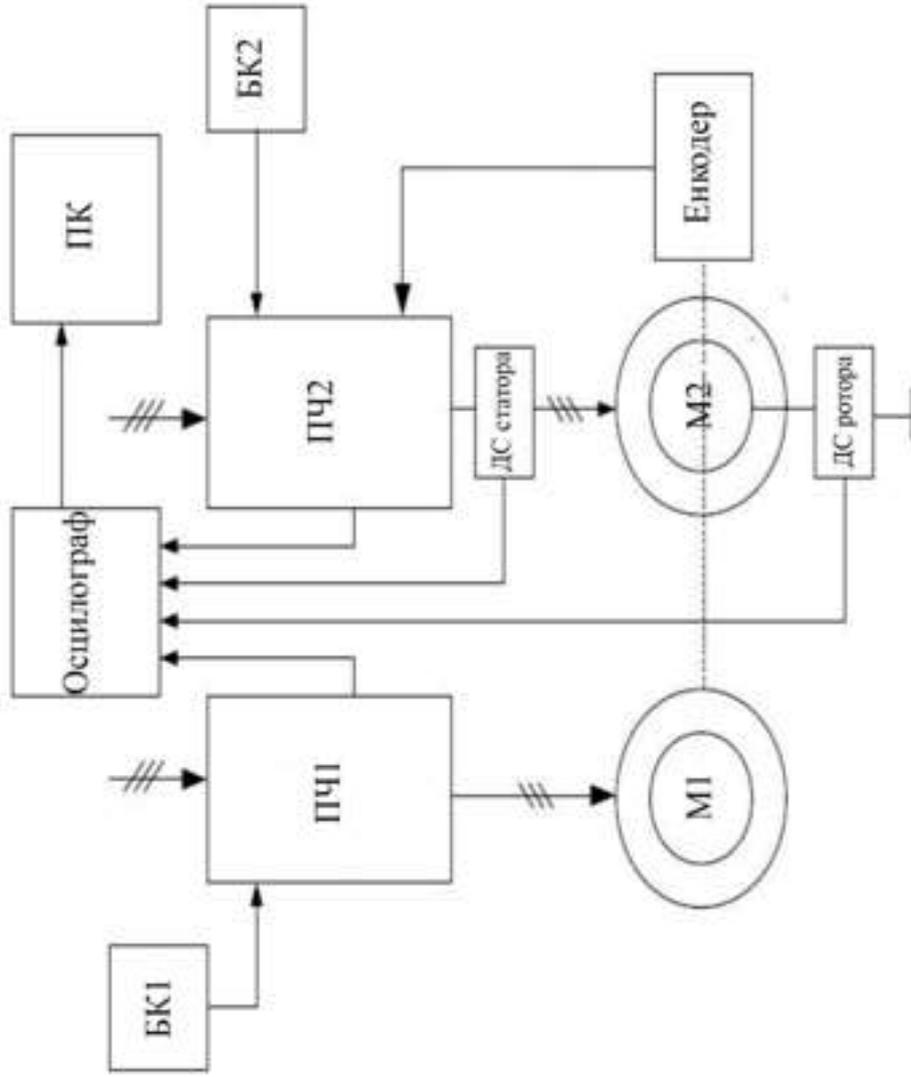


Дослідницький стенд №2



Дослідницький стенд №4

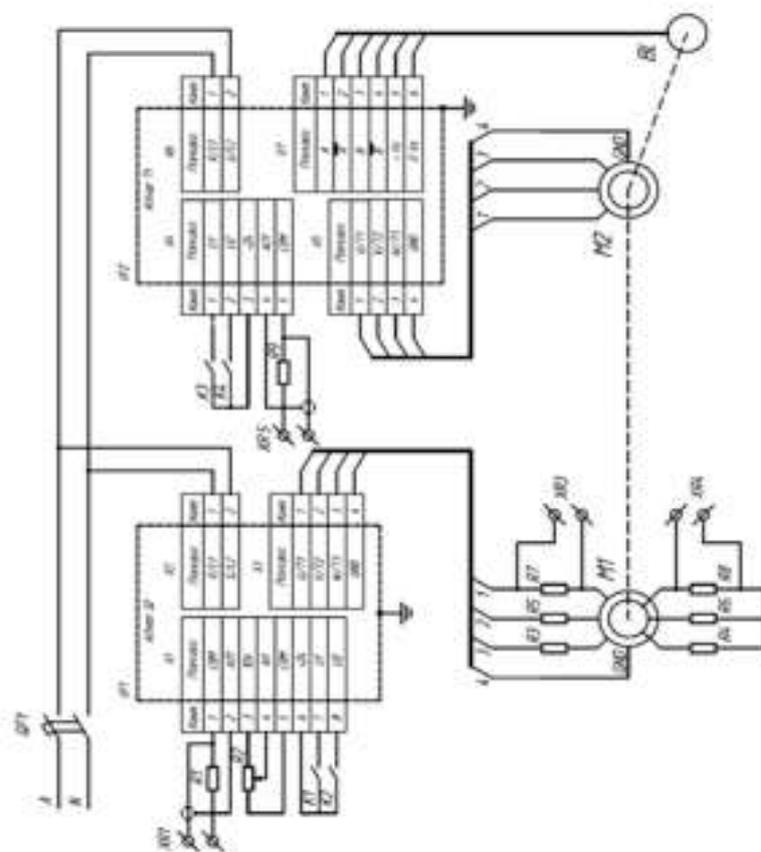
Функціональна схема розроблюваного стенду



М1 - короткозамкнений двигун; М2 - другий - двигун фазним ротором; ДСр, ДСст - датчики струму ротора і статора; ПЧ1, ПЧ2 - перетворювачі частоти; БК1, БК2 - блоки керування; ОС - осцилограф;

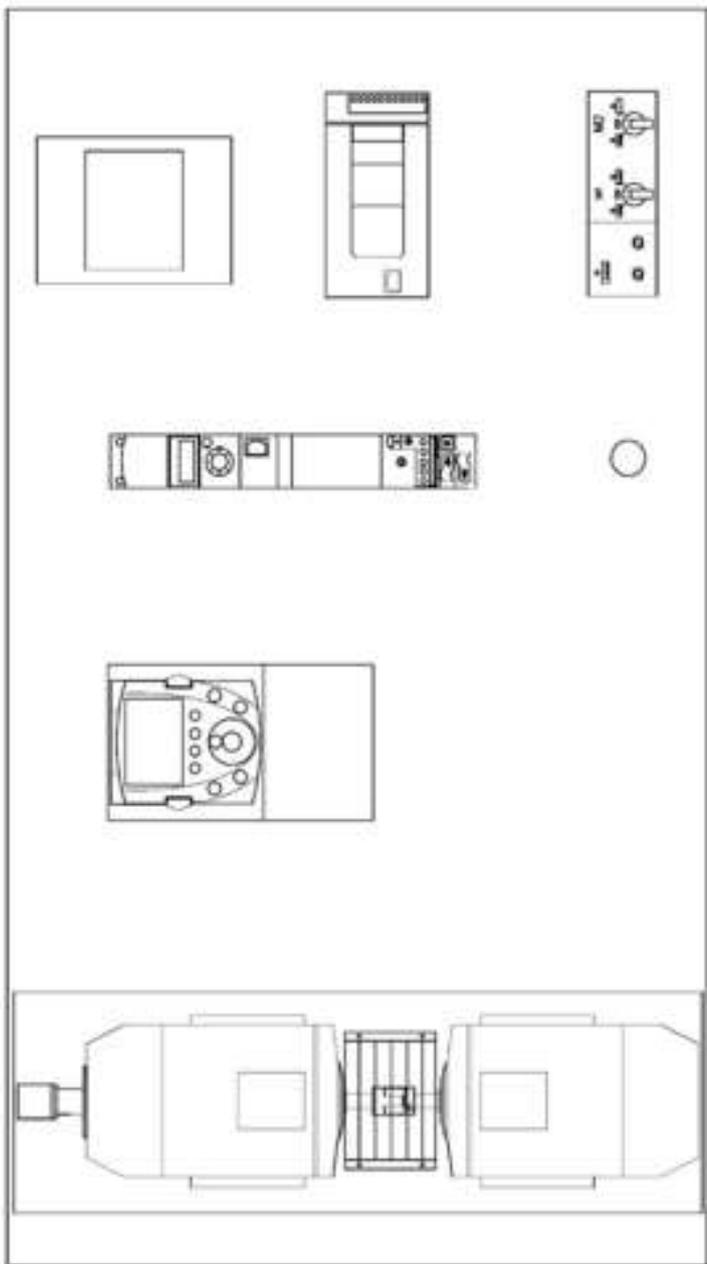
ПК - персональний комп'ютері

Принципова схема розроблюваного стенду

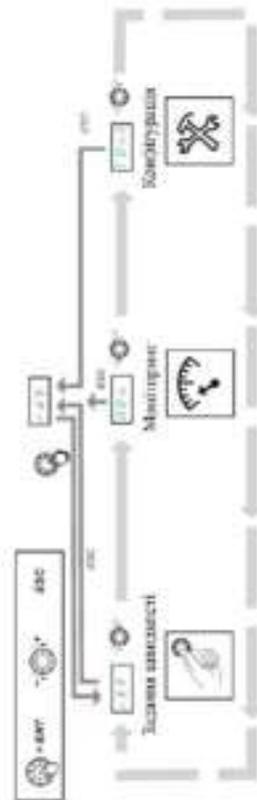


Позиція	Найменування	Кількість
	Перетворювач частоти	
UZ1	ATV32HU15M2	1
UZ2	ATV71HU30M3	1
	Резистори	
R1, R9	4,7 кОм МЛТ-0,5-5%	2
R2	10 кОм СІПЗ-4М-5%	1
R3-R8	1 Ом SQP-10-5%	6
	Пристрій комутації	
S1	Автоматичний вимикач	1
K1-K4	Тумблер КНЭ(В)-201А-А1	4
	Електродвигун	
M1	Лабораторний (аналог АІР03В4У3)	1
M2	АІР03В4У3	1
	Датчик швидкості	
BR	TRD-S500VD	1
	Осцилограф	
OS1	DSO-2090 USB	1

Зовнішній вигляд розроблюваного стенду

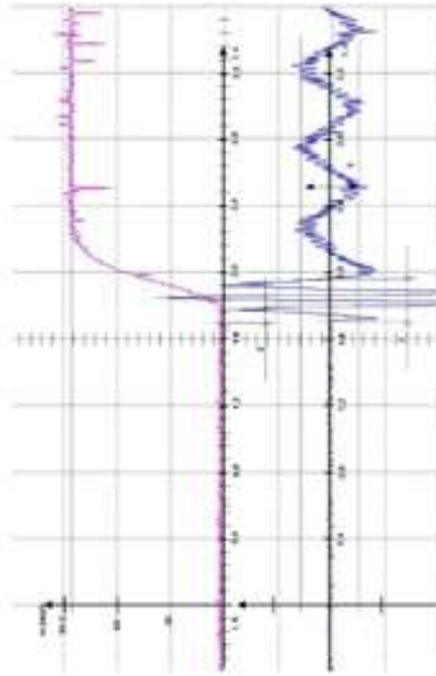


Дослідницький стенд

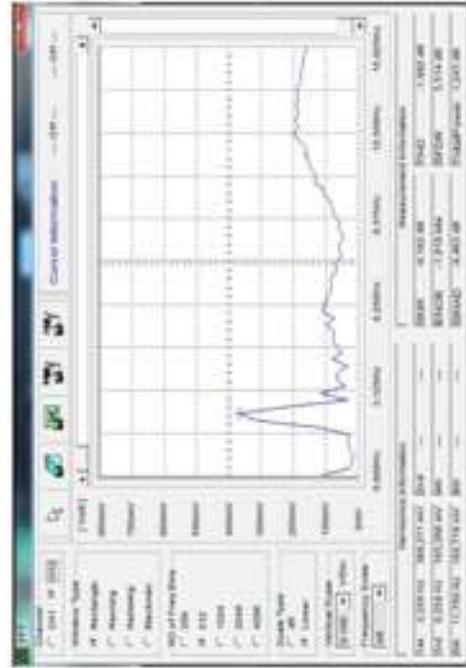


Структура меню

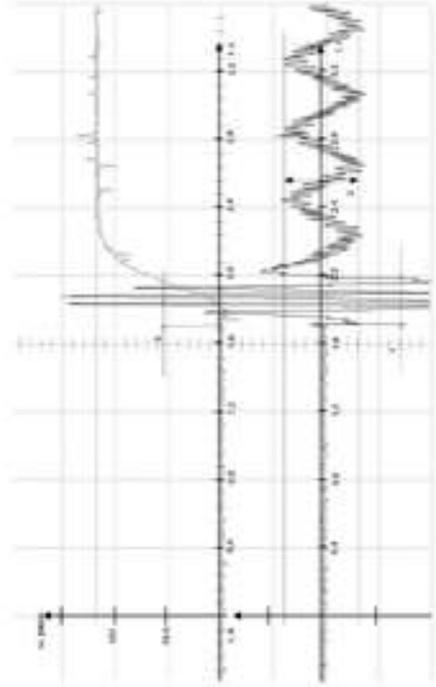
Експериментальні дослідження роботи частотно-керovanого асинхронного електроприводу без навантаження



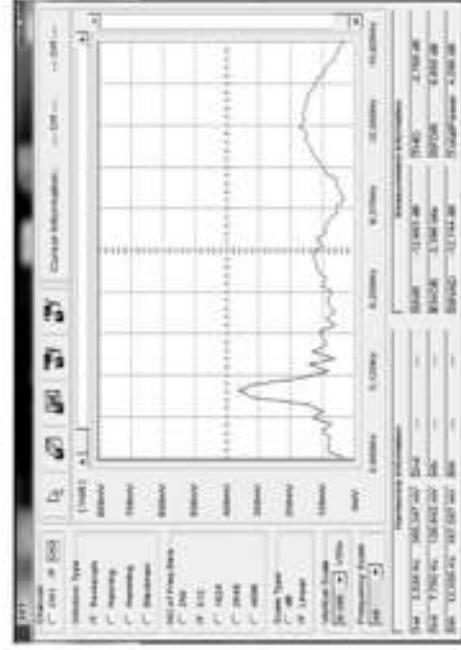
Осцилограма з навантаженням 30 Гц



Спектр



Осцилограма з навантаженням 50 Гц



Спектр

