

**Особливості реалізації регуляторів для синхронних двигунів на
основі обладнання В&R**

«Електронні пристрої та системи»

Чернігів 2020

Анотація

Актуальність роботи. Машинобудівна галузь України наразі широко застосовує комплектуючі відомих фірм. Чільне місце посідає продукція від Bernecker&Rainer (B&R), зокрема, – серія синхронних електроприводів, яка може застосовуватися спільно з програмуємим логічним контролером та силовим модулем. В сукупності із інтегрованим середовищем розробки програмного забезпечення (IDE) Automation Studio це створює програмно-апаратний комплекс, на базі якого можлива реалізація систем електроприводів.

Проте під час компонування такої системи електроприводів у єдиний комплекс залишаються певні проблеми, з вибором та налагодженням прикладного програмного забезпечення.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є виявлення особливостей процесу розробки систем керування електродвигунами із застосуванням елементної бази виробництва фірми B&R для покращення якості машинобудівного обладнання.

Завдання даного дослідження – розглянути замкнуту систему керування синхронним електродвигуном та порівняти перехідні процеси з програмно реалізованою замкнутою системою керування.

Об’єкт дослідження – апаратно-програмний комплекс у складі ETAL Light System та IDE Automation Studio.

Предмет дослідження – алгоритми роботи регуляторів для керування синхронними електродвигунами.

Загальна характеристика наукової роботи. Робота складається із вступу, 3 розділів, висновків і 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 28 сторінок, в тому числі основний текст на 23 сторінках і список літератури з 8 найменувань на 1 сторінці.

Зміст

Анотація	2
Зміст	3
Вступ	4
1 Аналітичний огляд джерел інформації	6
1.1 Особливості, будова та застосування синхронних електродвигунів.....	6
1.2 Стандартні регулятори	7
2 Теоретична частина	14
3 Експериментальна частина.....	19
Висновки	28
Перелік посилань	29
Додатки	30
Додаток А – Схема програми керування синхронним електродвигуном	30
Додаток Б – Зовнішній вигляд комплексу ETA Light system	31

Вступ

Синхронні електродвигуни все більш становляться популярними в наш час. Ці машини змінного струму, звичайно, мають ряд переваг та недоліків в порівнянні з асинхронними електродвигунами. Особливу популярність синхронні електродвигуни здобули у виробництві електроенергії на тепло- та гідроелектростанціях, також синхронні електродвигуни використовуються в компресорах, насосах та інших приладах, які потребують сталої частоти обертання. Синхронні електродвигуни також все частіше використовують у різноманітних верстатах завдяки властивості підтримувати постійну частоту обертання незалежно від навантаження, якщо воно знаходиться в допустимих експлуатаційних межах.

Для керування синхронними електродвигунами потрібна замкнута система керування для того, щоб регулювати швидкість обертання та положення ротора синхронного електродвигуна, а також компенсувати зовнішні чинники на нього. Особливу роль відіграють системи керування у верстатах, де використовуються дані електродвигуни. Вимоги до цих систем керування дуже високі: вони повинні бути досить точними та мати систему керування для досягнення встановленої швидкості обертання та позиції ротора електродвигуна.

Метою роботи є дослідження особливостей розробки замкнутих систем керування синхронними електродвигунами із застосуванням елементної бази виробництва фірми V&R [1].

Завдання даного дослідження – розглянути замкнуту систему керування синхронним електродвигуном, яка апаратно реалізована в драйвері для синхронних електродвигунів 80VD100PD.C022-01 та порівняти часові діаграми перехідного процесу з програмно реалізованою замкнутою системою керування.

Об'єктом дослідження є апаратно-програмний комплекс у складі ЕТА Light System [1] та IDE Automation Studio.

Предметом дослідження є алгоритми роботи регуляторів для керування синхронними електродвигунами.

1 Аналітичний огляд джерел інформації

1.1 Особливості, будова та застосування синхронних електродвигунів

Синхронний двигун - безколекторна машина змінного струму, у якої в сталому режимі відношення частоти обертання ротора до частоти струму не залежить від навантаження в області допустимих навантажень [2].

Синхронні електродвигуни розділяються на такі типи:

- Синхронні електродвигуни з обмоткою збудження;
- Синхронні електродвигуни з постійними магнітами.

Синхронні електродвигуни з обмоткою збудження. Синхронний електродвигун з обмоткою збудження, як і будь-який електродвигун, складається з ротора і статора. Статор - нерухома частина, ротор - рухома частина. Статор зазвичай має стандартну трифазну обмотку, а ротор виконаний з обмоткою збудження. Обмотка збудження з'єднана з контактними кільцями до яких через щітки підходить живлення. Постійна швидкість обертання синхронного електродвигуна досягається за рахунок взаємодії між постійним і обертовим магнітним полем. Ротор синхронного електродвигуна створює постійне магнітне поле, а статор - обертове магнітне поле.

Швидкість з якою обертається магнітне поле може бути розрахована по наступному рівнянню:

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1)$$

де N_s - частота обертання магнітного поля, об / хв,

f - частота струму статора, Гц,

p - кількість пар полюсів.

Це означає, що швидкість синхронного електродвигуна може дуже точно контролюватися зміною частоти струму живлення [3].

Синхронні електродвигуни з постійними магнітами. Дані синхронні електродвигуни в порівнянні з синхронними електродвигунами з обмоткою збудження, мають замість електромагнітів на роторі постійні магніти.

Ротор складається з постійних магнітів. За конструкцією ротора синхронні двигуни діляться на електродвигуни з явно вираженими полюсами та електродвигуни з неявно вираженими полюсами. Електродвигун з неявно вираженими полюсами має рівну індуктивність по поздовжній і поперечній осях, тоді як у електродвигуна з явно вираженими полюсами поперечна індуктивність не дорівнює поздовжньої.

Статор складається з корпусу і сердечника з обмоткою. Найбільш поширені конструкції з двох-і трифазною обмоткою.

Для роботи синхронного двигуна з постійними магнітами обов'язково потрібна система керування, наприклад, частотний перетворювач або сервопривід. При цьому існує велика кількість способів керування. Вибір оптимального способу керування, головним чином, залежить від завдання, яке ставиться перед електроприводом [4].

1.2 Стандартні регулятори

Регулятор або керуючий пристрій - в теорії управління пристрій, який стежить за станом об'єкта управління як системи і виробляє для неї керуючі сигнали. Регулятори стежать за зміною певних параметрів об'єкта управління і реагує на їх зміну за допомогою певних алгоритмів управління відповідно до заданої якості управління.

Регулятори в переважній більшості працюють за принципом негативного зворотного зв'язку з метою компенсування зовнішніх чинників, що діють на об'єкт управління і відпрацювання поставленого ззовні або закладеного в системі закону управління (програму). Для визначення алгоритму управління

використовується інформація про математичну модель об'єкта, яка вважається заздалегідь відомою. Прикладом може служити регулятор швидкості обертання двигуна. Рідше використовується прямий зв'язок. Системи управління з негативним зворотним зв'язком називають замкнутою системою управління, а систему без зворотного зв'язку (тобто прямий) називають розімкнутою. Як показує практика, всі реальні системи є замкнутими [5].

Критерії оцінки якості регулювання:

- швидкість регулювання (час зменшення помилки регулювання);
- точність при встановленні помилки регулювання і при встановленні величини перерегулювання;
- запас стійкості і відсутність коливань, в тому числі затухаючих [6].

Кожен регулятор має свій закон регулювання. Закон регулювання потрібно вибрати виходячи з об'єкта керування та необхідної реакції на зміну параметрів об'єкта регулювання. Розглянемо поширені закони регулювання:

• *Пропорційний закон регулювання або (П) закон регулювання* — реалізуються регуляторами в системах автоматичного регулювання. Автоматичні регулятори, що реалізують даний закон, ще називають регуляторами з жорстким зворотним зв'язком, або статичними. Рівняння П-регулятора і передаточна функція мають вигляд:

$$\mu = k_p \Delta \quad (2)$$

$$W(p) = k_p \quad (3)$$

де μ — вплив регулятора на регулюючий орган за допомогою виконавчого механізму;

Δ — сигнал помилки регулювання, виділений на елементі порівняння. Перехідна функція П-регулятора і типовий перехідний процес показані на рисунку 1.

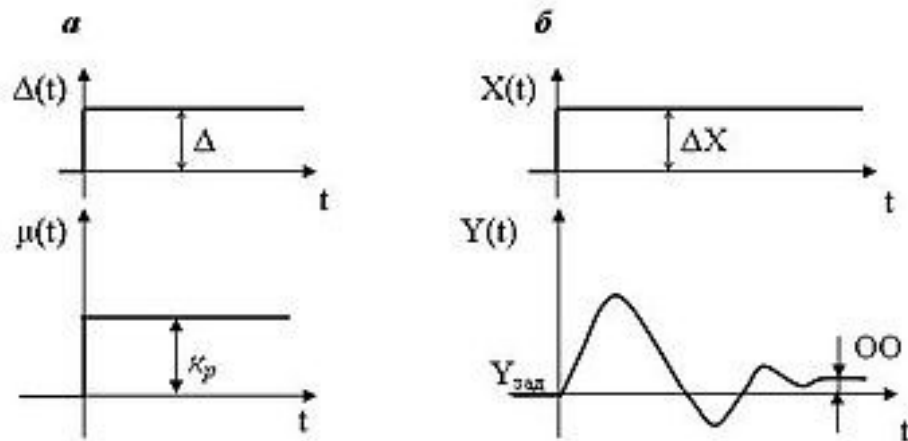


Рис. 1 – Перехідна функція П-регулятора (а) і вид перехідного процесу в системі регулювання (б) [7]

- *Інтегральний закон регулювання (I)* — закон при якому керуючий сигнал, що виробляється автоматичним регулятором, дорівнює інтегралу від помилки регулювання в часі:

$$I = K_2 \cdot \int e \cdot dt \quad (4)$$

На рисунку 2 а показана перехідна функція І-регулятора. Ці регулятори характеризуються відсутністю в стані рівноваги однозначної залежності між значенням регульованого параметра і положенням регулюючого органу, що обумовлено відсутністю зворотного зв'язку.

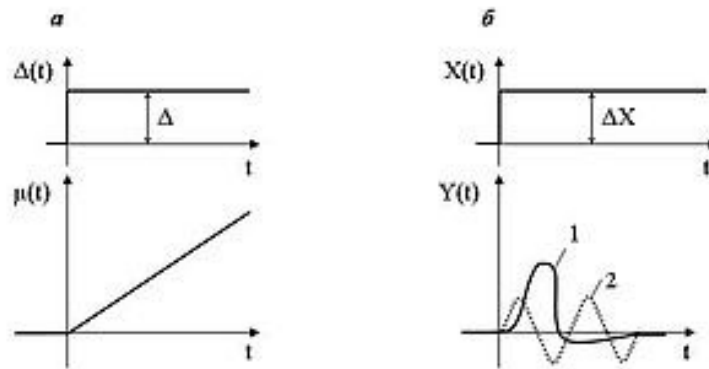


Рис. 2 – Перехідна функція І-регулятора (а) і вид перехідного процесу в системі регулювання (б) [7]

І-регулятори завжди приводять регульований параметр до заданого значення, якщо об'єкт володіє властивістю самовирівнювання (рис. 2 б, крива 1). Однак тривалість перехідного процесу досить значна. При керуванні об'єктом, що не володіє властивістю самовирівнювання, приводить до перехідного процесу у вигляді незатухаючих коливань вихідного параметра (рис. 2 б, крива 2), причому амплітуда коливань тим більша, чим більше збурення на об'єкт з боку навантаження. Таким чином, застосування регуляторів без зворотного зв'язку в системах з астатичним об'єктом не рекомендується [7].

- *Пропорційно-диференціальний (ПД) закон регулювання.* Регулятор, що реалізує даний закон регулювання, можна зобразити у вигляді системи, що містить два паралельно працюючих типових ланки: пропорційної та ідеальної диференціальної.

Позитивною особливістю даного закону є те, що регулювання ведеться з урахуванням як величини відхилення регульованого параметра, так і швидкості його зміни. Чим крутіший фронт відхилення вихідної величини, тим на більшу величину переміщується робочий орган (рис. 3). Як тільки припиняється зміна

регульованої величини, регулятор починає відпрацьовувати пропорціональну частину. Ефект передування значно підвищує якість перехідного процесу.

Підкреслимо, що регулятор, який враховує тільки першу похідну величини відхилення регульованого параметра, неприйнятний, оскільки при швидкості зміни параметра, що дорівнює нулю, він може мати будь-яке стале значення, значно відмінне від заданого. Тому Д-регулятор «в чистому вигляді» не існує.

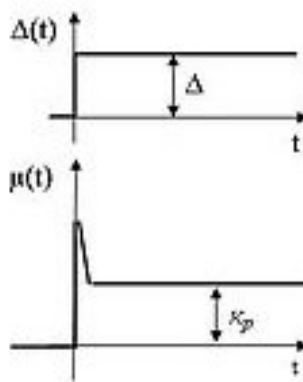


Рис. 3 – Перехідна функція ПД-регулятора [7]

- *Пропорціонально-інтегральний (ПІ) закон регулювання.* Регулятори, які працюють за даним законом, виконують переміщення регулюючого органу пропорціонально сумі відхилення та інтеграла від відхилення регульованої величини, тобто здійснюють П- та І- вплив:

$$PI = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot \int e(t) \cdot dt \quad (5)$$

У динамічному відношенні ПІ-регулятор подібний системі з двох паралельно включених регуляторів: пропорціонального з коефіцієнтом передачі K_1 та інтегрального з коефіцієнтом передачі K_2 .

Реалізовується ПІ-закон за допомогою гнучкого зворотного зв'язку. Наявність гнучкого зворотного зв'язку виключає залишкову нерівномірність у

перехідному процесі (рис. 4 б). У залежності від динамічних властивостей об'єкта регулювання і налаштованих параметрів регулятора перехідний процес може бути аперіодичним (крива 1) або затухаючим коливальним (крива 2). У першому випадку зростає амплітуда перерегулювання, але скорочується тривалість перехідного процесу, у другому — картина зворотна.

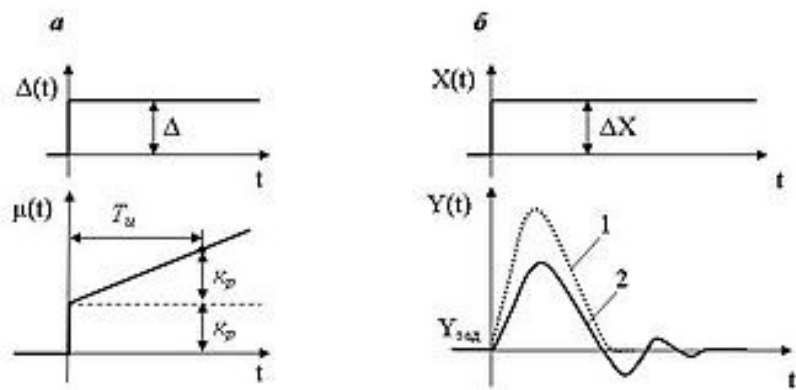


Рис. 4 – Перехідна функція ПІ-регулятора (а) і вид перехідного процесу в системі регулювання (б) [7]

- *Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання* - найскладніший алгоритм функціонування автоматичного регулятора, що включає вплив усіх розглянутих вище законів. Реалізація цього закону пов'язана із застосуванням пружного зворотного зв'язку. На рис. 5 б подана перехідна функція ПІД-закону, де виділено області впливу складовими Д, П, І закону. Регулятори з випередженням значно поліпшують якість регулювання, особливо якщо об'єкт володіє великим запізненням та інерційністю. Вид перехідного процесу відповідає кривим, показаним на рис. 5 б.

Рівняння ПІД-закону мають вигляд:

$$PID = K_1 \cdot e(t) + K_2 \cdot \int e(t) \cdot dt + K_3 \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

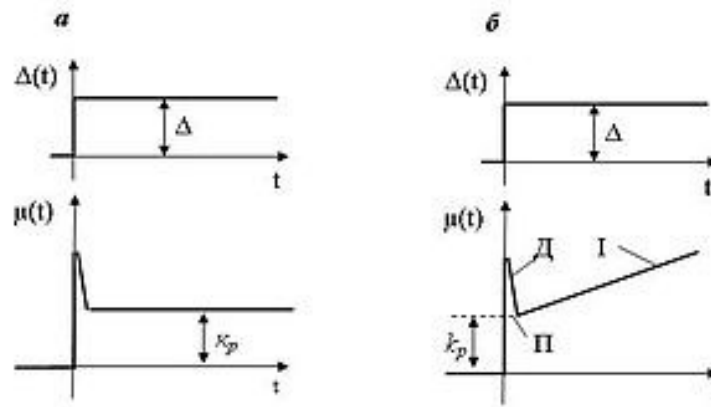


Рис. 5 – Перехідна функція ПД-регулятора (а) і вид перехідного процесу в системі регулювання (б) [7]

В цьому розділі було проведено аналітичний огляд джерел інформації. В першу чергу проводився огляд інформації про синхронні електродвигуни, їх будова, призначення та принцип роботи. Для синхронних електродвигунів потрібна система керування, бажано замкнута, тому наступним кроком стало огляд стандартних регуляторів та законів регулювання. Переглянуто всі основні закони регулювання: П-, І-, ПД-, ПІ-, ПІД-закони регулювання. У загальній теорії автоматичного управління структура регулятора вибирається виходячи з моделі об'єкта управління. При цьому більш складним об'єктам управління відповідають складніші регулятори.

2 Теоретична частина

В цьому розділі проведемо теоретичне дослідження вбудованої замкнутої системи керування електродвигунами, розглянемо структурну схему замкнутої системи керування, принцип та алгоритм її роботи. Для цього використовувалась програма Automation Studio розроблена компанією B&R.

У довідці програми Automation Studio міститься безліч сторінок тексту та малюнків для допомоги користувачу освоїти інтерфейс програми, проведення діагностики та основ програмування, а також технічну інформацію про роботу та алгоритми деяких функціональних вузлів. У довідці було знайдено структурну схему замкнутої системи керування електродвигунами. Дана схема приведена на рисунку 6.

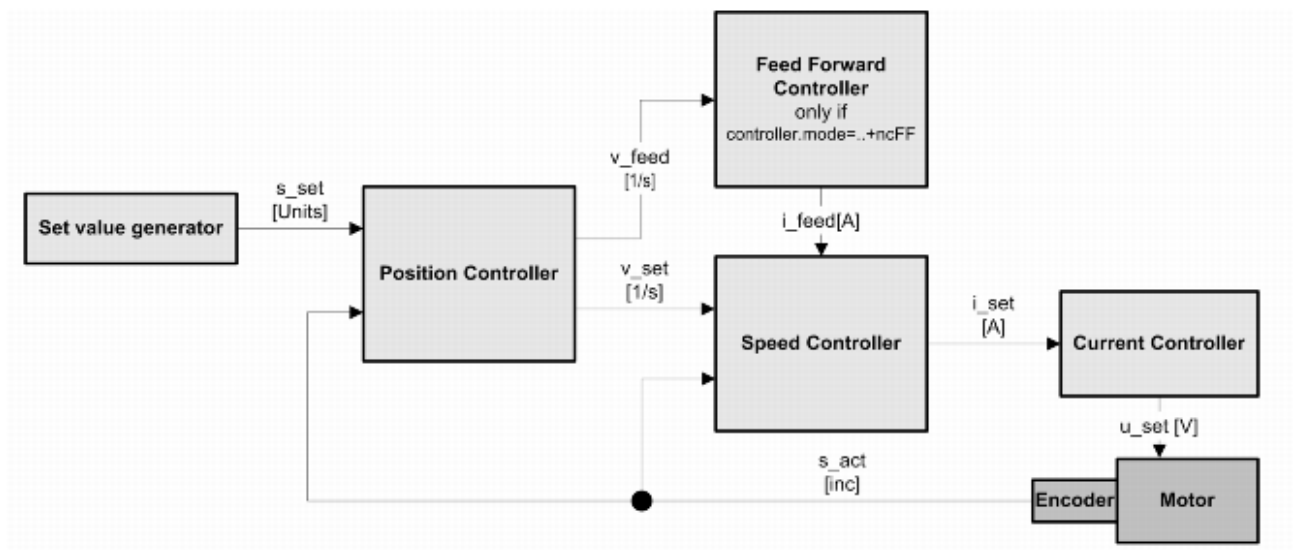


Рис. 6 – Структурна схема замкнутої системи керування

На структурній схемі показано кілька функціональних блоків. Розглянемо ці блоки:

- Set value generator. Встановлене значення позиції. Це значення береться з програми в обробці команд керування базовим переміщенням. Це позиція на яку потрібно переміститись. Ці дані можуть надходити з програми, а можуть

надходити з локальної мережі Інтернет, бо програмуємий логічний контролер має можливість працювати з Automation Studio через локальну мережу. Для встановлення та контролю параметрів можна використовувати мікроконтролер, який буде підключатися до локальної мережі [8];

- Position controller. Контролер позиції. Система керування позиціонування зі зворотнім зв'язком;
- Speed controller. Контролер швидкості. Система керування обертання зі зворотнім зв'язком;
- Current Controller. Контролер струму. Виконує перетворення енергії відповідно до алгоритмів попередніх контролерів та передає результати до електродвигуна;
 - Motor. Синхронний електродвигун;
 - Encoder. Енкодер синхронного електродвигуна. Передає дані про нинішню позицію та швидкість обертання;
 - Feed forward controller. Контролер подачі. Являється відкритою системою керування, яка використовується як модифікація замкненої системи керування. Дана система отримує дані про навантаження на електродвигуні (нинішнє навантаження, мінімальне та максимальне навантаження, прискорення та інерцію). Контролер подачі комбінує результат з результатом інших контролерів для покращення загальної продуктивності системи керування. Дана система не впливає на зворотній зв'язок інших контролерів тому ця система ніколи не може викликати коливання системи керування, тим самим покращуючи реакцію системи, не впливаючи на стабільність.

В налаштуваннях драйвера електродвигунів вимкнемо блок Feed Forward Controller зважаючи на те, що синхронний електродвигун знаходиться в складі навчального стенду в щільному корпусі заради безпеки студентів, тому електродвигун немає навантаження і використання блоку Feed Forward

Controller не є раціональним і вплинути на замкнуту систему керування він ніяк не зможе.

З останніх змін структурна схема замкнutoї системи керування має такий вид, який показаний на рисунку 7.

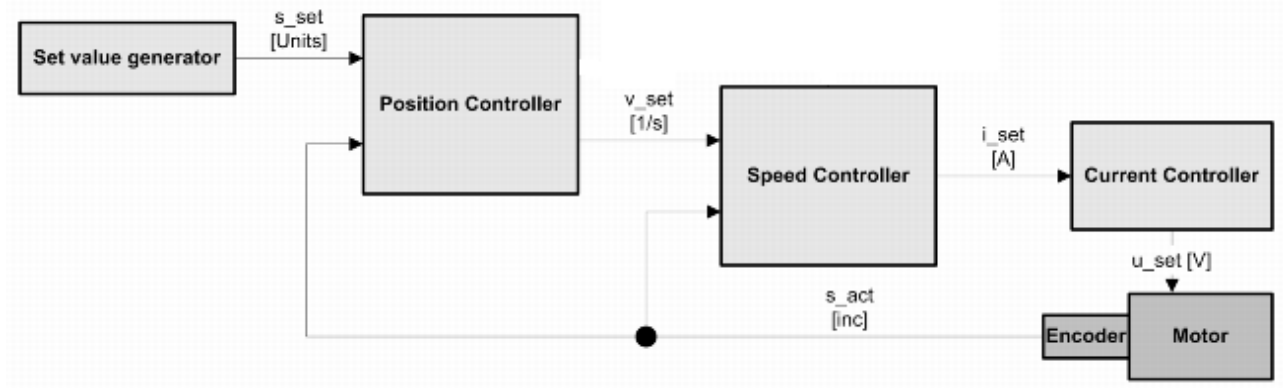


Рис. 7 – Структурна схема замкнutoї системи керування синхронних електродвигунів з урахуванням останніх змін

В даній структурній схемі велику цінність має блок керування позиціонування (Position Controller) та блок керування швидкості обертання (Speed Controller). В довідці є структурні схеми обох блоків. Розглянемо їх докладніше.

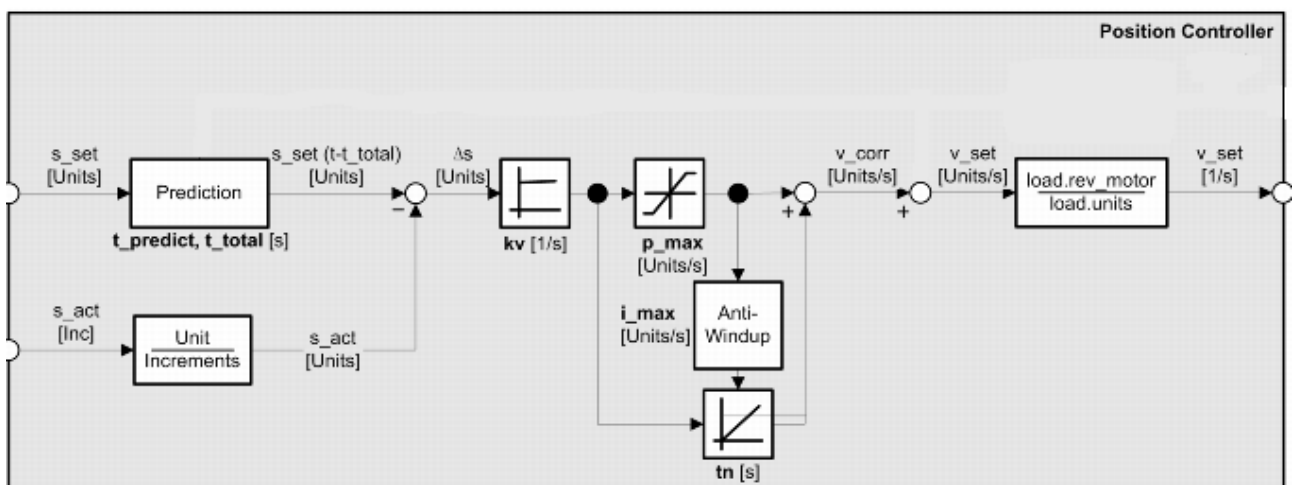


Рис. 8 – Блок керування позиціонування

Як видно зі структурної схеми блоку керування позиціювання, він виконаний як ПІ-регулятор з захистом проти перерегулювання. На вході отримуємо два значення: встановлена позиція та нинішня позиція з енкодера. Ці дані масштабуються та приводяться до одної одиниці виміру, обчислюється помилка регулювання. Ця помилка подається на пропорційальну складову ПІ-регулятор з обмежувачем по верхньому та нижньому ліміту. Ці дані подаються на систему захисту проти перерегулювання та паралельно на інтегральну складову ПІ-регулятора. В кінці результат пропорційальної та інтегральної складової додається і подається на блок керування швидкістю обертання.

Розглянемо більш детально систему захисту проти перерегулювання. Після значної зміни заданої величини інтегральна складова може накопичувати велику помилку регулювання, тим самим система не зупиниться на заданій їй величині, а продовжить зростати або зменшуватися поки ця помилка регулювання не вичерпається. Для запобігання цього і створена система захисту проти перерегулювання (Anti-Windup). Ця система являється модифікацією ПІ-регулятора і не являється замкнутою.

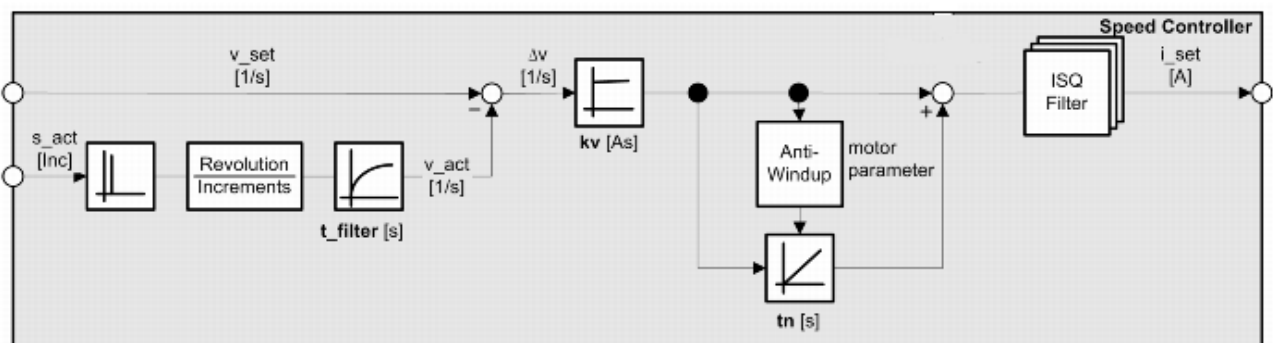


Рис. 9 – Блок керування швидкістю обертання

Блок керування швидкістю обертання як і блок керування позиціювання складається з ПІ-регулятора з системою захисту проти перерегулювання. Робота даного блоку являється аналогічній блоку керування позиціювання. Відмінністю буде те, що в блоці керування швидкістю обертання є можливість

додати три фільтри з подальшим налаштуванням. В дослідженні використання фільтрів не планується за для чистоти експерименту.

В даному розділі було розглянуто вбудовану замкнуту систему керування синхронним електродвигуном. Дана система керування являє собою двухступінчастий ПІ-регулятор з системою захисту проти перерегулювання для контролера позиціонування та контролера швидкості обертання, яка повинна контролювати інтегральну складову ПІ-регулятора та не створювати в системі перерегулювання. Також було виявлено ряд допоміжних апаратних модифікацій ПІ-регулятора (Feed Forward Controller та ін.), які дозволяють налаштовувати систему керування електродвигуна для різноманітних цілей та задач, що в свою чергу дозволяє досягнути максимальної продуктивності.

3 Експериментальна частина

В даній частині проведемо експерименти зі замкнутою системою керування в режимі симуляції та порівняємо часові діаграми перехідних процесів в порівнянні з програмно реалізованим ПД-регулятором. В кінці підкріпимо результати на реальному синхронному електродвигуні.

Проводити налаштування системи керування та перегляд часових діаграм перехідного процесу буду в програмі Automation Studio. Дослідження замкнутої системи керування синхронного електродвигуна буде проводитися в режимі симуляції, а потім перевіримо результати на реальному електродвигуні.

Для керування синхронним електродвигуном використаємо стандартну програму, яка вже міститься в Automation Studio в якості прикладу. Дана програма призначена для виконання базових переміщень одним синхронним електродвигуном. В цій програмі реалізовано: зчитування актуальної швидкості обертання та позиції, зчитування статусу електродвигуна та драйвера, перевірка помилок та обробка команд базових переміщень. Схема програми наведена в додатку А.

Для перегляду перехідних процесів скористаємось інструментом для діагностики Trace, який наявний в Automation Studio. Цей інструмент дозволяє будувати часові діаграми будь-якого параметру.

Почнемо з дослідження роботи замкнутої системи керування, яка вбудована в драйвер керування синхронними електродвигунами. В додатку Б приведена фотографія всього комплексу ETA Light system.

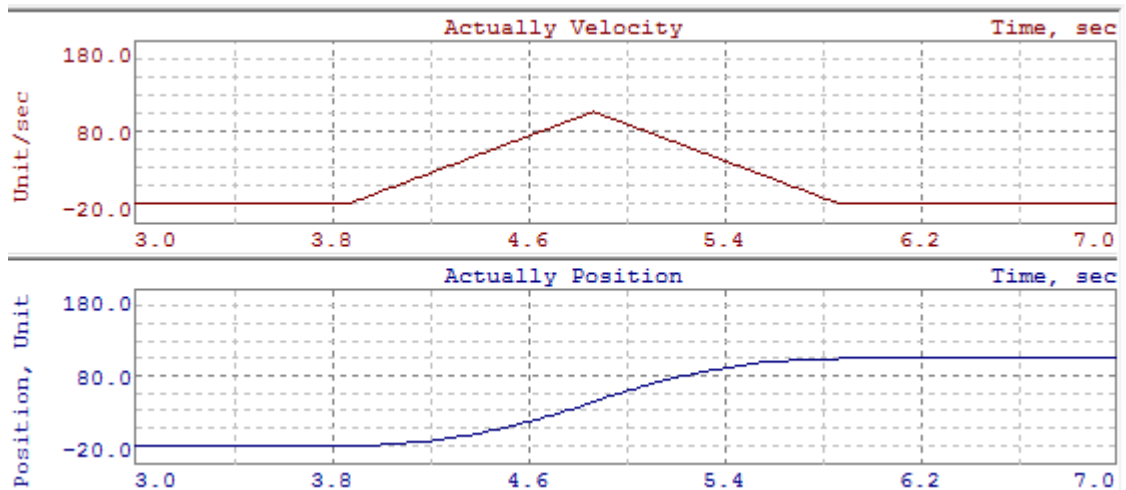


Рис. 10 – Часові діаграми перехідного процесу

Як бачимо з графіків швидкість обертання (верхній графік) зростає та зменшується лінійно, без перерегулювання. А позиціонування (нижній графік) має явно виражені ділянки плавного старту та плавної зупинки, також без перерегулювання. В даній ситуації електродвигун не встиг набрати поставленої йому швидкості із-за короткої дистанції руху.

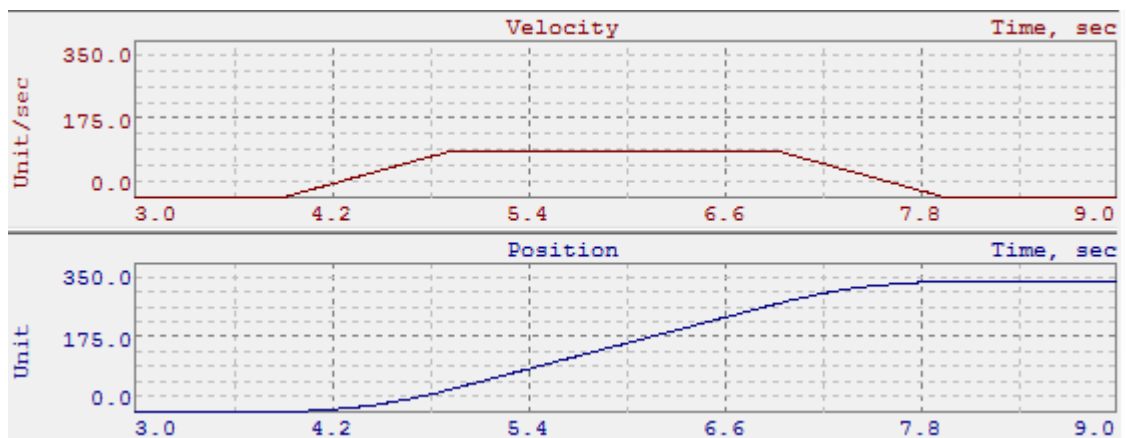


Рис. 11 – Часові діаграми перехідного процесу

Швидкість обертання (верхній графік) зростає та зменшується лінійно як і на попередньому графіку, без перерегулювання. А позиціонування (нижній графік) як і в попередній раз має ділянки плавного старту та плавної зупинки, також без перерегулювання. Ці ділянки проходять швидко, бо електродвигун швидко набрав задану швидкість. В даній ситуації електродвигун встиг набрати поставленої йому швидкості із-за збільшення дистанції руху.

З даних графіків випливає, що із-за системи захисту проти перерегулювання інтегральна складова не призводить до перерегулювання. Видно ділянки плавного старту, плавної зупинки та лінійного руху при досягненні поставленої швидкості. Проведемо експеримент зі швидкістю обертання.

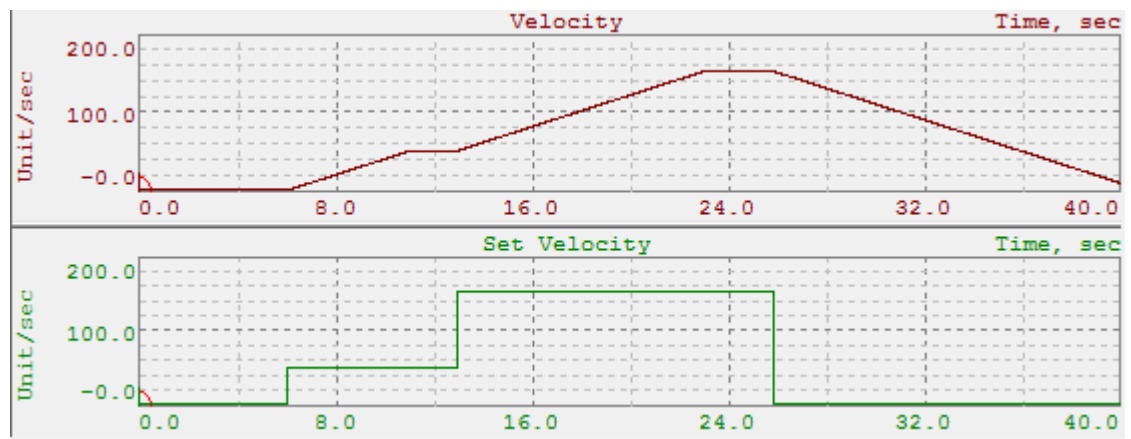


Рис. 12 – Часові діаграми перехідного процесу

На рисунку 12 бачимо графік швидкості обертання (верхній графік) в залежності від встановленої швидкості (нижній графік). Після встановлення швидкості обертання присутня деяка затримка, яка триває 3-4 періода після чого швидкість починає змінюватися. Один період триває 10 мс, з таким періодом виконується обробка програми, тобто затримка триває 30 – 40 мс. Це визвано з програмною реалізацією і вплинути на це не можна, можливо тільки зменшити період обробки програми.

При зміні параметрів ПІ-регуляторів для швидкості обертання та позиціонування було помічено, що на графіках перехідні процеси залишаються однаковими. Які б параметри регуляторів не змінювались, результат залишається тим самим. З цього можна зробити припущення, що в режимі симуляції не можна налаштувати регулятори швидкості обертання та позиціонування. Дане припущення можна підтвердити або спростувати тільки перевіривши на експерименті з реальним синхронним електродвигуном.

Підсумовуючи вищесказане, можна зробити певні висновки, а саме: двухступінчастий ПІ-регулятор в режимі симуляції показує гарні характеристики, має плавний старт та плавну зупинку, немає перерегулювання та має відносно невелику затримку. Але цього не можна підтвердити, доки не перевіримо роботу з реальним електродвигуном.

В якості порівняння скористаємось програмно реалізованим ПІД-регулятором. Регулятор буде регулювати швидкість обертання електродвигуна для наглядності. Залишається тільки підібрати коефіцієнти регулятора. Для цього потрібно знати передаточну функцію синхронного електродвигуна. В довідці даної інформації не було знайдено, тому підбирати коефіцієнти будемо експериментальним методом, а саме методом Зиглера-Никольса.

Для підбора коефіцієнтів за методом Зиглера-Никольса потрібно інтегральну та диференціальну складову ПІД-регулятора встановити в нуль, а пропорційальну складову встановити в мінімальне значення та збільшувати до того моменту коли не з'являться незатухаючі коливання однакової амплітуди та частоти.

При зміні пропорційальної складової починаючи з 0.5, помічено, що при значенні пропорційальної складової 1 починають з'являтися незатухаючі коливання. Заміряємо період цих коливань.

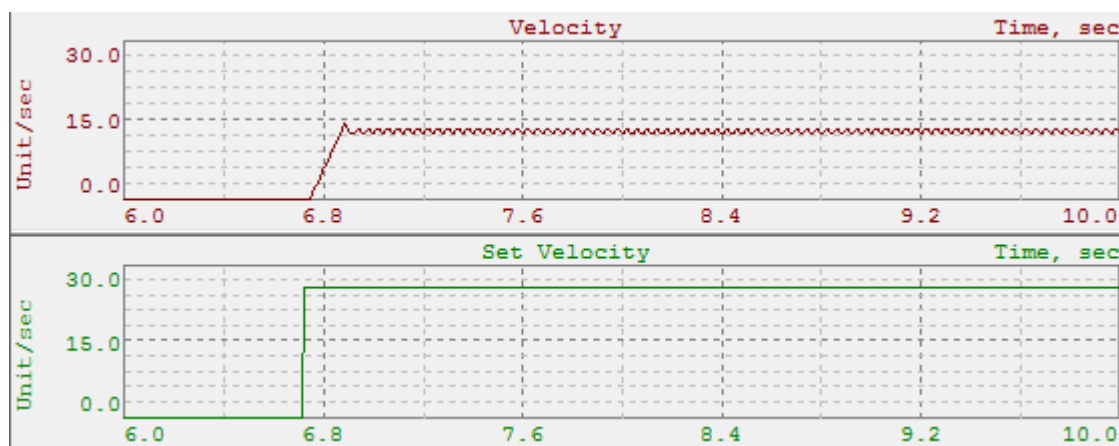


Рис. 13 – Підбор коефіцієнтів ПІД-регулятора методом Зиглера-Никольса

Таблиця 1 – Підбор коефіцієнтів методом Зиглера-Никольса

Тип регулятора	Пропорціональна складова	Інтегральна складова	Диференціальна складова
П-регулятор	0.5 Кр		
ПІ-регулятор	0.45 Кр	0.83 Т	
ПІД-регулятор	0.6 Кр	0.5 Т	0.125 Т

З рисунку 13 вимірюємо період коливань. Він дорівнює 40 мс. За таблицю 1 розраховуємо коефіцієнти ПІД-регулятора:

Пропорціональна складова (П) – 0.6;

Інтегральна складова (І) – 0.02;

Диференціальна складова (Д) – 0.005.

Далі після вибору коефіцієнтів ПІД-регулятора потрібно переглянути результат та підправити коефіцієнти за необхідністю.

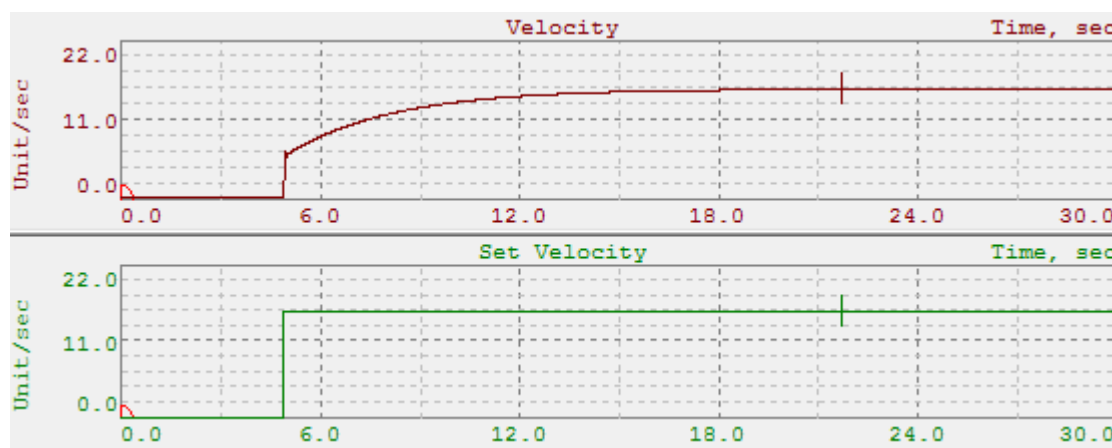


Рис. 14 – Результат за методом Зиглера-Никольса

На рисунку 14 видно як на початку працює пропорціональна складова і потім вступає в дію інтегральна складова. Процес проходить без перерегулювання, але дуже довго, майже 15 секунд. Змінимо коефіцієнти регулятора.

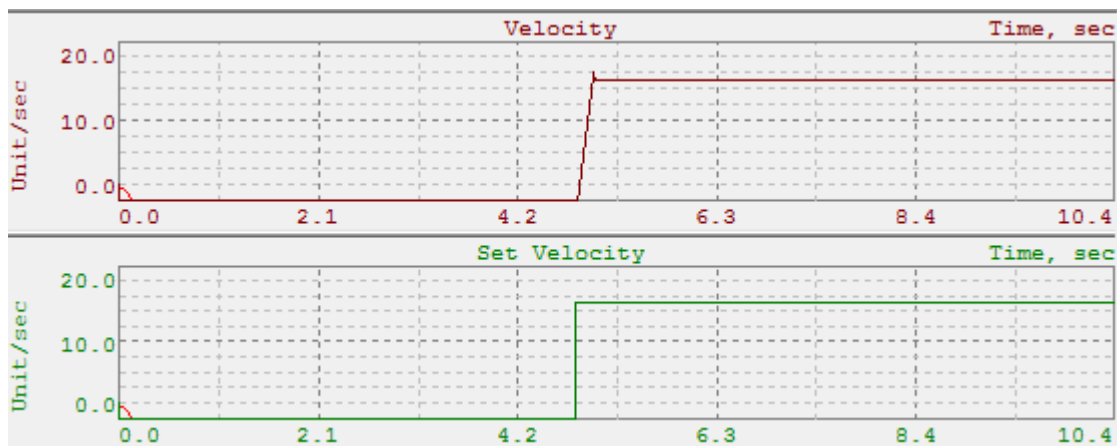


Рис. 15 – Результат корегування коефіцієнтів регулятора ($P - 0.6$; $I - 0.2$; $D - 0.01$)

З графіків видно, що перехідний процес проходить набагато швидше - 160 мс, при більш точному налаштуванні можна досягнути більш швидкого перехідного процесу. Перерегулювання немає, даний регулятор потребує довгого та точного налаштування коефіцієнтів в порівнянні з вбудованою системою керування.

Для остаточної перевірки проведемо ряд експериментів з реальним синхронним електродвигуном в складі комплексу ETA Light System. Залишимо коефіцієнти регуляторів незмінними, а саме: для контролера позиціонування: $P - 5$; $I - 2$; для контролера швидкості обертання: $P - 1$; $I - 0$. Проаналізуємо отриманий результат.

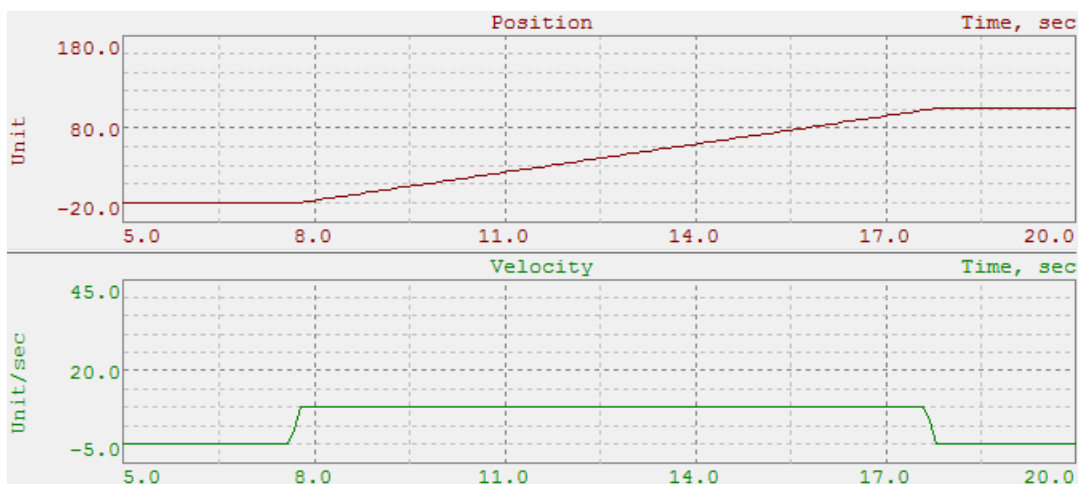


Рис. 16 – Перехідний процес реального електродвигуна

З графіків видно, що позиція електродвигуна змінюється лінійно та плавно (верхній графік), перерегулювання немає. На графіку швидкості обертання (нижній графік) видно плавний старт та плавну зупинку, перерегулювання та коливань, в тому числі затухаючих, немає. Перехідний процес проходить за 200 мс., що більше, ніж в програмно реалізованому регуляторі.

Змінимо коефіцієнти регуляторів: для контролера позиціювання: $P - 10$; $I - 5$; для контролера швидкості обертання: $P - 2$; $I - 1$.

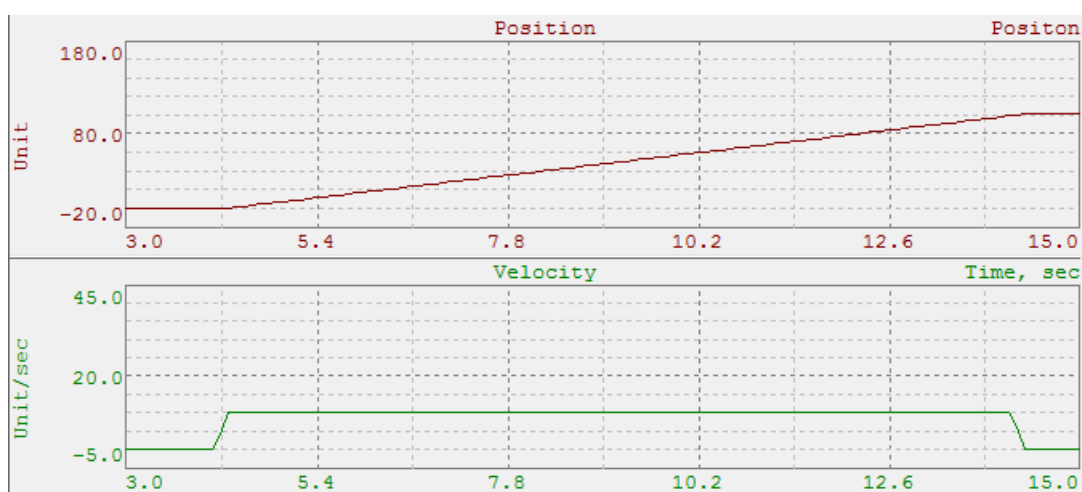


Рис. 17 - Перехідний процес реального електродвигуна

В цій ситуації регулятори показують кращий результат. Як і в попередній раз на графіках показано плавні перехідні процеси без перерегулювання. Перехідний процес проходить за 160 мс., що приблизно рівний тому значенню, що отримано в програмно реалізованому регуляторі.

Змінимо коефіцієнти регуляторів: для контролера позиціювання: $P - 50$; $I - 5$; для контролера швидкості обертання: $P - 2$; $I - 1,5$.

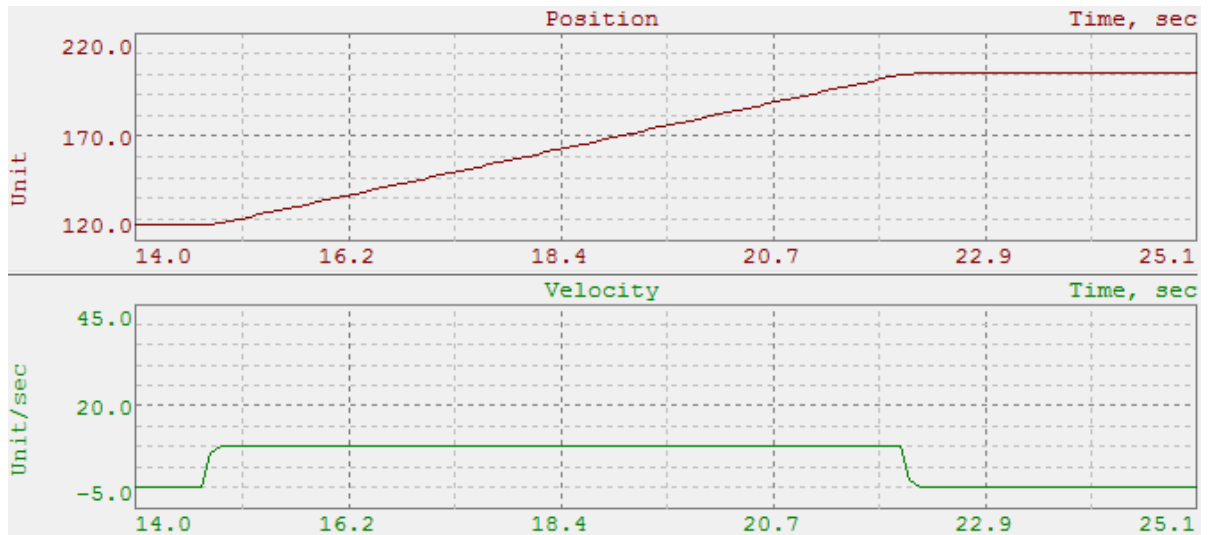


Рис. 18 - Перехідний процес реального електродвигуна

В цілому графіки повторюють попередні результати, перехідний процес в контролері швидкості став більш похилим, через що зменшився час перехідного процесу, перерегулювання та коливань, в тому числі затухаючих, немає. Перехідний процес проходить за 140 мс., що менше, ніж в програмно реалізованому регуляторі.

В цьому розділі було проведено ряд експериментів з налаштуванням регуляторів замкнутої системи керування синхронними електродвигунами та приведені часові діаграми перехідного процесу. Експерименти проводились над програмно реалізованим ПД-регулятором для керування швидкістю обертання та вбудованою замкнутою системою керування електродвигуном.

Вбудована замкнута система керування електродвигунами являє собою двухступінчастий ПІ-регулятор зі зворотнім зв'язком по позиції та швидкості обертання. Перші експерименти проводились в режимі симуляції показали гарні результати, але зміна коефіцієнтів не вплинула на роботу системи, що підтвердило гіпотезу про необхідність налаштування системи керування не у режимі симуляції, а на реальному електродвигуні. Перевагами даної системи є:

- Відсутність перерегулювання;
- Гарні перехідні процеси;

- Вбудована система не потребує програмної реалізації та з самого початку готова для налаштування;

До недоліків можна віднести наявність невеликої затримки, пов'язаної з роботою програми реалізації базових переміщень.

Для порівняння з вбудованою системою було реалізовано програмний ПД-регулятор, налаштовані його коефіцієнти та проведені порівняльні експерименти. Переваги програмного ПД-регулятора:

- Відсутність перерегулювання;
- Можливість використання диференціальної складової регулятора;

Недоліки:

- Складність налаштування;
- Перехідний процес триває трохи довше, ніж у попередній системі.

На основі даного дослідження можна сказати, що використання вбудованої системи керування є більш раціональним, але потребує доступу до ширшої технічної бази даних, ніж представлено в довідці та фірмовій документації. При більш детальному налаштуванні замкненої системи керування можна отримати бажаний перехідний процес для тих чи інших умов, що дозволить збільшити продуктивність синхронного електродвигуна.

Висновки

В дослідженні замкнутої системи керування синхронними електродвигунами використано два зразки: вбудована фірмова система керування електродвигунами від V&R та програмно реалізований ПД-регулятор.

Результати дослідження структури вбудованої замкнутої системи керування синхронним електродвигуном дозволяють зробити висновок, що вона являє собою двухступінчастий ПІ-регулятор з системою захисту проти перерегулювання для контролера позиціонування та контролера швидкості обертання, яка повинна контролювати інтегральну складову ПІ-регулятора та запобігати перерегулюванню.

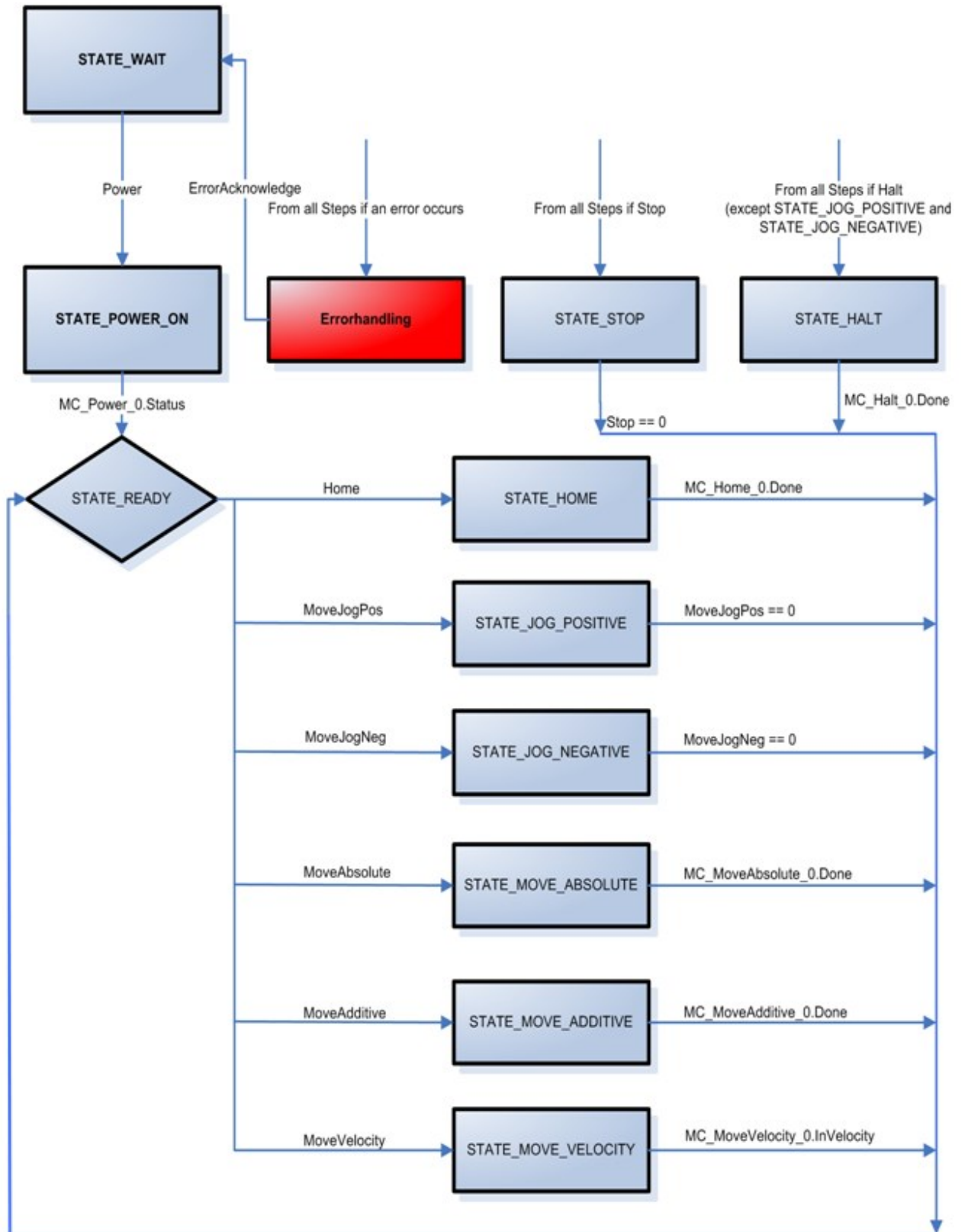
На основі даного дослідження було встановлено, що вбудована система керування являється дуже продвинутою, апаратно її вимкнути неможливо, вона дозволяє виконувати налаштування для кожного електродвигуна індивідуально для виконання того чи іншого процесу, що значно збільшує продуктивність системи керування в цілому.

Перелік посилань

1. Любенко А.С., Войтенко В.П. Дослідження апаратних можливостей навчального комплексу ЕТА light system від компанії В&R//Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2019) : науково-практична конференція (м. Чернігів, 12 грудня 2019 р.) : тези доповідей. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – С. 123-125.
2. ГОСТ 27471-87 Машини електричні обертальні. Терміни та визначення [Електроний ресурс] – Режим доступу: <http://docs.cntd.ru/document/gost-27471-87>. Заг. з екрану.
3. Синхронний електродвигун з обмоткою збудження [Електроний ресурс] – Режим доступу: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/wrsm/>. Заг. з екрану.
4. Синхронний електродвигун з постійними магнітами [Електроний ресурс] – Режим доступу: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>. Заг. з екрану.
5. K.J.Astrom, T.Hagglund. PID-controllers: Theory, Design, and Tuning : ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society; 2 Sub edition, 1995. – 343 p.
6. Ротач В.Я. Теорія автоматичного управління. – Изд. 5-е. - Москва: ЗАО "Издательский дом МЭИ", 2008. - С. 8-12. - 396 с.
7. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: Підручник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2003. – 250 с.
8. Любенко А.С., Войтенко В.П. Універсальний пристрій сполучення для лабораторного стенду INEL-STM//Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2018) : науково-практична конференція (м. Чернігів, 12 грудня 2018 р.) : тези доповідей. – Чернігів : ЧНТУ, 2018. – С. 123-125.

Додатки

Додаток А – Схема програми керування синхронним електродвигуном



Додаток Б – Зовнішній вигляд комплексу EGA Light system