

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Кафедра комп'ютерних наук
Секція комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КН

_____ А. С. Довбиш

“ ____ “ _____ 2020 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

зі спеціальності 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему: " Система керування рухомої платформи, як елемента складської логістики "

Керівник роботи

к.ф-м.н., доцент

Журба В.О.

Дипломник

студент гр. СУ.м – 91

Новіков О.О.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Довбиш А.С.

_____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Новікову Олександровичу

1. Тема проекту: Система керування рухомої платформи, як елемента складської логістики
2. Затверджено наказом ректора університету № 1820-III від “25” листопада 2020 р.
3. Термін здавання студентом закінченого проекту “7” грудня 2020р.
4. Вихідні дані до проекту: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалами опису і автоматизації технологічного процесу відповідної установки.
5. Зміст пояснювальної записки: огляд існуючих кінематик для створення всенаправленої рухомої платформи, створення кінематичної схеми платформи, моделювання роботи регуляторів положення з управлінням прогнозуєчими моделями, підбір засобів автоматизації, висновки до роботи.

6. Перелік графічних матеріалів: 8 рисунків, 14 схем, 16 графіків.

7. Календарний план проектування

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання (початок - кінець)
1	Аналіз завдання кафедри. Огляд літератури за темою диплому.	09.11.2020р. 11.11.2020р.
2	Розгляд загальних технологічних питань щодо створення платформи.	12.11.2020 17.11.2020р.
3	Створення кінематичної моделі механічної платформи.	18.11.2020р. 22.11.2020р.
4	Моделювання регуляторів для системи управління приводом.	23.11.2020р. 28.11.2020р.
6	Формування висновків	28.11.2020р. 30.11.2020р.
7	Технічне оформлення проекту.	1.12.2020р. 7.12.2020р.

Студент – дипломник

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

РЕФЕРАТ

Записка: 51 стор., 39 рис., 21 джерело.

Об'єкт дослідження — рухома платформи, як елемента складської логістики

Мета роботи — розробка системи керування рухомою платформою в складській логістиці.

Методи дослідження базуються на програмних засобах обробки даних, математичному імітаційному моделюванні, експериментальному моделюванні та інших методах, що дають змогу побудувати апаратно програмний комплекс для рухомої платформи .

Результати — визначено кінематику платформи. Створено кінематичну модель руху. Визначені принципи роботи драйвера двигуна. Визначено параметри регуляторів для контурів керування двигуном в математичному пакеті Matlab.

МЕХАНІЧНА ПЛАТФОРМА, СКЛАДСЬКА ЛОГІСТИКА, BLDC, MPC,
ТРАНСПОРТУВАННЯ, КІНЕМАТИЧНА СХЕМА, КОЛЕСО ІЛОНА,
ПОЛІКОЛЕСО, MECHANICAL PLATFORM, WAREHOUSE LOGISTICS, BLDC,
MPC, TRANSPORTATION, KINEMATIC DIAGRAM, ILON WHEEL, OMNI
WHEEL

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	3
ВСТУП	4
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КІНЕМАТИК ДЛЯ ПЛАТФОРМИ СКЛАДУВАННЯ	6
1.1 Кінематика на базі поліколес	7
1.2 Кінематика на базі колес Ілона	11
2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС РУХУ ПЛАТФОРМИ	16
3. Вибір засобів автоматизації рухомої платформи	20
3.2.1 Блокова комутація	24
3.2.2 Синусна комутація	25
3.2.3 Векторне управління.....	31
3.3 Моделювання роботи приводу	34
3.4 Управління з прогнозуючими моделями	36
4.АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УПРАВЛІННЯ З ПРОГНОЗУЮЧИМИ МОДЕЛЯМИ (MPC) ТА ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО- ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ (PID)	40
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	51

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СУ - Система управління

МК - Мікроконтролер

BLDC - Brushless DC electric motor (бесколлекторний електродвигун постійного струму)

PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motor (синхронний двигун з постійними магнітами)

ЕРС - Електрорушійна сила

МДН - Транзистор з МД/ОН структурою

MPC - Model predictive control (управління з прогнозуючими моделями)

PID - Пропорційально - інтегрально - диференціальний закон регулювання

PSO - Particle Swarm Optimization (метод рою часток)

PWM(ШІМ) - Pulse-width modulation (широтно-імпульсна модуляція)

ВСТУП

Підвищення рівня ефективності промислового виробництва завжди і за будь-яких умов являється важливою й актуальною задачею. Значну роль в її вирішенні мають реорганізація і автоматизація бізнес-процесів та різноманітних видів діяльності, в тому числі і процесів складської логістики.

Налагоджена система функціонування складів та її інтеграція в системи складського обліку дозволяє швидко приймати рішення про закупівлю матеріалів і комплектуючих виробів, початку виготовлення деталей і складальних одиниць, вести облік інструментальних засобів та інших товарно-матеріальних цінностей.

Ефективне переміщення та зберігання продукції й сировини для потреб виробництва - вигідна конкурентна прерогатива для будь-якого підприємства. Однак вимоги до логістики прогресують значними темпами, а складські технології закладаються при проектуванні на декілька десятиріч вперед. В умовах постійно зростаючих вимог логістики, залишатися інвестиційно привабливим підприємством досить важко. Крім цього є необхідність продовжувати ефективно розпоряджатися складськими приміщеннями протягом усього часу існування складу.

У 70-х і 80-х роках минулого сторіччя, актуальні на той час логістичні технології (кранові та конвеєрні системи) дозволили оптимізувати складські площі, зменшити рівень витрати на утримання складу і поліпшити якість його функціонування.

У даний момент стандартна ручна система складування зі штабелерами і кранова система вичерпали свої можливості для оптимізації.

Інженерно-технічні рішення систем складування вже не відповідають поточним вимогам замовника, тому він прагне зменшити експлуатаційні витрати і отримати ефективно функціонуючі і безпечні складські приміщення. Роботизовані комплекси транспортування і зберігання, які винайшли провідні компанії в галузі автоматизації, набули широкого поширення, так як роботи, що працюють в системі набагато продуктивніше ніж люди, і витрати на їх обслуговування менші ніж виплати працівникам.

Концепція системи складської логістики нового покоління полягає у використанні таких вузлів як:

- Палети з можливістю трекінга положення та стану на складі.
- Стелажі, з'єднаних між собою на кожному рівні. Стелажі одночасно виконують кілька функцій: є каркасом споруд комплексу, підтримують піддони і забезпечують доступ до них візків.
- Програмного забезпечення та серверу - надійної і ефективної системою управління складом, системою контролю складу, системою управління транспортом.
- Маленьких і відносно легкі візки. Кожен із яких автономний, працює від акумуляторної батареї і має доступ до кожного піддону на складі. Візки легко пересуваються по всьому складу і можуть залишати його, щоб «потрапляти» до місця обробки чи до місця комплектації товару.

Зазвичай одиниці зберігання переміщуються складами за допомогою конвеєрів або штабалер. Такий підхід залучає до роботи працівника – людину, яка значно сповільнює логістичні процеси. При новій концепції необхідно розробити новий підхід, при вантажі знаходяться на спеціальних рухомих платформах. Метою цієї роботи і є створення системи керування рухомої платформи в сучасній складській логістиці.

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КІНЕМАТИК ДЛЯ ПЛАТФОРМИ СКЛАДУВАННЯ

Можливість рухатися в будь-якому напрямку є безперечною перевагою для будь-якого наземного транспортного засобу, особливо якщо вирішується завдання маневрування в межах обмежених складських приміщень. До таких транспортних засобів можна віднести вилочні навантажувачі, платформи для транспортування і обслуговування авіаційної техніки, моторизовані візки і вантажівки. Можливість пересуватися в будь-якому напрямку на площині без зміни орієнтації корпусу транспортного засобу дозволила здобути широку популярність мобільних роботів на всенаправлених колесах.

Конструкція і особливості руху подібних роботів дають ряд переваг. За рахунок особливої конструкції всенаправлених коліс, мобільний робот має можливість в будь-який момент часу змінити напрямок руху на новий кут без здійснення додаткового розвороту при виході на нову траєкторію. Також поступальний рух платформи можна поєднувати з обертальним, так що робот буде під'їжджати до місця призначення під заданим кутом.

Зараз існує 2 типи всенаправлених коліс, які дають платформі змогу рухатися в будь-якому напрямі на площині без додаткових механічних засобів. Це поліколесо (omni wheel) та колесо Ілона (mecanum wheel).



Рисунок 1.2 Поліколесо



Рисунок 1.2 Колесо Ілона

1.1 Кінематика на базі поліколес

Основна ідея руху мобільного транспортного робота на поліколесах полягає в наступному: поступальний рух робота оптимально здійснюється тим колесом, вісь обертання якого утворює найбільший кут з заданим напрямком руху, а колесо, яке утворює найменший кут, буде доцільно зупинити, тому що його вплив на рух робота не суттєвий. Щоб досягти мінімального опору на периферії колеса встановлюються ролики, напрямком обертання яких перпендикулярно напрямку руху колеса.

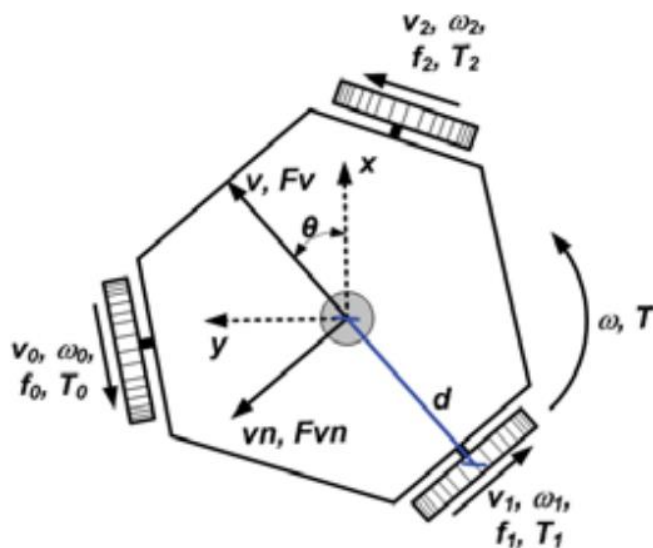


Рисунок 1.3 Векторна діаграма трьохколесної системи

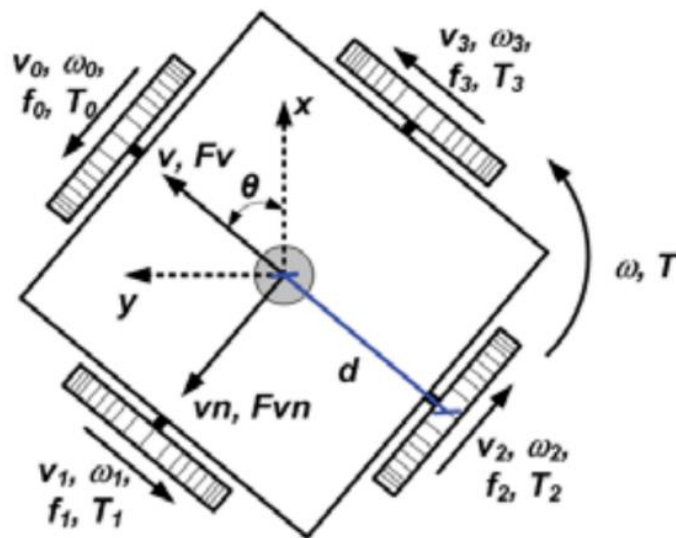


Рисунок 1.3 Векторна діаграма чотирьохколесної системи

Механічні конфігурації всенаправлених роботів з поліколесами базуються на трьох або чотирьох колесах. Триколесні системи механічно простіші, але роботи з чотирма колесами мають більші швидкість та прискорення з такими ж двигунами. Очікується, що чотириколесні роботи матимуть ефективніше зчеплення з підлогою якщо всі колеса притиснуті до підлоги однаково.

Припускаючи, що на одне колесо приводиться у дію одним двигуном, і що всі використовувані двигуни однакові:

За допомогою чотириколесної системи отримується від 50% (при переміщенні вздовж осі колеса) до 71% (при переміщенні 45° від осі колеса) від загальної потужності чотирьох двигунів. З цього випливає, що платформа використовує загальну потужність еквівалентну від 2 до 2,83 потужностей двигуна.

За допомогою триколесної системи ви отримується від 47% (при переміщенні вздовж осі колеса) до 68% (при переміщенні 30° від осі колеса) від загальної потужності трьох двигунів. Тоді платформа використовує від $\sqrt{2}$ ($\sim 1,41$) до 2 потужностей двигуна.

Триколісна система має нижчий коефіцієнт корисної дії, але незначно. Також вона має меншу загальну потужність (за рахунок меншої кількості двигунів). Це зменшення призводить до повільнішого прискорення та зменшення моменту лінійного переміщення.

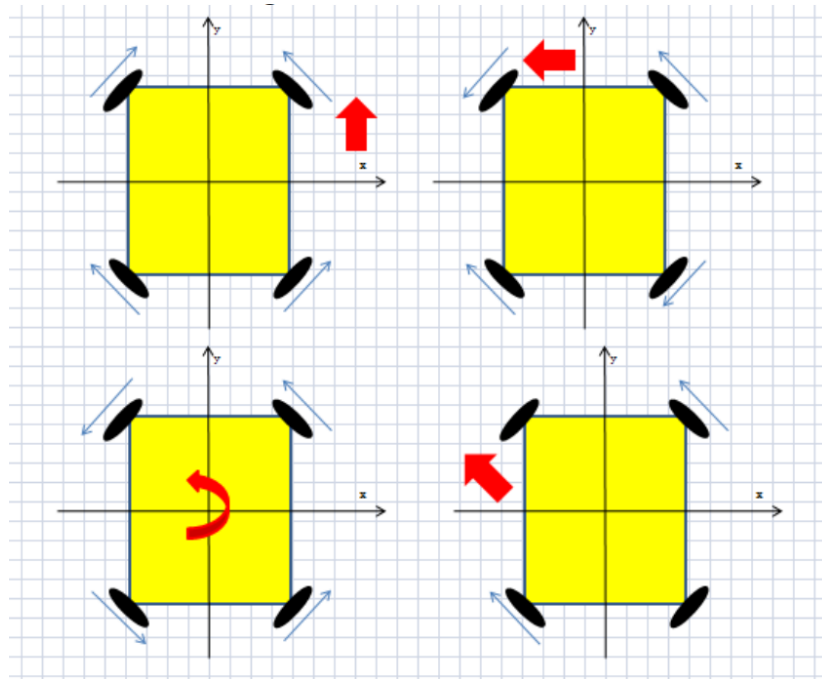


Рисунок 1.4 Траєкторії руху чотирьохколісної системи

В чотириколісній платформі колеса можуть бути додатково віддалені один від одного, що збільшує опорну основу (при тому, щр можна встановити колеса в платформу будь-якого розміру). Це призводить до кількох речей. По-перше - підвищена стабільність, отримана цією базою. По-друге, це створює більший “важель” для коліс, оскільки вони знаходяться далі від центру ваги платформи, в результаті чого вони можуть прикладати більший крутний момент до вантажу, що збільшує здатність обертатися навколо центральної осі (або протистояти обертанню).

Чотириколісні рами також легше сконструювати із “стандартних” конструкційних засобів, оскільки вони потребують лише прямих кутів, на відміну від кутів 120° або 60° , необхідних для триколісної платформи.

Виходячи з цього, можна стверджувати, що чотириколісні рами з поліколесами доцільніше використовувати при створенні платформи для складської логістики. Але такий варіант все одно має значні недолки, а саме – відносно низький результуючий момент при поступальному русі. В цьому плані, платформи з колесами Ілона мають перевагу.

1.2 Кінематика на базі колес Ілона

Колесо Ілона - це всенаправлений тип колеса, який винайшов у 1973 році інженер шведської компанії «Месапум АВ» Бенгт Ілон. Конструкція колеса включає в себе жорстку раму та пасивні ролики, встановлені на 45 градусів до площини колеса навколо осі обертання.

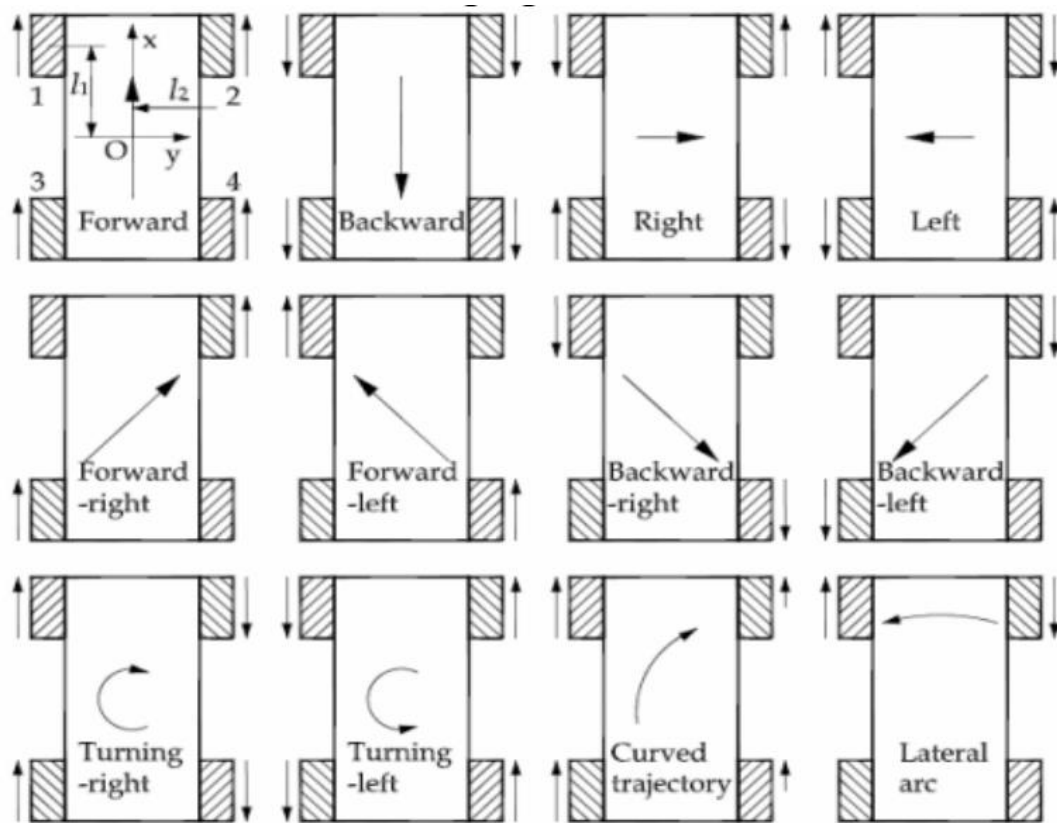


Рисунок 1.5 Траєкторії руху платформи на колесах Ілона

Конструкція ролика забезпечує вільне переміщення у будь-якому напрямку без зміни орієнтації. Крім того, конструкція колеса Ілона також забезпечує вільне обертання навколо центральної осі із відносно низьким крутним моментом, а також мінімальним тертям з поверхнею. Обидві ці характеристики забезпечують хорошу маневреність у місцях, які дуже обмежені і не дозволяють традиційним колесам рухатися. Вони також мають ті самі вимоги до крутного моменту, що і класична кінематика з руловим механізмом. Завдяки тому, що коефіцієнт тертя з підлогою значно менший, вони ковзають при нижчих рівнях крутного моменту в порівнянні з звичайними колесами.

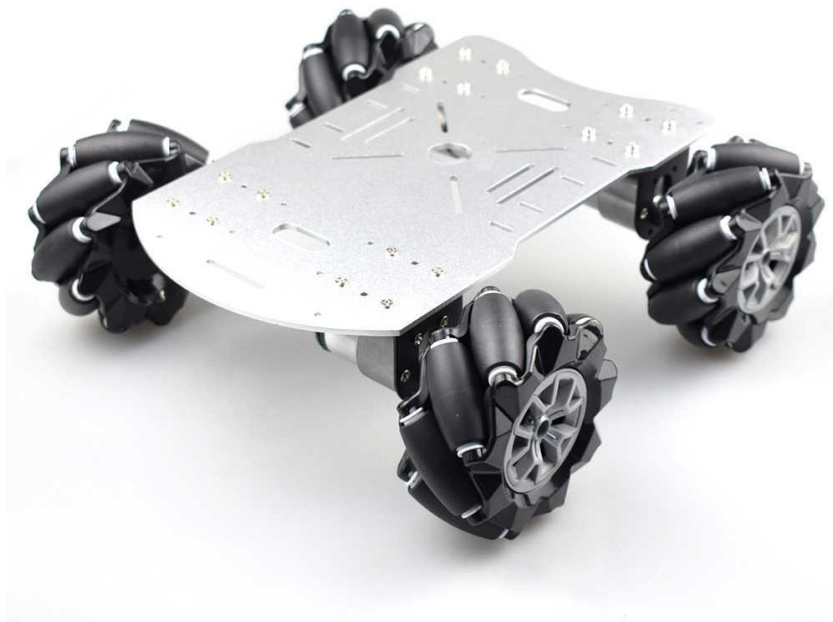


Рисунок 1.6 Платформа з колесами Ілона

Прикладаючи момент до такого колеса отримуємо такі вектори сил

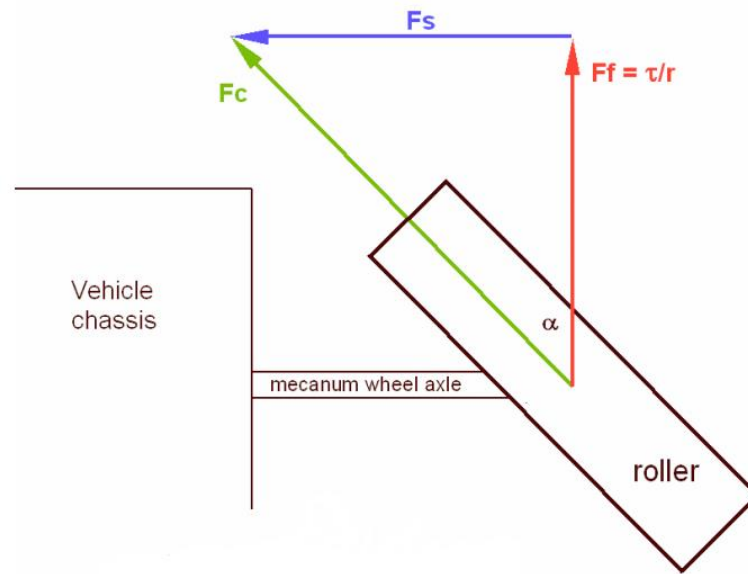


Рисунок 1.7 Проекція сил, що діють на колесо

Зелений вектор F_c - сила реакції поверхні на дно ролика, який контактує з цією поверхнею. Припускаючи відсутність тертя в роликівих підшипниках, ця сила повинна бути вирівняна вздовж осі ролика.

F_c це сума векторів F_s і F_f .

F_s врівноважується рівною, але протилежно направленою силою від колеса з іншого боку транспортного засобу (коли ці колеса рухаються з однаковим крутним моментом). Це відбувається у випадку, коли транспортний засіб рухається прямо вперед.

F_f – вектор поступового руху і знаходиться в площині колеса. Припускаючи, що колесо не прискорюється (постійна або нульова швидкість транспортного засобу), чистий крутний момент на колесі повинен бути нульовим. Отже, F_f має дорівнювати τ / r , якщо " τ " - обертальний момент, а " r " - радіус

колеса. Крутний момент $r \cdot F_f$ врівноважує крутний момент τ , для нульового крутного моменту на колесі. Це, що F_c має дорівнювати $F_f / \cos(\alpha)$.

Отримавши результуючі вектори швидкості та сил для платформ на колесах Ілона та платформ на поліколеса маємо наступну таблицю

6/23/10 © Ether		Standard	Omni	Mecanum
kinematics	V_f	$\omega \cdot r$	$\omega \cdot r \cdot \sqrt{2}$	$\omega \cdot r$
	V_r	-	$\omega \cdot r \cdot \sqrt{2}$	$\omega \cdot r$
	V_d	-	$\omega \cdot r$	$\omega \cdot r / \sqrt{2}$
force	F_f	$4\tau / r$	$4\tau / (r\sqrt{2})$	$4\tau / r$
	F_r	-	$4\tau / (r\sqrt{2})$	$4\tau / r$
	F_d	-	$2\tau / r$	$2\tau\sqrt{2} / r$

Таблиця 1.1 Скалярні значення векторів швидкості та сили

V_f, F_f – вектори швидкості та сили при русі вперед

V_r, F_r – вектори швидкості та сили при русі вбік

V_d, F_d – вектори швидкості та сили при русі по діагоналі

Хоча платформа на колесах Ілона і має гірші показники швидкості при поступовому русі, але має перевагу перед платформою на поліколесах у моменті, який в $\sqrt{2}$ (~1.41) раз вищий в будь-якому напрямку руху. Перевага в моменті є більш необхідною при створенні платформи для вантажоперевезення.

Через це, платформи на колесах ілона стали широко розповсюдженими в різних сферах, таких як: військова, медична, будівельна, космічна і.т.д



Рисунок 1.8 Підйомник на колесах Ілона

Але з іншого боку, використання кінематики основаної на колесах Ілона спричиняє певні складності при побудові системи. По-перше, це необхідність використовувати 4 однакових приводи замість 2 у класичній системі (відповідно 4 регулятори).

Вони також дуже сприйнятливі до нерівних підлог, що може вплинути на їх здатність рухатися в бажаному напрямку. Це слід враховувати при побудові складського приміщення та його подальшого використання.

Також виникає потреба в значно складнішому алгоритмі керування, адже необхідно управляти 4 колесами одночасно, що може стати складною задачею для МК.

2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС РУХУ ПЛАТФОРМИ

Необхідно запропонувати простий метод, який використовуватиме єдиний метод управління, який зчитує єдиний вхід швидкості та видає завдання на чотири серводвигуни. Вхідні дані отримуються від кутової швидкості кожного з чотирьох приводів. Отримавши кінематику з колісної системи, а також моделюючи сервосистему, ми можемо отримати платформу коліс з лінійним та кутовим регулюванням швидкості.

Виходячи з цього отримуємо сервомоторну систему, яка складається з двигуна, з'єданого з редуктором, а також навантаження, жорстко закріпленого на вихідному валу. Використання редуктора не є обов'язковим і обумовлюється тим, що не завжди є можливість підібрати двигун з необхідними характеристиками.

Розглянемо двигун, редуктор та навантаження з моментами інерції: J_m , J_g та J_l . Двигун приводиться в дію вхідною напругою в його статорі, що позначається V_s , і має дві електричні константи K_1 і K_2 .

K_1 - обчислюється з урахуванням крутного моменту двигуна в $N\cdot m$, розділеного на номінальну напругу

K_2 - з урахуванням моменту збою в $N\cdot m$, поділеного на швидкість холостого ходу при номінальній напрузі в радіанах.

N - коефіцієнт передачі між двигуном та навантаженням.

C - коефіцієнт демпфування навантаження, в $n\cdot m\cdot c / рад$

θ_m - вихідний кутовий зсув коефіцієнта демпфування

Обертальний рух двигуна можна описати за допомогою наступного нелінійного диференціального рівняння:

$$(J_m + J_g + \frac{1}{N^2} J_l) \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + c \frac{d\theta_m}{dt} = K_1 V_s - K_2 \frac{d\theta_m}{dt}$$

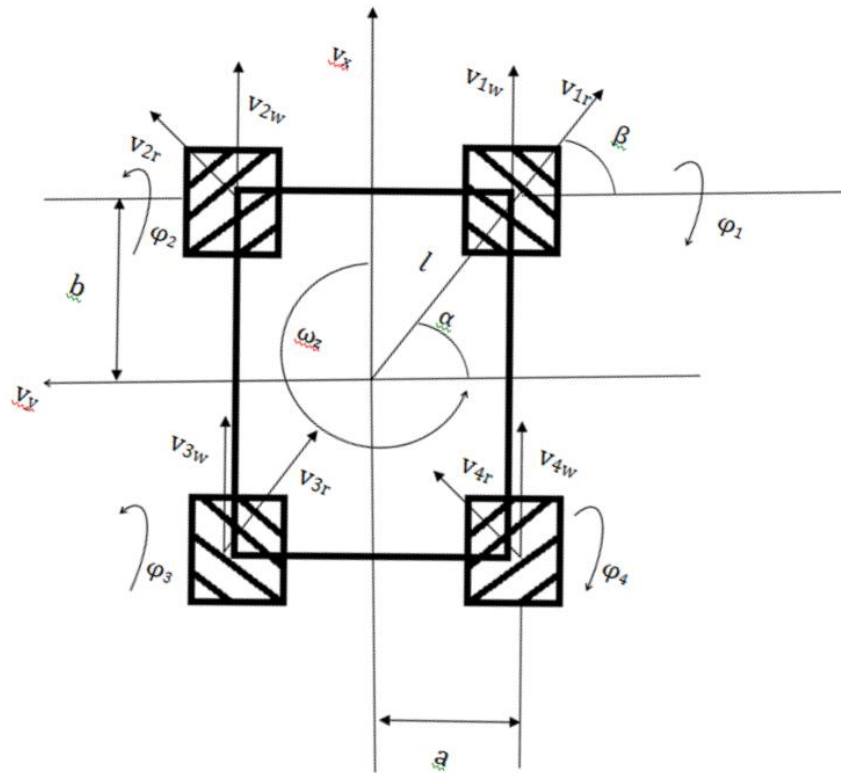


Рисунок 2.1 Кінематична модель платформи

Нехай швидкість у декартових координатах описується як :

$$v_c = [v_x \ v_y \ \omega_z]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$$

де v_x і v_y - лінійні швидкості, а ω_z - обертання навколо осі z .

Кутові швидкості коліс описуються як:

$$\omega_w = [\varphi_1 \ \varphi_2 \ \varphi_3 \ \varphi_4]^T \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$$

З роликками, нахиленими під $\gamma = 45^\circ$ до осі колеса, взятими за годинниковою стрілкою, виходячи назовні від встановленої рами, як показано на малюнку 2.1.

Лінійну швидкість на колесах можна обчислити як:

$$V_w = r \omega_w \cos \gamma$$

Беручи до уваги декартовий вектор швидкості, v_w також можна записати так:

$$v_{wi} = r \omega_w \cos \gamma = [\sin(\alpha + \beta + \gamma) \quad -\cos(\alpha + \beta + \gamma) \quad -l \cos(\beta + \gamma)] [v_x \quad v_y \quad \omega_z]^T$$

Де α - кут між геометричним центром платформи та центром колеса, l - відстань між цими положеннями, а β - кут між віссю колеса та лінією, позначеною l . Радіус головного колеса r . Нехай $v_{ci} = [v_{xi} \quad v_{yi} \quad \omega_{zi}]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, де v_{ci} - швидкість в інерційній системі. Матриця обертання робота з точки зору інерційної системи, ${}^R R_i(\theta)$, виглядає наступним чином:

$${}^R R_i(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Де θ - кут між осями робота та інерційними осями. $v_c = {}^R R_i(\theta) v_{ci}$. Припускаючи, що l і r рівні на всіх колесах, ми можемо підставити v_c у v_w на ${}^R R_i(\theta) v_{ci}$. Значення α , β та γ можна замінити наступними з таблиці 1.

Wheel	α	β	γ
1	$\tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$-\tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$-(\pi/2 + \pi/4)$
2	$\pi - \tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$\tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$(\pi/2 + \pi/4)$
3	$\pi + \tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$-\tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$-(\pi/2 + \pi/4)$
4	$2\pi - \tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$\tan^{-1}(\frac{b}{a})$	$(\pi/2 + \pi/4)$

Таблиця 2.1. Кутові параметри колес.

Підстановка дозволяє знайти зворотнє рівняння кінематики

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = -(\sqrt{2}/r) \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

З визначником Якобі

$$J_0 = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ -\sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & -\sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \\ \sqrt{2}/2 & \sqrt{2}/2 & l \sin(\pi/4 + \alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Отримавши псевдоінверсію J_0 , яка дорівнює J_0^+ , ми можемо знайти рівняння прямої кінематики, яке буде вкладено в остаточну модель.

$$J_0^+ = (J_0^T J_0)^{-1} J_0^T$$

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = -(\sqrt{2}/2)(r) J_0^+ \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}.$$

3. Вибір засобів автоматизації рухомої платформи

Для реалізації алгоритму керування колесами мобільної платформи необхідних привод що задовольняє наступні вимоги:

- Висока енергоефективність:
Компоненти платформи живляться від акумулятора
- Компактність
Необхідна для поліпшення масо-габаритних показників платформи
- Низький рівень шуму
Для дотримання стандартів складського приміщення
- Високий крутний момент при низьких обертах
- Точність позиціонування ротора

Для цієї задачі доцільно використовувати BLDC

Зараз такому типу двигунів приділяють велику увагу через високу енергоефективність, великий діапазон робочих параметрів та безшумній роботі порівняно з щітковими та асинхронними двигунами. Складні нелінійні системи, такі як BLDC, значення внутрішніх параметрів яких змінюються залежно від середовища або опорного сигналу, досить важко контролювати. Звичайні контролери PID, ефективні для лінійних систем, але їх продуктивність погіршується при роботі з BLDC. Це спонукало до застосування в системах різних типів методів управління, таких як гібридна нейро нечітка [1], адаптивна нечітка логіка [2], надійний H_{∞} нечіткий [3], надійний нелінійний контроль [4], управління нейронною мережею [5], так можна досягти бажаної продуктивності та стабільності. Тим не менше, головними проблемами цих методів управління є вимога до попередніх даних про стан системи та складність налаштування.

3.1 Вибір привода механічної платформи

В якості об'єкта управління для СУ виступає безколекторний двигун постійного струму (БДПС) в англomовній літературі він має аналогічну назву BrushLess Direct Current drive (BLDC). Безколекторні двигуни поєднують в собі надійність машин змінного струму та хорошу керованість машин постійного струму. Відсутність щітково-колекторного вузла позбавляє багатьох проблем:

- Іскріння.
- Перешкоди.
- Зтирання щіток.
- Поганий тепловідвід якоря.

Ротор безколекторних двигунів має деяку кількість пар магнітів, від числа магнітів залежить кількість пар полюсів двигуна, а від них, в свою чергу, виникає залежність механічного обертання від електричного. Залежно від розташування ротора відносно статора, двигуни бувають: Inrunner - ротор знаходиться всередині статора, і Outrunner, де ротор знаходиться поверх статора з обмотками. Статор виготовлений з електротехнічної сталі в пази якого прокладена мідна обмотка. Від числа обмоток залежить кількість фаз. У нашому випадку двигун трифазний, така кількість обмоток є найпоширенішою.

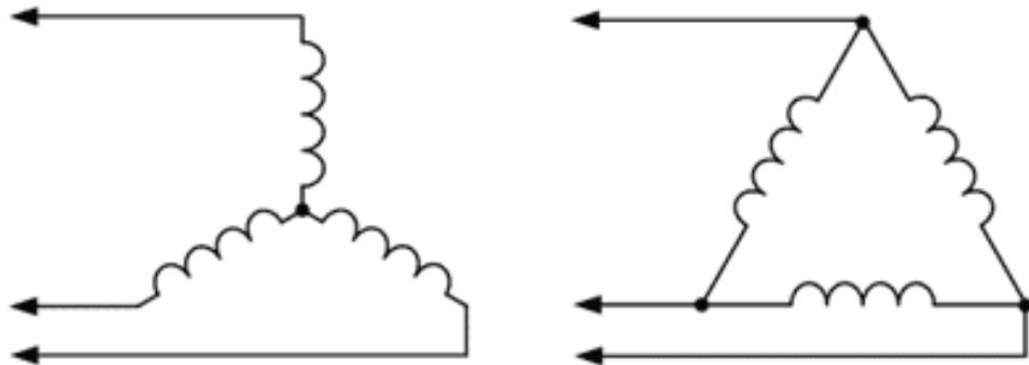


Рисунок 3.1 - Схеми підключення обмоток

Обмотки підключаються за схемою «зірка» або «трикутник». В даному дипломному проекті використовується двигун зі схемою «зірка»

Щітково-колекторний вузол в таких двигунах замінений на плату комутації обмоток.

Одним з основних елементів управління двигуном є визначення положення ротора. Для цього на двигун встановлюють датчики. Це можуть бути датчики Холла або ж енкодер, розташований на роторі двигуна. Якщо ж на моторі відсутні будь-які датчики, то положення ротора визначають шляхом вимірювання зворотної ЕРС на вільній фазі.

В даному проекті був використаний BLDC двигун з трьома датчиками Холла що входить до складу мотор-колеса.

Конструкція мотор-колеса – Inrunner. Це дозволяє зменшити габарити платформи, а також легко підібрати двигун з необхідними параметрами.



Рисунок 3.2а – Мотор-колесо



Рисунок 3.2б – Мотор-колесо Ілона

3.2 Визначення алгоритму роботи драйвера двигуна

Існують певні розбіжності в формулюванні визначення безколекторного двигуна двигунами. Термін "безколекторний двигун" або "безщітковий мотор" – містить в собі декілька груп приводів, в тому числі і безколекторні мотори з постійними магнітами. В роботі матимуться на увазі саме безколекторні двигуни з постійними магнітами.

В багатьох джерелах, мотори з постійними магнітами діляться на групи за формою зворотного ЕРС. Зворотня ЕРС може мати трапецивидну форму або синусоїдальну форму. Хоч визначення в літературі і розбігаються, частіш за все визначають, що безколекторний мотор постійного струму (BLDC) має трапецеїдальну форму зворотної ЕРС, а синхронний мотор з постійними магнітами (PMSM) має зворотню ЕРС у формі синусоїди. Обидві категорії двигунів можуть приводитись у дію синусоїдальними струмами.

PMSM і BLDC можуть також мати певні конструктивні розбіжності, із-за того, що під час роботи BLDC виникають сплески моменту. BLDC мотори розробляють так, щоб зменшити рівень цих самих сплесків. Проте, обидва типи двигунів можуть збуджуватися як трапецивидними так і синусними струмами. Вважається, що подаючи на BLDC двигун синусний струм, він становиться PMSM.

Якщо обмотки BLDC двигуна збуджувати синусоїдальним струмом, то це викличе зріст крутного моменту, зниження рівня вібрацій, зменшення шуму та зріст максимальної частоти обертання. Що є причиною такого покращення показників? Необхідно згадати, як функціонує класична схема управління бесколекторним двигуном. Для його управління застосовується блокова комутація.

3.2.1 Блокова комутація

Блокова комутація - при досягненні ротором певного положення виконується переключення обмоток (напруга подається на відповідні обмотки) і магнітне поле переміщується і становиться незмінним до наступного часу перемикання обмоток, доки ротор не прокрутиться до наступного стану. Так магнітне поле обертається не плавно, а дискретно.

Це можна описати на прикладі взаємодії двох магнітів. Ротор ніби притягується до магніту. Магніт статора при цьому переміщується дискретно і очікує доки ротор приблизиться, далі робить наступне переключення. При цьому, в момент переключення, відстань між магнітами росте, а їх магнітна взаємодія зменшується, а приближаючись магнітна взаємодія росте. Це і є причиною утворення пульсацій моменту. Якщо виконувати рух більш рівномірно і витримувати певну відстань між станами, магнітна взаємодія не буде пульсувати, а рух вийграє, як у моменті так і в енергоефективності. Через використання синусоїдальної напруги і набувається плавність руху поля статора.

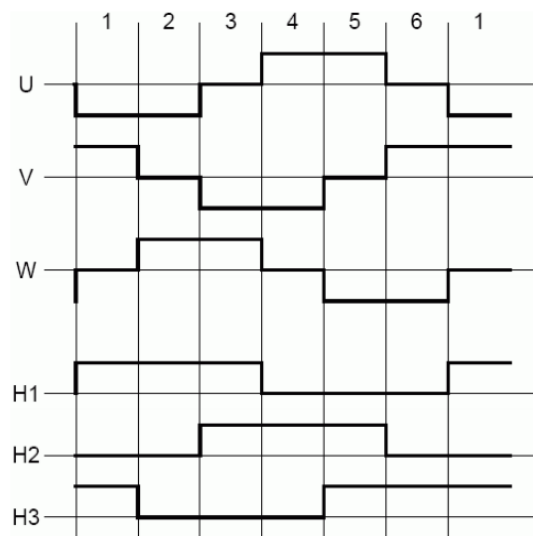


Рисунок 3.2.1 Залежність керуючих сигналів від сигналів з датчиків

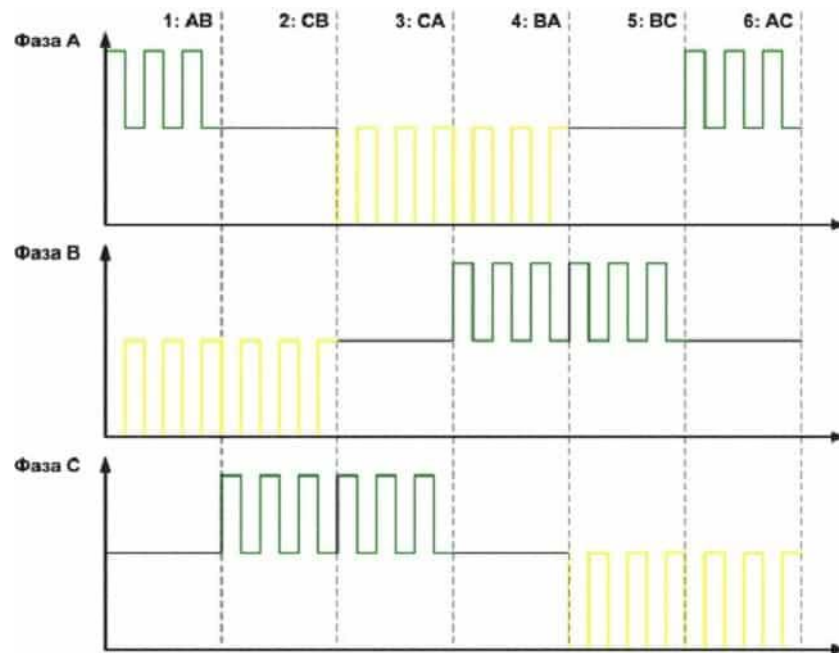


Рисунок 3.2.2 Форма вихідної напруги, блокова комутація

3.2.2 Синусна комутація

При управлінні трифазним мотором за рахунок синусної напруги, для усіх фази необхідно створювати незалежні різниці потенціалів. Виникає задача генерувати трифазную синусоїду с заданими частотою і амплітудою. Це можна зробити використовуючи три напівмоста, відповідно по півмосту на фазу мотора. Кожен напівміст робиться з двох ключів (верхній і нижній), зазвичай це МДН-транзистор.

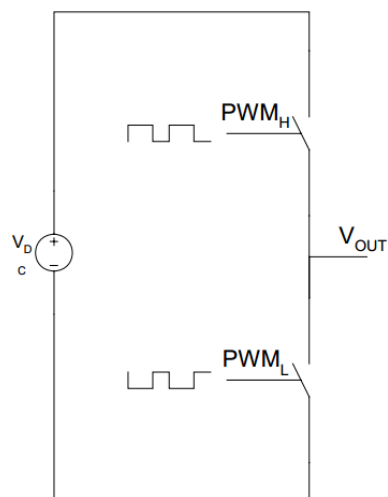


Рисунок 3.2.3 Схема напівмоста

Для генерації заданого значення напруги застосовується ШІМ (PWM). Залежно від заповнення ШІМ можна управляти середньою вихідною напругою. При чому форма вихідної напруги матиме таку ж саму форму як і сигнал вхідного ШІМ, тобто буде у формі меандру як і ШІМ сигнал. Якщо таку напругу сгладити за допомогою низькочастотного фільтра, то на виході матимемо напругу, відповідну до коефіцієнту ШІМ верхнього ключа. Регулюючи заповнення ШІМ можна досягти необхідної форми напруги на виході, так можна отримати і напругу у формі синуса з заданими параметрами.

З певних причин, в драйверах для двигунів не має фільтрів низьких частот. Слід розуміти, що сам мотор виступає у ролі фільтра, індуктивність та опір обмоток мотора виконують роботу R-L фільтра. Навантаження і механічна інерція двигуна також утворюють "механічний" фільтр НЧ. При досить високій частоті ШІМ, випадкове відхилення від середньої обертальної швидкості буде незначним. Також, струм, що протікає через НЧ фільтр, наприклад RC-фільтр, призводить до значних втрат енергії на самому фільтрі.

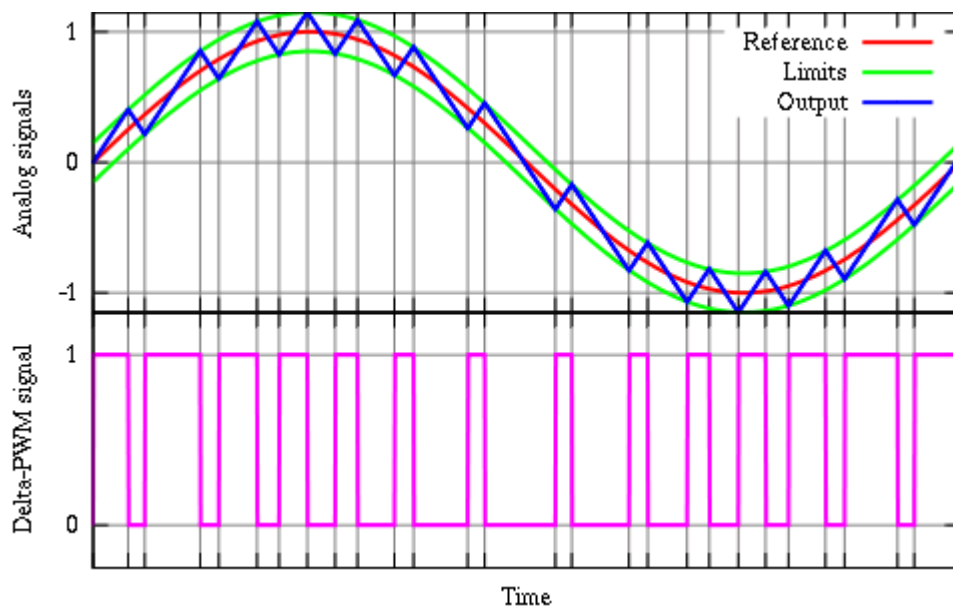


Рисунок 3.2.4 Графік ШІМ та результуючої напруги

Оскільки при генерації PWM використовується комплементарна робота двох ключів (верхнього і нижнього) потрібно врахувати той факт, що для закриття ключа потрібен час. Тому потрібно закривати відкритий ключ, і через деякий час, необхідний для його закриття, відкривати комплементарний ключ. Цей час має назву **Dead-time**. При реалізації схеми керування на контролері цю задачу вирішує таймер, який займається генерацією PWM.

Тепер перейдемо безпосередньо до генерації синусоїди. Знаючи положення ротора в даний момент часу, можна математичним шляхом обчислювати амплітуду (заповнення PWM) для кожної з трьох фаз. Однак математичні обчислення займають багато часу і тому роблять інакше. Можна створити таблицю, в яку необхідно занести заздалегідь обчислену синусоїду для всіх трьох фаз.

Генерування синусоїди для кожної фази - це прямий метод, але є більш ефективний спосіб. Необхідно генерувати три синусоїдальних напруги фаза-фаза (диференціальна напруга між двома фазами) із зсувом фази на 120 градусів між ними. Таблиці 3-1 3-2 показують, як цього можна досягти, не роблячи повні синусоїди для кожного виводу двигуна.

Table 3-1. Terminal and line-to-line voltages, forward driving.

Step	U	V	W	U-V	V-W	W-U
S1-S2	$\sin(\theta)$	0	$-\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$
S3-S4	$-\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta-120)$	0	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$
S5-S6	0	$-\sin(\theta)$	$\sin(\theta-240)$	$\sin(\theta)$	$\sin(\theta-120)$	$\sin(\theta-240)$

Table 3-2. Terminal and line-to-line voltages, reverse driving.

Step	U	V	W	U-V	V-W	W-U
S1-S2	$\sin(\theta)$	$-\sin(\theta-120)$	0	$-\sin(\theta-240)$	$-\sin(\theta-120)$	$-\sin(\theta)$
S3-S4	$-\sin(\theta-240)$	0	$\sin(\theta-120)$	$-\sin(\theta-240)$	$-\sin(\theta-120)$	$-\sin(\theta)$
S5-S6	0	$\sin(\theta-240)$	$-\sin(\theta)$	$-\sin(\theta-240)$	$-\sin(\theta-120)$	$-\sin(\theta)$

Таблиці 3-1 3-2

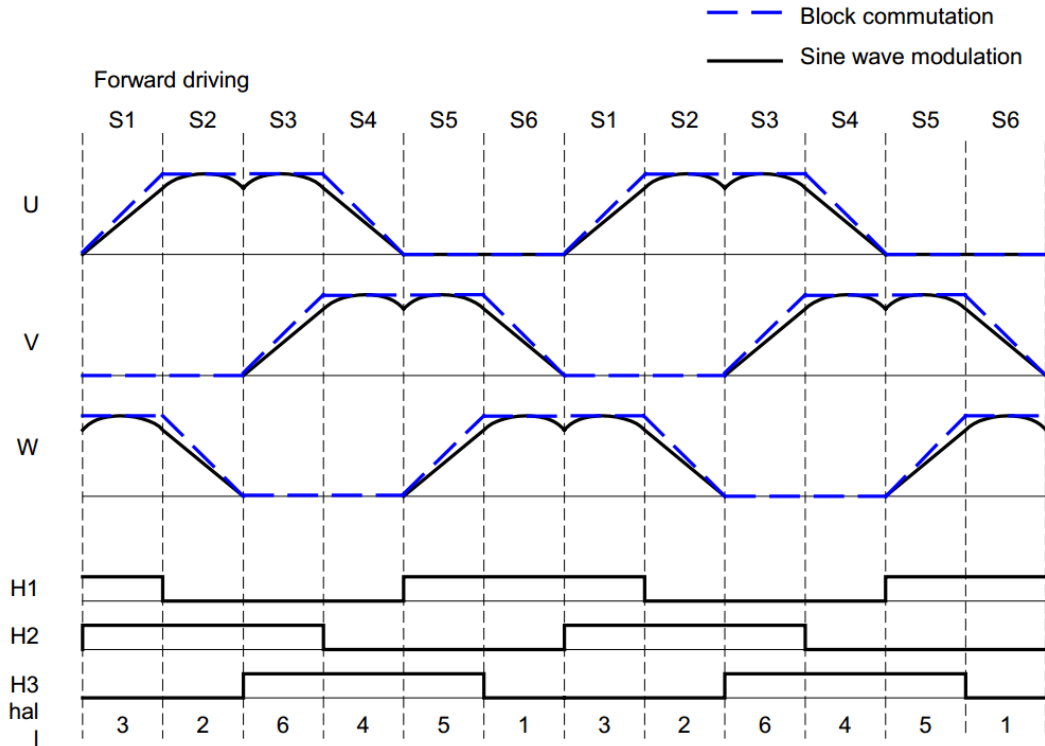


Рисунок 3.2.5 Генерація синусоїдної напруги відповідно

сигналів з датчиків

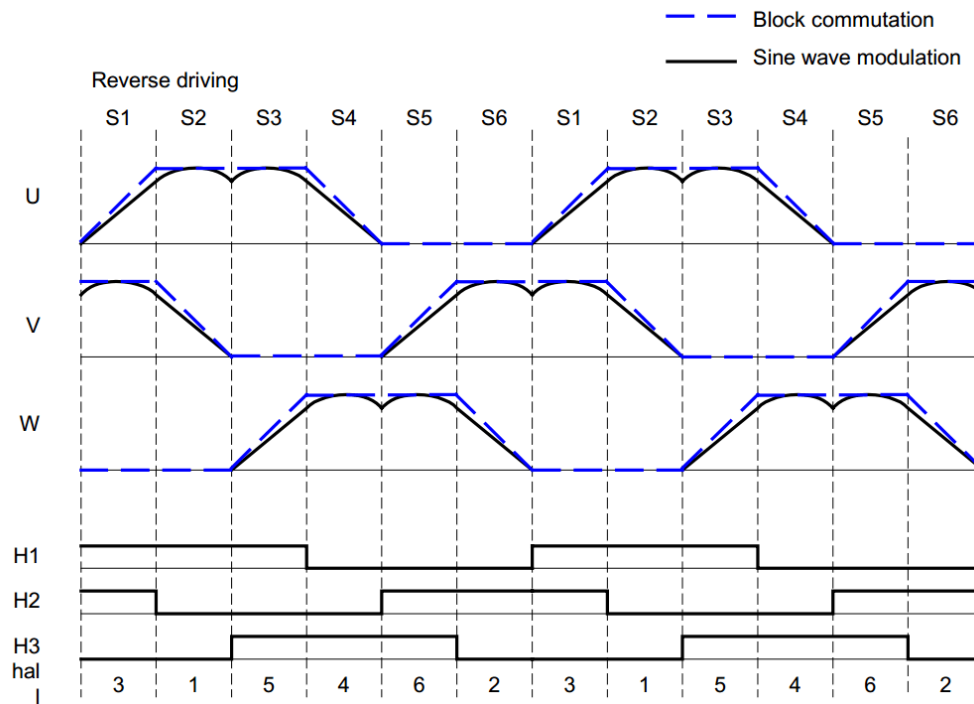


Рисунок 3.2.6 Генерація синусоїдної напруги відповідно

сигналів з датчиків при зворотному обертанні

У такого підходу є дві переваги:

- 1) Максимальна амплітуда згенерованого напруги вище, ніж при генерації чистої синусоїди на кожній фазі. Як наслідок отримаємо більш високий крутний момент і швидкість.
- 2) Кожна фаза двигуна третину часу підключена до землі, що зменшує втрати потужності на комутацію.

При створенні таблиці значень потрібно знайти компроміс між обсягом таблиці і швидкістю роботи з нею. Оскільки форма хвилі однакова для всіх трьох фаз, і відрізняється тільки зсувом на 120 градусів, то можна зберігати в таблиці тільки одну синусоїду і використовувати її для розрахунку всіх трьох вихідних напруг. Однак, для скорочення часу на обчислення, прийнято рішення зберегти в таблиці значення для всіх трьох фаз. Так забезпечується найбільш швидка обробка даних. Використовувана в прикладі таблиця «синусів» має 192 значення для кожної фази. Тобто генерований сигнал буде розбитий на секції і матиме ступінчасту форму.

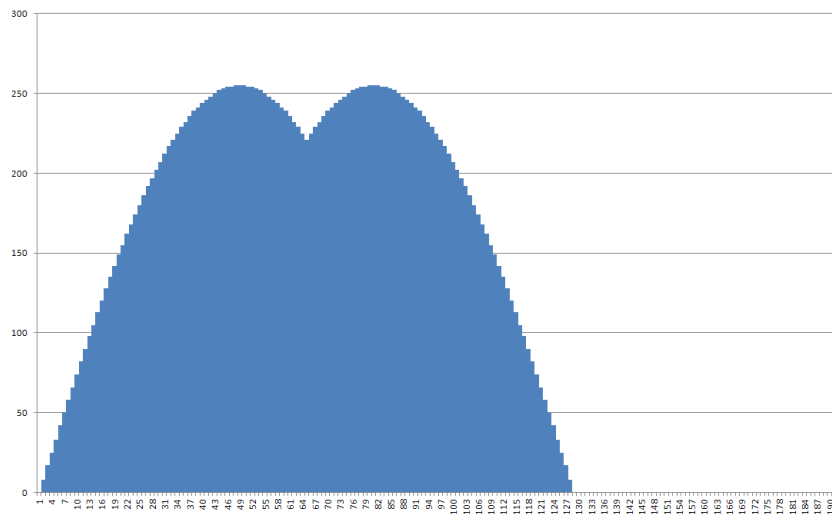


Рисунок 3.6 Ступінчата форма синусоїди

В ідеалі, датчик положення ротора повинен у будь-який момент часу давати дані мікроконтролеру про поточний стан ротора. У цьому випадку у нас немає такої опції, більшість моторних коліс не мають датчика абсолютного кута в конструкції, а підключення зовнішнього датчика знижує надійність роботи, і встановити правильно зовнішній датчик відповідно до обмотки досить важко (якщо така можливість не була передбачена виробником мотору). Три датчики Холла змінюють свій стан 6 разів по колу. Між цими подіями положення ротора не визначене. Для того, щоб визначити поточне положення ротора між станами датчика, ми змушені проводити розрахунки, виходячи з поточної швидкості обертання ротора.

Для того щоб генерувати напругу, що подається на фази двигуна потрібної частоти, необхідно знати швидкість обертання двигуна. Датчик положення використовується для визначення швидкості обертання. Розрахувавши час між двома перемиканнями датчика положення (ми вважаємо, що частота обертання ротора за цей проміжок не змінилася), ми можемо розрахувати частоту, необхідну для формування вихідного сигналу. Отже, знаючи швидкість, ми можемо обчислити положення ротора у будь-який момент. Швидкість обертання ротора змінюється, тому доводиться регулярно налаштовувати вихідну напругу відповідно до фактичного положення ротора. Це регулювання називається фазовим регулюванням.

3.2.3 Векторне управління

Векторне управління (англ. field-oriented control (FOC)) - самим ресурсомістким і складним у виконанні спосіб управління. Основоположним принципом векторного управління є те, що двигун досягає максимального моменту, коли вектор ротора перпендикулярний вектору струму, знаходиться під 90° . Для реалізації цього методу необхідно вимірювати струми на кожній фазі двигуна для розрахунку вектора струму. Класичним векторним керуванням вважається метод завдання моменту.

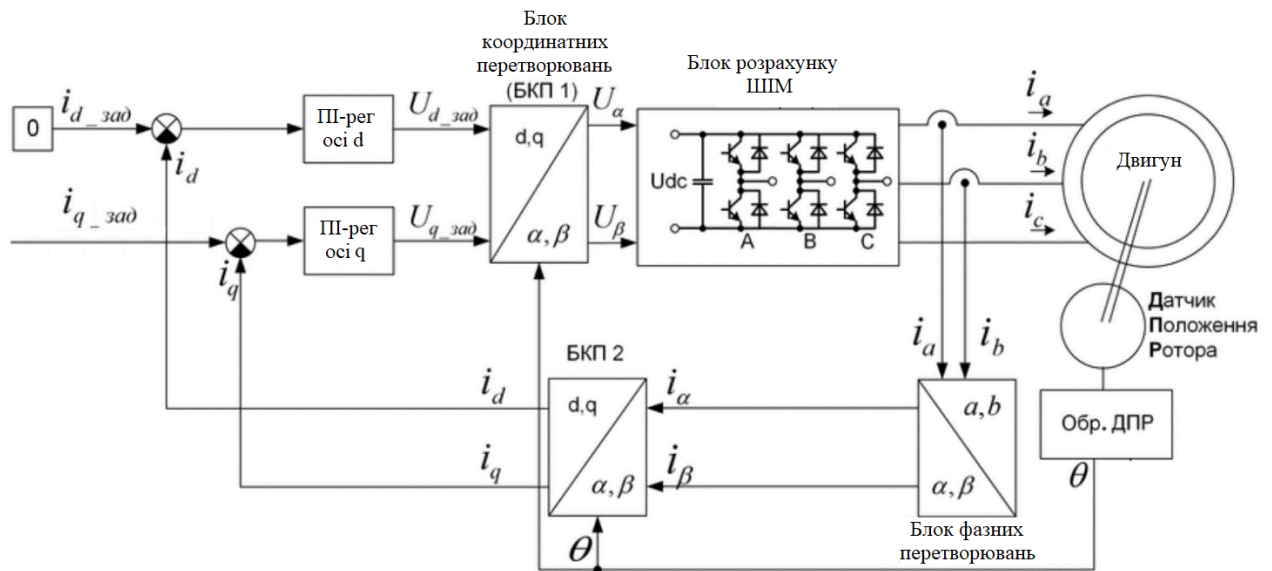


Рисунок 3.7 – Функціональна схема алгоритма роботи двигуна з постійним моментом

Першим завданням для реалізації служить перерахунок трьохфазних струмів в двофазні. Для цього в схемі присутній блок фазних перетворень. В основі цього блоку лежать перетворення Едіт Кларк (рисунок 10).

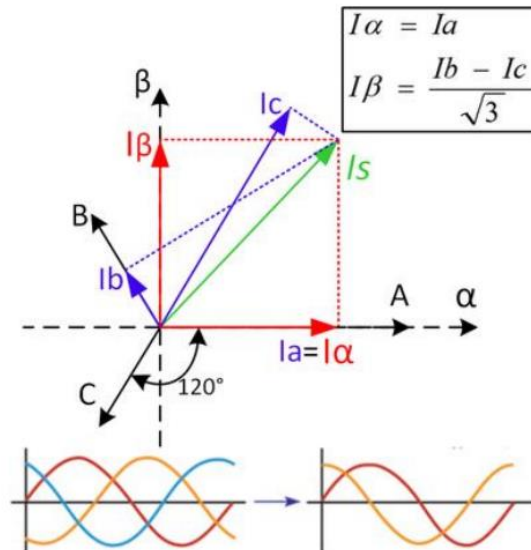


Рисунок 3.2.8 – Векторна діаграма перетворення Едіт Кларк

Ще однією особливістю векторного управління є перетворення статичних осей α і β в обертові відносно осі ротора d і q і навпаки. В англійській літературі їх називають перетворення Парка.

Цими перетвореннями займаються БКП 1 і 2 (рисунок 3.7).

На виході БКП 1 буде вектор напруги, на основі якого відбувається перерахунок заповнення ШІМ для завдання напруги на фазах двигуна.

В даному методі відбувається завдання моменту двигуна оператором.

Метод вимагає великих обчислювальних потужностей мікроконтролера, але має найбільший вигравш у енергоефективності, створюваному моменті та зменшенні пульсацій моменту.

Одним з найбільш затребуваних функцій робота є рух з постійною швидкістю. При експлуатації робота в складських приміщеннях або на підприємстві в якості транспортера, де використовуються різні роботизовані системи, рух за графіком є обов'язковою умовою незалежно від прикладеного навантаження.

Структурна схема алгоритму представлена на рисунку 3.9

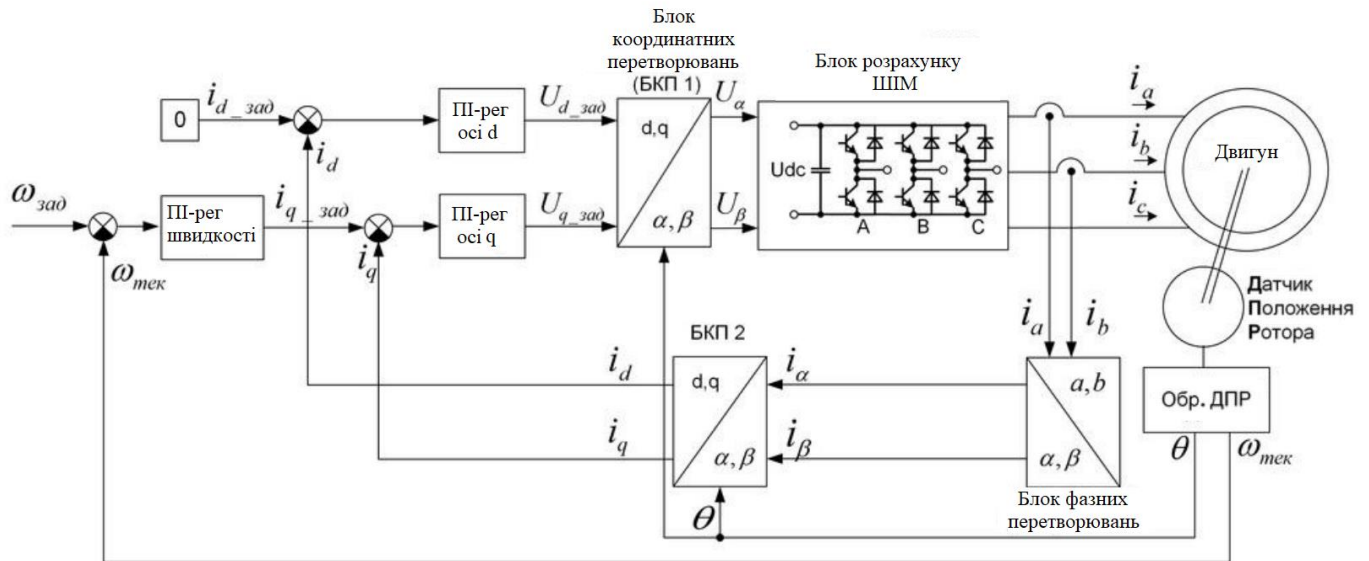


Рисунок 3.2.9 – Функціональна схема алгоритма роботи двигуна з постійною швидкістю

Також можна зустріти варіант схеми для повороту ротора на заданий кут. Тим самим реалізував сервопривід на базі BLDC.

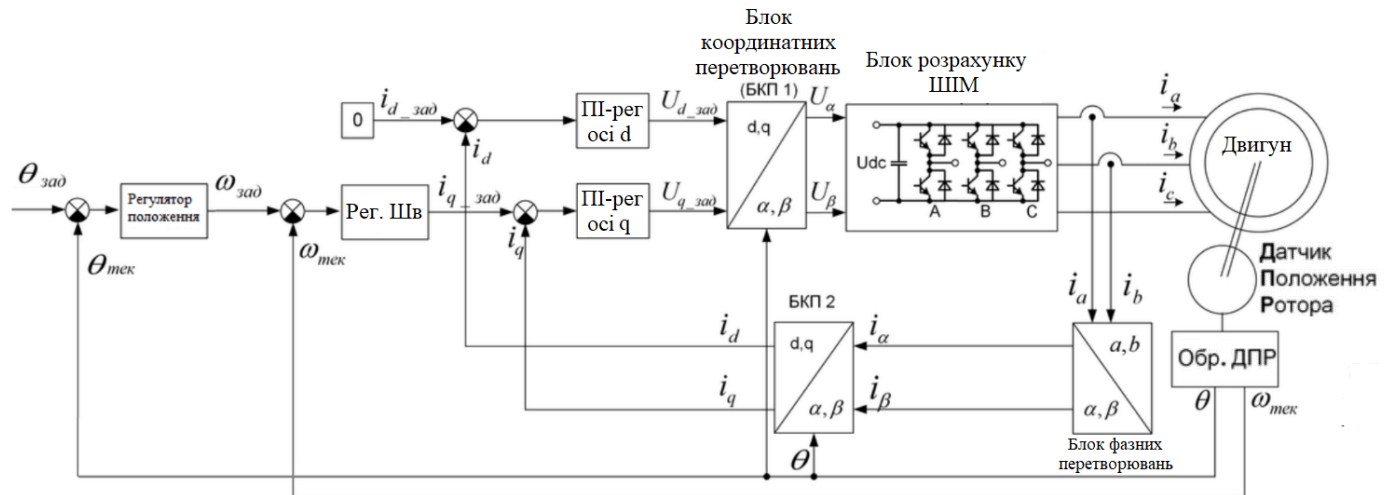


Рисунок 3.2.10 – Функціональна схема алгоритма роботи двигуна з заданим кутом повороту

В якості регулятора положення може бути використаним будь-який необхідний тип регулятора. В цій роботі перевірятиметься робота MPC та PID регулятора в умовах змінного навантаження.

3.3 Моделювання роботи приводу

Здебільшого представлення системи є ключовим фактором у створенні надійного контролера. Модель описує динаміку системи, яка суттєво допомагає у розробці ефективного алгоритму управління системою.

Використаємо класичну схему BLDC двигуна

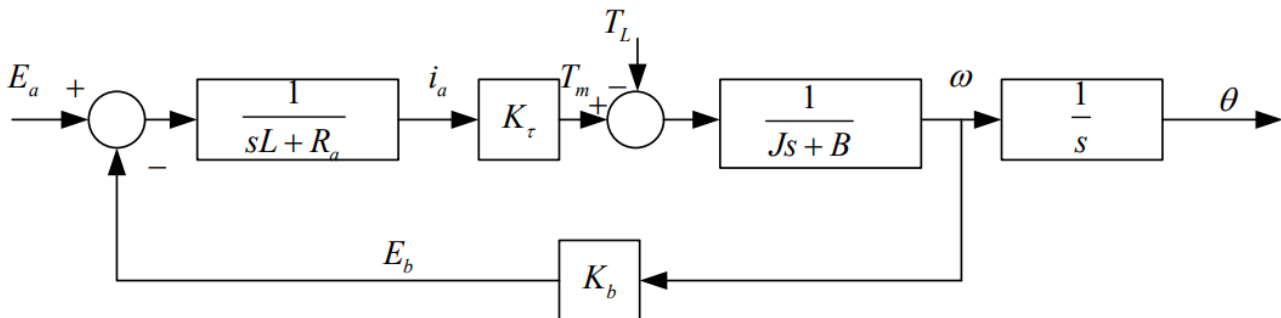


Рисунок 3.3 Блок-схема BLDC

Де E_a - е.р.с ротора,

L - індуктивність,

R_a - опір обмоток,

J - інерція ротора,

B - коефіцієнт затухання

K_τ - постійна крутного моменту.

З блок-схеми, показаної на рис. 3.1 використовуючи перетворення Лапласа, крутний момент двигуна може бути виражений як:

$$T_m(s) = K_\tau i_a(s)$$

Зворотня е.р.с:

$$E_b(s) = K_b \omega(s)$$

Механічне навантаження виражається як:

$$\omega(s) = \frac{1}{Js+B}(T_m(s) - T_L(s))$$

Кутове положення представляється як:

$$\theta(s) = \frac{\omega(s)}{s}$$

При $T_L = 0$ передатна функція матиме вигляд:

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_\tau}{s \left[(sL + R_a)(Js + B) + K_\tau K_b \right]}$$

Вважається, що L і R_a в більшості випадків рівні нулю. Після вибору математичної моделі об'єкта може бути розроблений алгоритм управління для двигуна.

3.4 Управління з прогнозуючими моделями

Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років ХХ століття для управління процесами і устаткуванням в нафтохімічному та енергетичному виробництві, для яких застосування традиційних методів керування було вкрай утруднено у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. Але останнім часом сфера застосування MPC значно розширилася, охоплюючи різні технологічні галузі, економіку та менеджмент.

Основною перевагою MPC, що визначає його успішне використання в практиці побудови та експлуатації систем управління, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку разом з високими адаптивними властивостями. Останнє дозволяє управляти об'єктами зі складною структурою, оптимізувати процеси в режимі реального часу в рамках обмежень на керуючі і керовані параметри, враховувати невизначеності в завданні об'єктів і збурень. Крім того, можливо враховувати запізнення, оскільки часто рішення про управління приймається значно раніше ніж відбувається реалізація цього рішення.

Управління з прогнозуючими моделями ([англ. Model Predictive Control](#)) використовує динамічну модель системи для прогнозування майбутнього напрямку реакції системи. Основною концепцією MPC є частий вибір контрольних вихідних зусиль для вирішення в поточний момент часу оптимальної проблеми управління, і це призводить до мінімізації витрат на розрахунки функцій.

Здатність розрахунку ймовірного стану в поєднанні з класичним зворотнім зв'язком дозволяє алгоритму виконувати регулювання, які є більш плавними та наближеними до оптимальних значень завдання порівняно з ПІД.

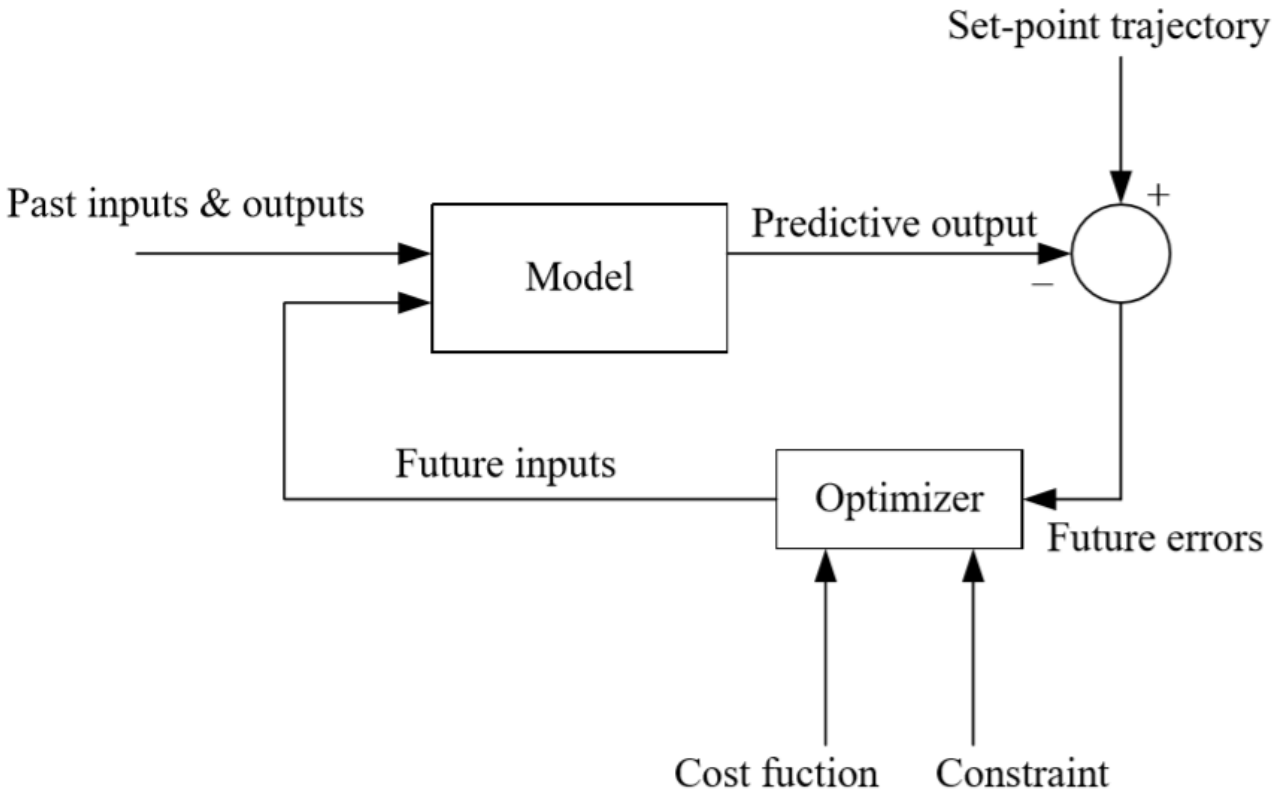


Рисунок 3.4 Архітектура MPC

На наведеному вище рис. 2 видно, що MPC складається із функції витрат, обмежень та моделі об'єкту. Мета - мінімізувати функцію витрат, задану

$$\mathfrak{J} = \sum_{k=0}^{N_p} \left(\hat{y} - r \right)^T Q \left(\hat{y} - r \right) + \sum_{k=0}^{N_p} \left(\Delta u^T R \Delta u \right)$$

N_p - горизонт передбачення

r - завдання

\hat{y} - прогнозований вихід,

Δu - траєкторія керування

Q та R - матриці вагових коефіцієнтів входу-виходу

Алгоритм роботи:

1. Створюється спрощена модель об'єкту
2. Для моделі об'єкту и початкових умов виконується прогнозування поведінки під впливом керуючого сигналу на деякому кінцевому відрізку часу, який називається горизонт прогнозу (Prediction Horizon)
3. Виконується оптимізація керуючого сигналу з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на керуючі і регульовані змінні. Знаходиться оптимальне управління.
4. На часовому відрізку, який визначається одним кроком обчислення що становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу (горизонт управління (Control Horizon)), реалізується знайдене оптимальне управління.
5. По закінченню інтервалу здійснюється вимір фактичного стану, який приймаються за нові початкові умови.
6. Горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, і повторюються пункти 3 - 6 даної послідовності дій.

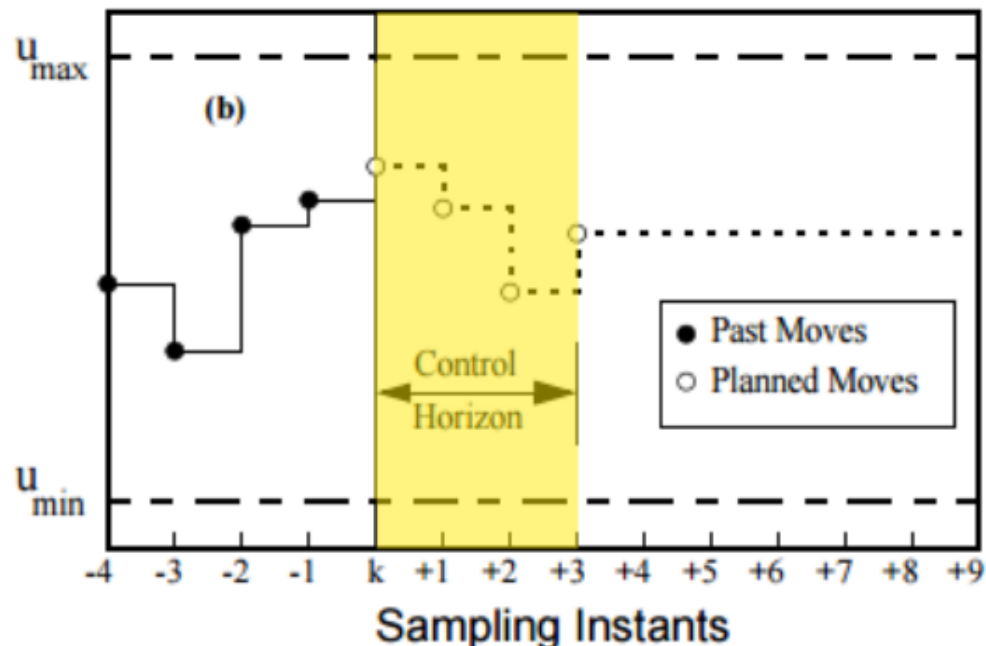


Рисунок 3.4.1 Часова діаграма роботи MPC

При розробці алгоритму MPC, правильний вибір параметрів, таких як горизонт управління (N_C), горизонт прогнозування (N_P), горизонт моделі (H_M), час дискретизації (Δt) та матриці вагових коефіцієнтів входу-виходу мають першорядне значення, оскільки це безпосередньо впливає на правильність функціонування методу.

Горизонт управління (N_C): залежить від кількості маніпульованих переміщень змінних, яка повинна бути оптимізована в інтервалі управління k . Горизонт управління обраний таким, що $N_C < N_P$. Невелике значення N_C дає більш стабільний контроль, а більше значення призводить до зростання обчислювального навантаження та робить MPC більш агресивним.

Горизонт прогнозування N_P : залежить від суми майбутніх інтервалів управління, які контролер MPC повинен оцінити шляхом прогнозування при оптимізації своїх змінних на інтервалі управління k . Зменшення значення N_P робить контролер більш агресивним. Як вказує практика, то цей параметр необхідно поступово збільшувати до тих пір, поки подальші збільшення не призводитимуть до незначного впливу на показники.

Час дискретизації: вибір значення періоду вибірки є компромісом між продуктивністю та обчислювальними навантаження. Невелике значення періоду вибірки призводить до збільшення обчислювального навантаження.

Матриці Q та R : Оскільки метою є мінімізація функції витрат, ці матриці вибираються як $Q \geq 0$ (позитивна напіввизначена матриця симетрії) та $R > 0$ (матриця позитивно визначеної симетрії)

4. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УПРАВЛІННЯ З ПРОГНОЗУЮЧИМИ МОДЕЛЯМИ (MPC) ТА ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ (PID)

Особливістю функціонування механічної платформи в складській логістиці є те, що навантаження можуть змінюватися в залежності від типу та ваги таранспортованого вантажу. Тобто необхідно визначити наскільки критичним для кожного регулятора буде зміна номінального навантаження.

Параметри двигуна що використовувалися для перевірки роботи регуляторів

$$J = 0.01 \text{ Nms}^2;$$

$$b = 0.1 \text{ Nms};$$

$$K = 0.01;$$

$$R = 1 \text{ Ohm};$$

$$L = 0.5 \text{ H};$$

Для перевірки правильності роботи алгоритму векторного управління, був використаний додаток для середовища MATLAB - Motor Control Blockset.

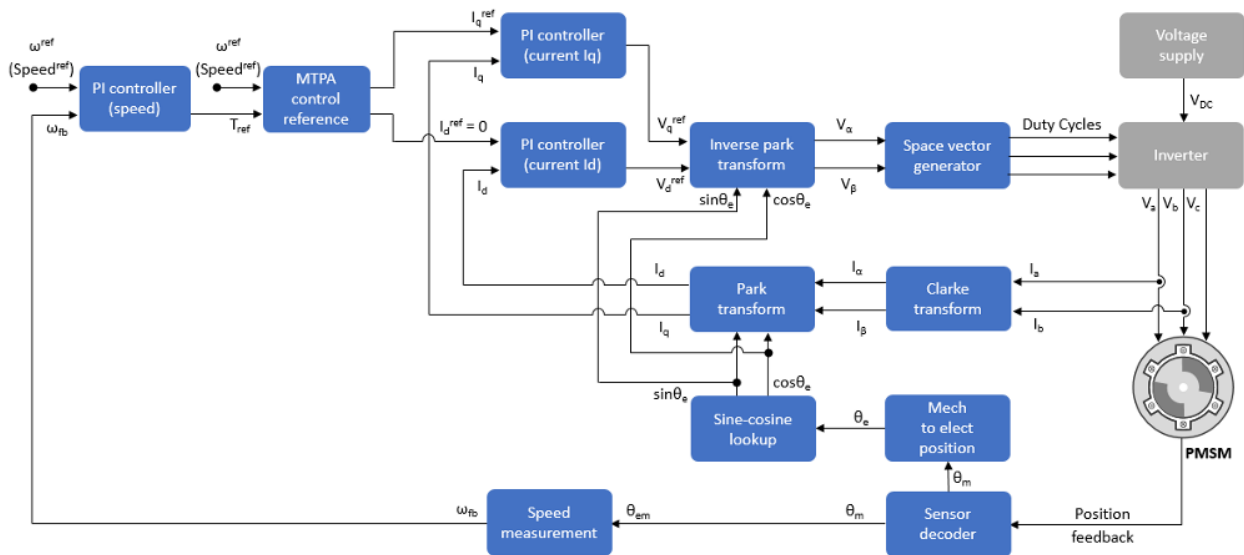


Рисунок 4.1 – Функціональна схема векторного управління в Motor Control Blockset

Завантаживши параметри двигуна до додатку, були отримані наступні графіки:

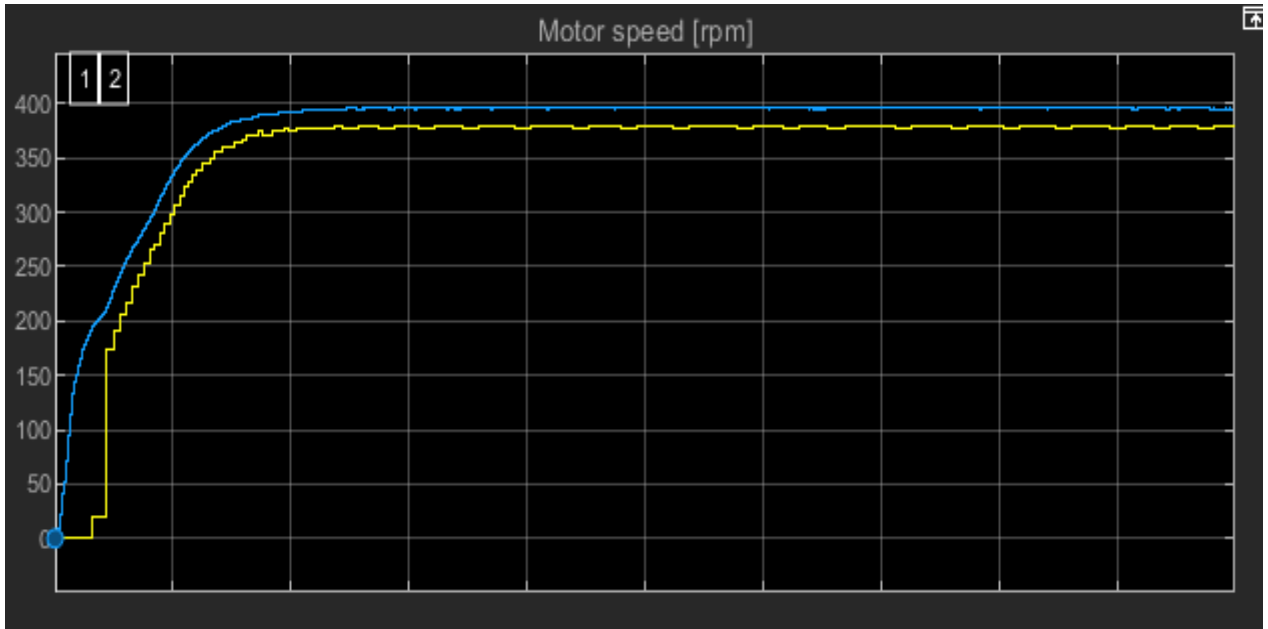


Рисунок 4.2 – Графік розгону двигуна

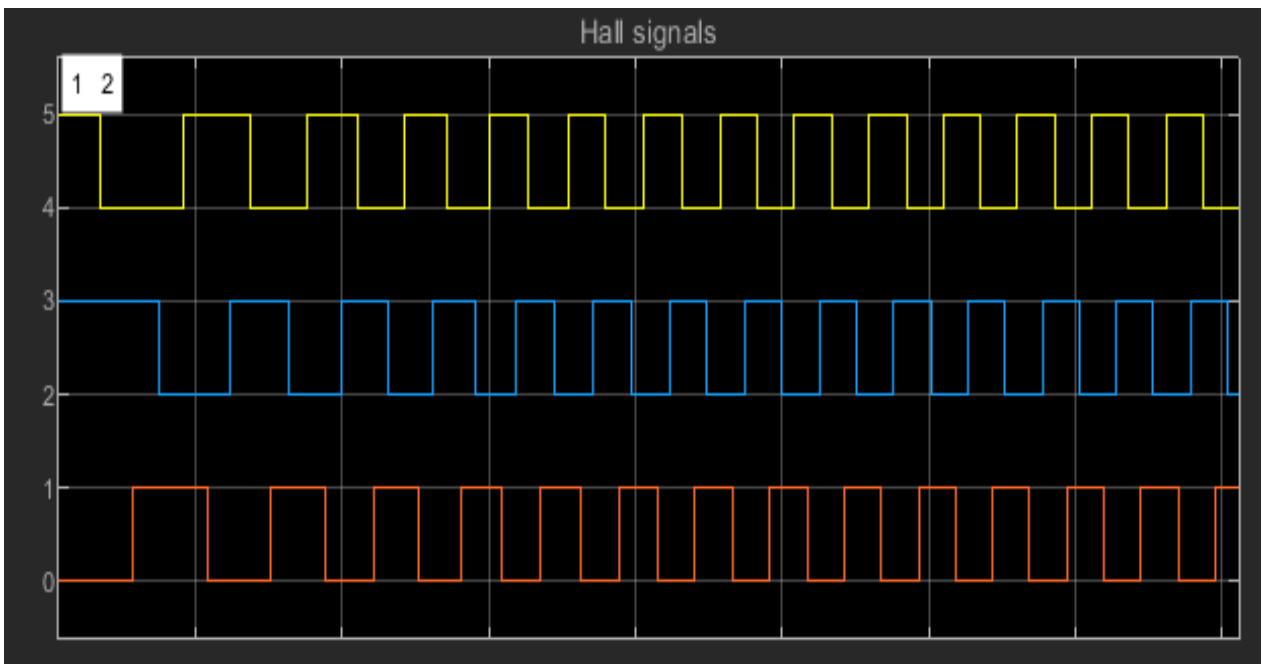


Рисунок 4.3 – Графік переключення датчиків Хола

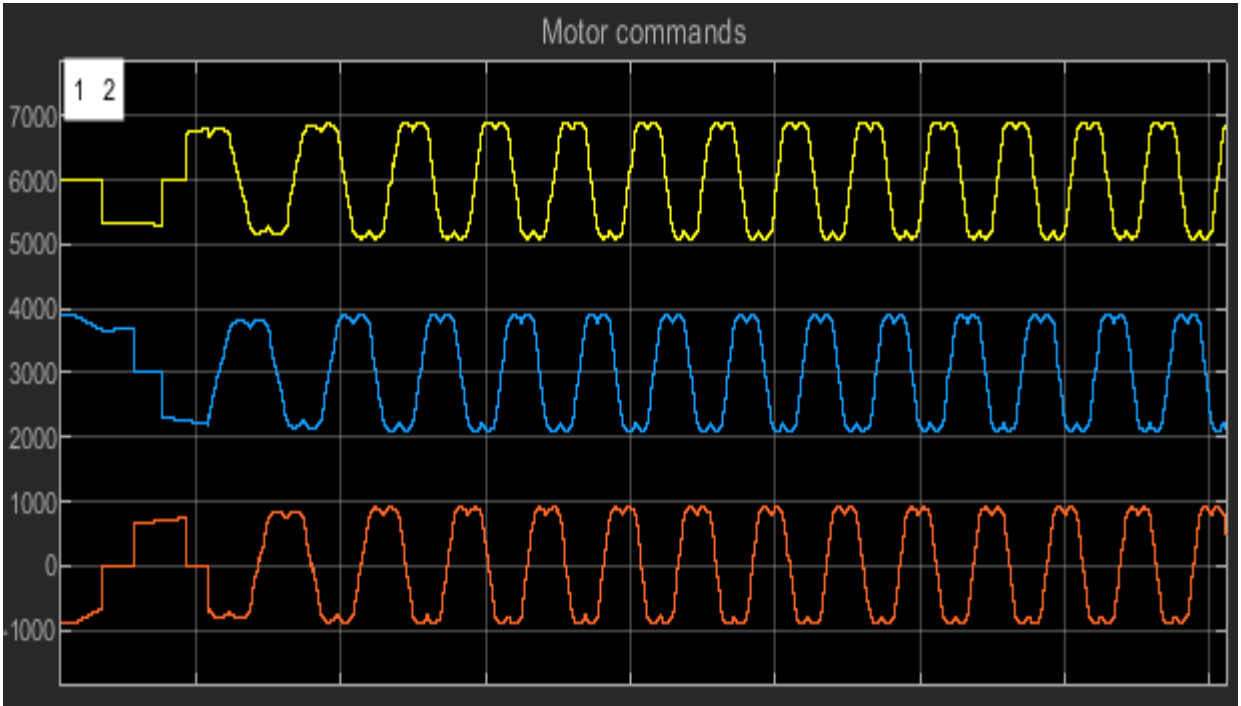


Рисунок 4.4 – Графік фазних напруг

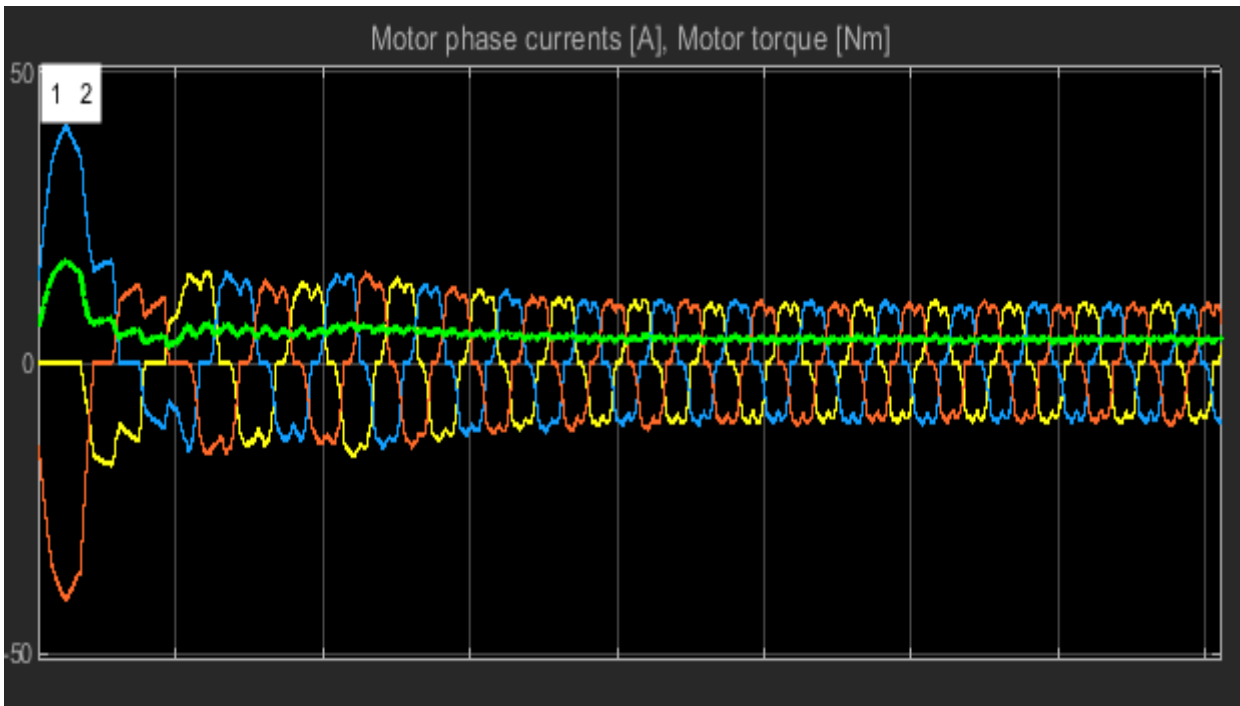


Рисунок 4.5 – Графік фазних та результуючого струмів

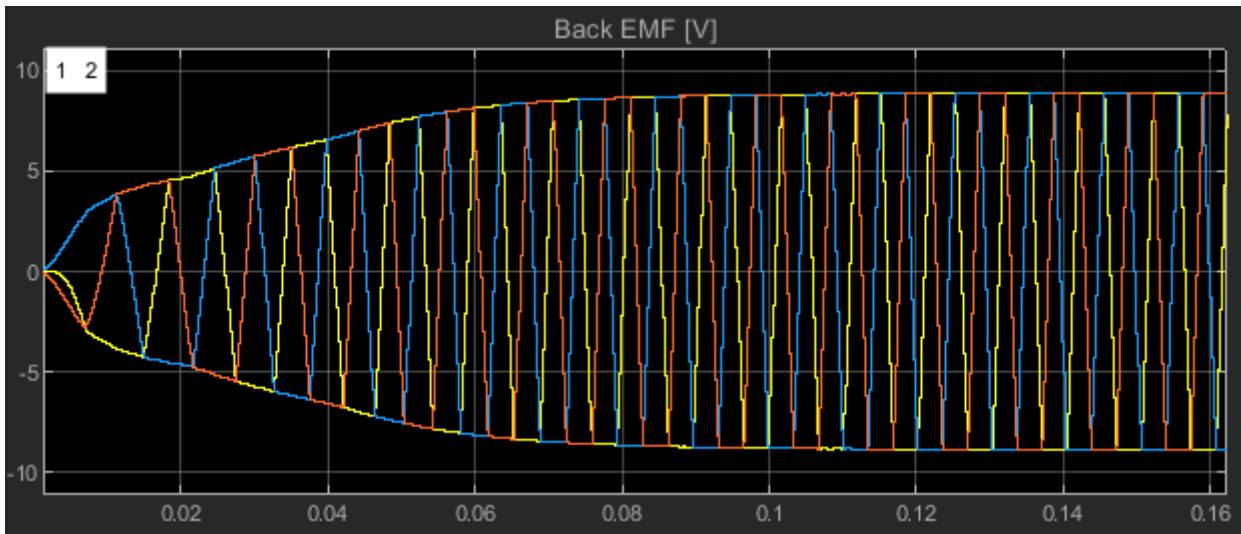


Рисунок 4.6 – Графік зворотніх ЕРС

Беручи до уваги графіки, можна стверджувати, що модель функціонує правильно згідно з алгоритмом.

Тепер використати блок управління MPC Controller Simulink та блок управління PID Controller Simulink для аналізу ефективності роботи підходів.

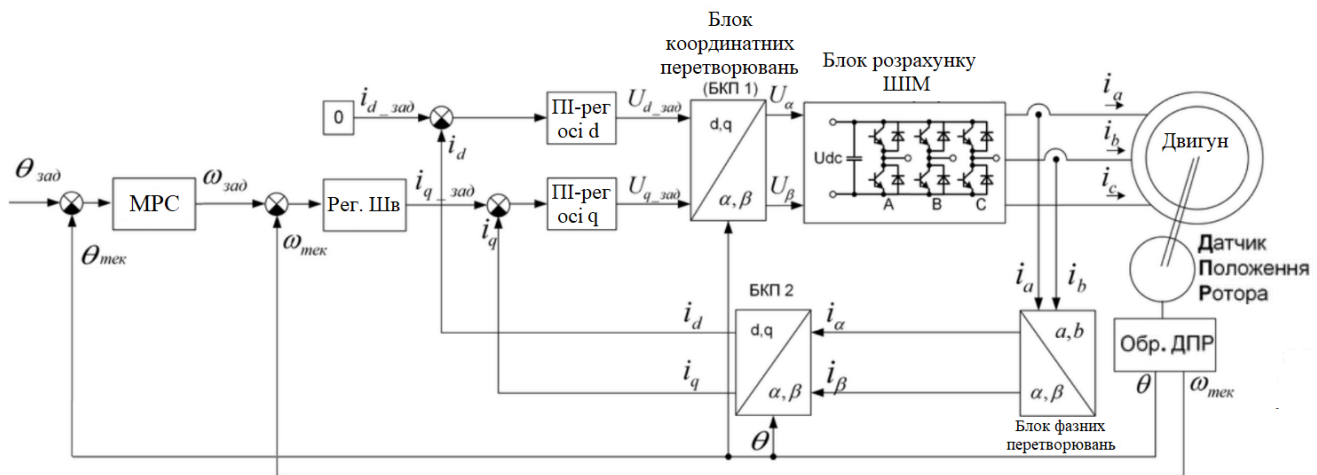


Рисунок 4.7 – Функціональна схема алгоритма роботи двигуна з заданим кутом повороту при роботі MPC

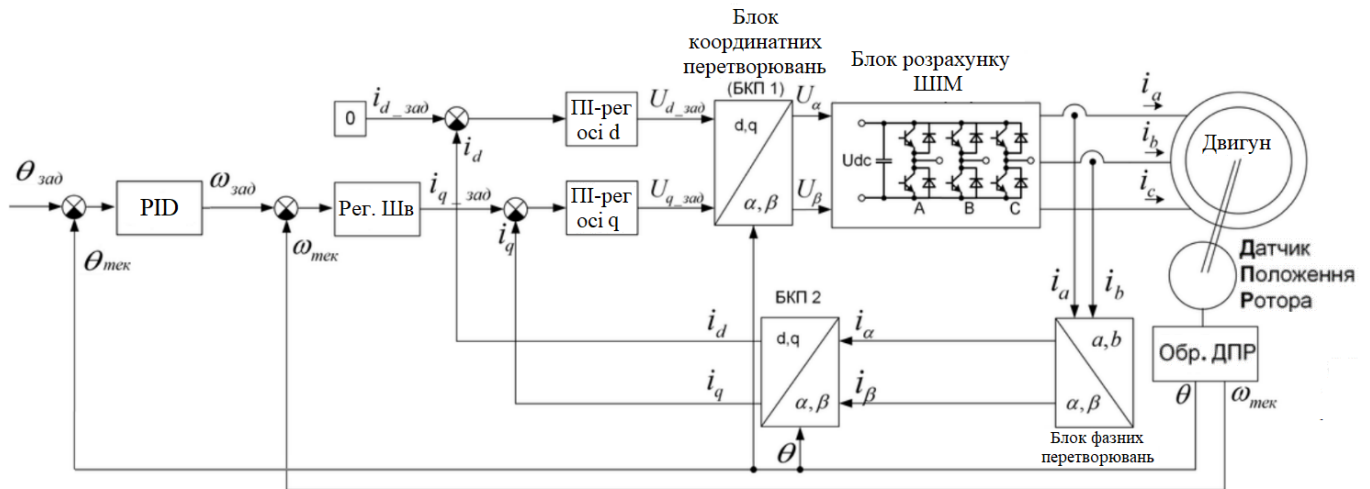


Рисунок 4.8 – Функціональна схема алгоритма роботи двигуна з заданим кутом повороту при роботі PID

Якщо номінальним навантаженням вважати половину від максимально-допустимого для платформи, то маємо наступні результати:

Головні коефіцієнти для MPC регулятора підбираються в залежності від потужності контролера на якому буде працювати цей алгоритм. Для представлення ефективності роботи регулятора, коефіцієнти підбиралися таким чином, щоб алгоритм з такими коефіцієнтами можна було легко перенести на більшість сучасних контролерів. Тож коефіцієнти були обрані наступні:

$$N_C = 2$$

$$N_P = 10$$

$$S_T = 0.01$$

Використавши автоматичні налаштування коефіцієнтів в PID Controller Simulink отримали такі параметри регулятора :

$$K_P = 19.4748$$

$$K_i = 53.0041$$

$$K_d = 1.56997$$

Для перевірки роботи регуляторів, було створено GUI додаток в середовищі Matlab. Ступінчастим сигналом є завдання в переміщення на 1 радіан.

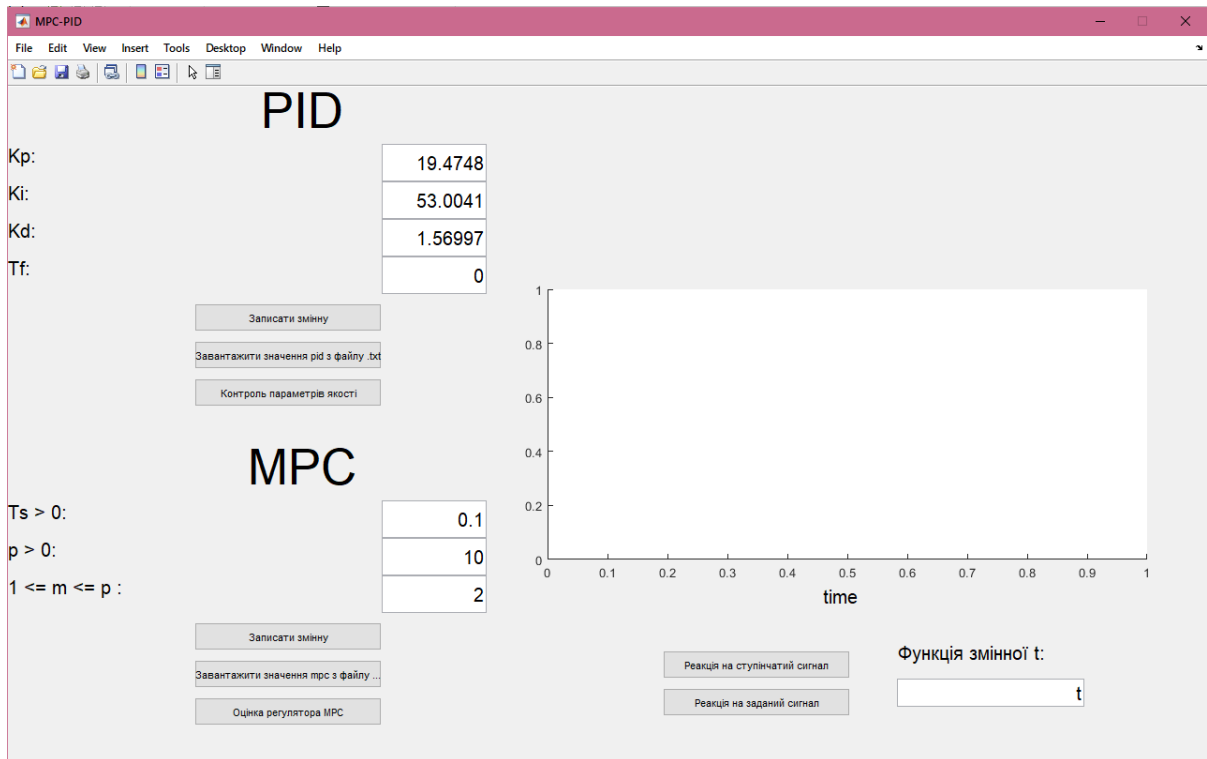


Рисунок 4.9. Вигляд графічного додатку

При номінальних навантаженнях робота регуляторів майже ідентична. В таких умовах ПІД працює агресивніше і має мінімальну перевагу перед MPC.

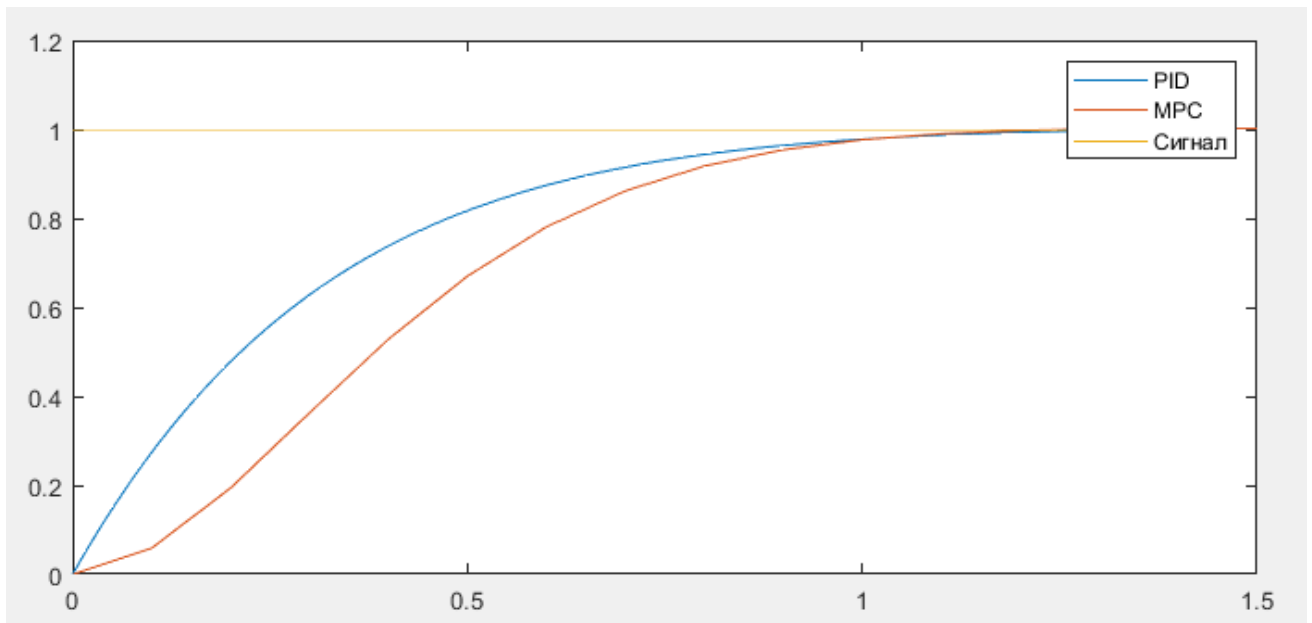


Рисунок 4.10. Перехідна характеристика системи регулювання кута повороту з MPC та PID при номінальному навантаженні

Контрольні значення	Контроллер	
	PID	MPC
Час зростання(с)	0.62613	0.6321
Час встановлення(с)	1.0224	1.1022
Перерегулювання(%)	0.29391	0.3203

Таблиця 4.1 Показники якості регулювання при номінальному навантаженні

Коли навантаження наближається до максимально допустимого для платформи, то якість роботи ПІД регулятора значно падає, в той час як MPC демонструє результат набагато кращий за ПІД. У ПІД регулятора критично збільшується кількість перерегулювань а також їх відсоток і час встановлення майже вдвічі більший ніж у MPC регулятора.

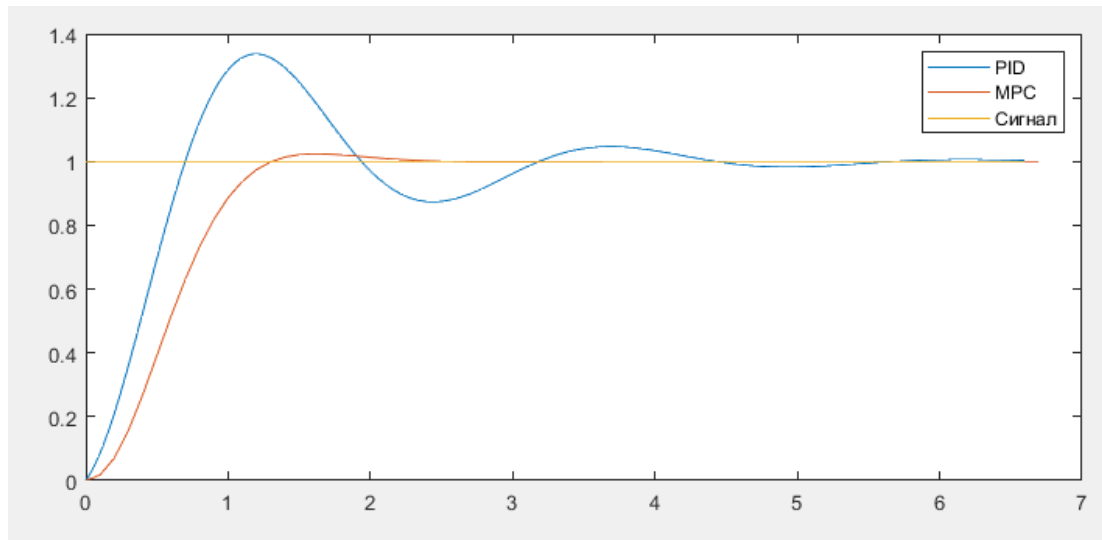


Рисунок 4.11. Перехідна характеристика системи регулювання кута повороту з MPC та PID при максимальному навантаженні

Контрольні значення	Контроллер	
	PID	MPC
Час зростання(с)	0.6964	1.2203
Час встановлення(с)	4.1774	2.525
Перерегулювання(%)	33.7031	0.401

Таблиця 4.2 Показники якості регулювання при максимальному навантаженні

У випадку коли навантаження наближається до холостого руху платформи, то регулятори мають майже однаковий час встановлення але у ПІД регулятора з'являється значне перерегулювання.

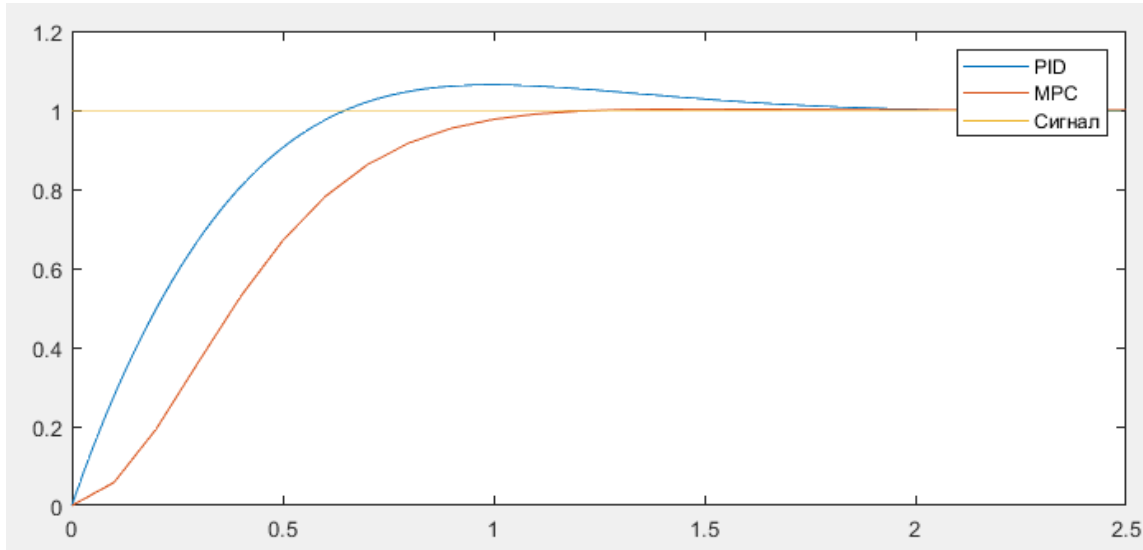


Рисунок 4.12. Перехідна характеристика системи регулювання кута повороту з MPC та PID при мінімальному навантаженні

Контрольні значення	Контроллер	
	PID	MPC
Час зростання(с)	0.46042	1.2203
Час встановлення(с)	1.6039	2.2
Перерегулювання(%)	6.3946	0.401

Таблиця 4.3 Показники якості регулювання при мінімальному навантаженні

Без перерахунків коефіцієнтів MPC регулятор видає набагато кращий результат на усьому діапазоні навантажень ніж ПІД, окрім номінального навантаження. Це дає можливість організувати стабільну та більш універсальну

рухому платформу завданням якої є точне лінійне переміщення. Використовувати класичну модель ПІД регулятора в такому випадку не доцільно, однак існує де-кілька способів покращити роботу ПІД регулятора у системах з динамічним навантаженням. Наприклад метод рою частинок PSO-PID, але такі варіанти будуть більш ресурсномістким ніж MPC.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізувавши існуючі кінематики транспортних засобів для побудови всенаправленої автоматизованої платформи, була обрана найбільш ефективна з точки зору передачі моменту від приводу, до транспортованого вантажу.
2. Була розроблена кінематична модель платформи на колесах Ілона, завдяки чому вдалося вивести рівняння руху для кожного колеса відповідно до кожного з типів результуючого переміщення.
3. Обрано тип двигуна, визначено його лінеаризовану модель, а також визначені принципи роботи необхідного драйвера двигуна.
4. Створено математичні моделі контурів керування за допомогою програмного середовища Matlab. Підібрані відповідні коефіцієнти регуляторів. Проаналізована ефективність роботи управління з прогнозуючими моделями (MPC) та пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором (PID) в системі з динамічно-змінюваним навантаженням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Han KL, Kim H, Lee JS. The sources of position errors of omni-directional mobile robot with Mecanum wheel. In Systems Man and Cybernetics (SMC), 2010 IEEE International Conference on 2010 Oct 10 (pp. 581-586). IEEE.
- [2] Borenstein J, Feng L, Everett HR. Navigating mobile robots: Systems and techniques. AK Peters, Ltd.; 1996 Oct 1.
- [3] Mecanum Force Vector Analysis [Internet]. 2016 [cited 17 December 2015]. Available from: <http://www.chiefdelphi.com/media/papers/2390>
- [4] Lippit TC, Jones WC. "OmniBot mobile base". KSC Re-search and Technology Report, NASA, USA. 1998.
- [5] Kennedy Space Center [Internet]. 2016 [cited 19 October 2015]. Available from: <https://spinoff.nasa.gov/spinoff2000/ard8.htm>.
- [6] Omni Directional, Airtrax home [Internet]. 2016 [cited 17 December 2015]. Available from: <http://www.airtrax.com>
- [7] Viboonchaicheep P, Shimada A, Kosaka Y. Position rectification control for Mecanum wheeled omni-directional vehicles. In Industrial Electronics Society, 2003. IECON'03. The 29th Annual Conference of the IEEE 2003 Nov 2 (Vol. 1, pp. 854-859). IEEE.
- [8] Lin LC, Shih HY. Modeling and adaptive control of an omni-mecanum-wheeled robot. Intelligent Control and Automation. 2013 May 24;4(02):166
- [9] Tsai CC, Wu HL. Nonsingular terminal sliding control using fuzzy wavelet networks for Mecanum wheeled omni-directional vehicles. In Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on 2010 Jul 18 (pp. 1-6). IEEE.

[10] Morimoto S, Hatanaka K, Tong Y, Takeda Y, Hirasa T. Servo drive system and control characteristics of salient pole permanent magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1993 Mar;29(2):338-43.

[11] Dülger LC, Kireççi A. Motion control and implementation for an AC servomotor system. *Modelling and Simulation In Engineering*. 2007 Mar 19;2007.

[12] M. Gokbulut, B. Dandil and C. Bal: *TAINN Springer Vol. 83-87 (2006)*, p. 125-132

[13] E. N. Binti Sabudin: *Development of Position Tracking of BLDC Motor using Adaptive Fuzzy Logic Controller (Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia, Masters Thesis, 2012)*.

[14] W. Assawinchaichote and N.Chayaopas: *Applied Mathematics and Information Sciences Vol. 10 (2016)*, p. 987-995

[15] N. Hemati, J. S. Thorp and M. C. Leu: *IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 37 (1990)*, p. 460-468

[16] M. Gokbulut and A. Tekin: *Int. J. Engng Ed. Vol. 22 (2006)*, p. 197-204

[17] H. P. Halvorsen: *Model Predictive Control in Labview (Faculty of Technology, Porsgrunn, Norway, 2011)*

[18] A. Bemporad, M. Morari and N. L. Ricker: *Model Predictive Control Toolbox for use with MATLAB (Math Works, Inc., U. S. A., 2014)*

[19] J. Kennedy and R. C. Eberhart: *Proceeding of IEEE international conference on neural networks Vol. IV, pp. 1942-1948. IEEE service center, Piscataway, NJ, 1995*

[20] M. S. Gaya, A. A Bisu, S. N. S. Salim, I. S. Madugu, L. A. Yusuf, M. L Kaurangini, M. T. M. Khairi: International Review of Automatic Control Vol. 9 (2016), p. 167-204.

[21] S. Sumathi and P. Surekha: Computational Intelligence Paradigms- Theory and Application using MATLAB (CRC Press USA 2010)