

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за освітньою програмою
«Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та
електромобільність»

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Пересада С. М., Ніконенко Є. О. Курсовий проект з керування електроприводами [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.М. Пересада, Є.О. Ніконенко – Електронні текстові дані (1 файл: 2,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 57 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)

за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики

(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

Укладачі	<i>Пересада Сергій Михайлович, докт. техн. наук, проф. Ніконенко Євген Олексійович, асп., асист.</i>
Відповідальний редактор	<i>Бур'ян С.О. канд. техн. наук, доц.</i>
Рецензент	<i>Чумак В.В. канд. техн. наук, доц., доцент кафедри електромеханіки факультету електроенерготехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського</i>

Навчальний посібник включає завдання та методичні матеріали щодо виконання та оформлення курсового проекту з дисципліни «Керування електроприводами». Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ.....	6
1.1 Програма курсового проекту	6
1.2 Інструкції з оформлення графічних матеріалів і проведення тестів.....	7
1.3 Індивідуальні завдання	9
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГУ	10
2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна.....	10
2.1.1 Розрахунок номінальних даних двигуна	10
2.1.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	11
2.2 Вибір явнополюсного СДПМ та розрахунок його параметрів.....	14
2.2.1 Вибір двигуна	14
2.2.2 Розрахунок параметрів СДПМ	14
3 ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	17
3.1 Формулювання задачі векторного керування АД.....	17
3.2 Алгоритм непрямого векторного керування АД	19
3.3 Алгоритм робастного непрямого векторного керування АД.....	20
3.4 Алгоритм прямого векторного керування АД	22
3.5 Алгоритм робастного прямого векторного керування АД.....	24
3.6 Постановка задачі векторного керування швидкістю СДПМ	26
3.7 Математична модель явнополюсних СДПМ.....	26
3.8 Алгоритм векторного керування СДПМ	27
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ.....	29
4.1 Вимоги до перетворювачів та функціональна електроприводу.....	29
4.2 Функції та функціональна схема керуючого контролера	33
4.3 Загальна інформація про датчики струму і швидкості.....	35
4.3.1 Вимірювання струму та напруги на основі ефекту Холла	35
4.3.2 Вимірювання кутової швидкості та положення.....	40
4.4 Розрахунок основних елементів силової частини	43
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	48

ДОДАТОК А. ДОВІДКОВІ ДАНІ АД, СДПМ, ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ.....	50
ДОДАТОК Б. ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	57

ВСТУП

Електроприводи змінного струму на сьогодні становлять промисловий стандарт. З точки зору керування електроприводами, можливо виділити загальний підхід до регулювання механічних координат технологічних об'єктів на основі двох різних класів електричних машин: синхронних та асинхронних. Пристрої для керування електричними двигунами змінного струму також є стандартизованими, та можуть мати можливість керувати декількома типами двигунів. Темою курсового проекту – «Векторне керування швидкістю асинхронних/синхронних двигунів з постійними магнітами».

Курсовий проект з дисципліни “Керування електроприводами” є однією з заключних дисциплін у підготовці бакалаврів за освітньою програмою “Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність”, яка збирає у собі методи та підходи, розглянуті в дисциплінах на попередніх курсах підготовки: «Теорія автоматичного керування», «Робототехніка та мехатроніка», «Керування електроприводами» першого (бакалаврського) рівня.

Метою курсового проекту є імплементація алгоритмів векторного керування для систем відпрацювання швидкістю асинхронних та синхронних двигунів із забезпеченням необхідних показників якості керування, дослідження статичних та динамічних властивостей спроектованих систем керування та дослідження впливу варіації параметрів на працездатність таких алгоритмів. Додатковою ціллю курсового проекту є розробка та підбір апаратної частини електроприводу. В результаті вивчення дисципліни студенти повинні набути міцних знань та вмінь щодо використання алгоритмів векторного керування та щодо проектування сучасних перетворюючих пристроїв, які забезпечують керування електромеханічними системами на основі двигунів змінного струму.

Доведення алгоритмів керування, розв'язок задач та підбір апаратної частини слід супроводжувати необхідними поясненнями та математичними викладками. Вимоги до оформлення курсових проектів наведено у додатку А.

1 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ

1.1 Програма курсового проекту

1. Для заданого згідно з варіантом завдання двигуна (АД *або* СДПМ) розрахувати значення параметрів номінального режиму та схеми заміщення.

2. Розробити систему векторного керування швидкістю на основі алгоритму керування, вказаного у варіанті. Розробити структурну схему алгоритму.

3. Розробити функціональну схему асинхронного *або* синхронного електроприводу, розкрити призначення основних елементів перетворювача частоти, здійснити їх розрахунок та вибір (*мінімум*: фільтр, випрямляч, ємність, клампер, інвертор, снабер, датчики струму, датчик напруги, енкодер/резольвер).

4. Методом математичного моделювання провести дослідження динамічних та статичних характеристик розробленої системи, що включає:

4.1.Визначення кутової швидкості двигуна, при якій регулятори попадають в обмеження. Дослідження динамічних характеристик при відомих параметрах АД при виконанні тесту, який включає етапи збудження двигуна (за необхідністю), відпрацювання заданої траєкторії кутової швидкості при розгоні до номінальної частоти з 2-хкратним номінальним моментом, компенсація постійного номінального моменту навантаження, гальмування двигуна. *У випадку СДПМ* – розгін з 3-хкратним моментом. Додатково визначити значення другої похідної швидкості, яке буде відповідати розгону без перевищення номінального значення напруги інвертора.

4.2.Дослідження динамічної поведінки системи векторного керування при відпрацюванні нульової швидкості і зміні початкових умов потокозчеплення.

4.3.Дослідження динамічних характеристик системи векторного керування при відсутності компенсацій першої і другої похідних швидкості.

4.4.Дослідження властивостей робастності системи керування до варіацій активного опору ротора. Побудова статичних характеристик. У випадку СДПМ – дослідження робастності до вимірювання кутового положення ротора.

5. Виконати дослідження *відповідно до індивідуального завдання*.

6. Зробити висновки, в яких проаналізувати цінність отриманих результатів.

1.2 Інструкції з оформлення графічних матеріалів і проведення тестів

Об'єктом дослідження є графіки перехідних процесів систем векторного керування. Необхідно виводити наступні величини без накладання графіків один на одний в окремих графічних вікнах, у відповідному масштабі, за яким видно увесь графік. Також при виводі однотипних графіків для кожного тесту масштаби величин мають бути обов'язково однаковими, щоби можна було наглядно порівнювати результати тестів.

Графіки та всі супровідні матеріали мають бути оформлені таким чином, щоб не визивати додаткових питань щодо умов тестування, тобто всі внутрішні і зовнішні координати системи керування мають бути відображені на графіках і пояснені в тексті. В подальших дослідженнях допускається виокремлювати найбільш важливі графіки і представляти їх окремо.

Графіки необхідно подавати згідно наведеного порядку в таблицях 3.1 – 3.3. Рекомендується виводити лінії обмеження для струму, напруги і активної потужності інвертора і моменту двигуна, щоб наочно показати режими, в яких знаходиться електропривод з врахуванням обраного типу живлення і встановленого обладнання. У випадку СДПМ сигнали потокозчеплення замінюються на модуль магнітного потоку.

Так як тест складається з класичних режимів для електропривода, необхідно налаштувати час моделювання і умови тесту таким чином, щоби максимально якісно відобразити режими роботи ЕП, без зайвих тривалих статичних режимів, особливо для двигунів малої і великої потужності. Звернути увагу на питання вибору шагу моделювання – особливо для двигунів малої потужності встановити не більше $1e-5$ с.

Кожний наведений графік має бути проаналізовано в тексті, тобто відповісти на питання – чому вони є такими. Якщо графіки змінилися при зміні умов тестування, необхідно не повторювати вже набраний текст, а описати лише те, що змінилося і завдяки чому.

Таблиця 1.1 – Набір і розташування графічних вікон заданих величин

Задана швидкість і профіль моменту навантаження	Задане потокозчеплення
--	------------------------

Таблиця 1.2 – Набір і розташування графічних вікон змінних #1

Похибка регулювання швидкості	Похибка відпрацювання потоку
Заданий моментоутворюючий струм i_q	Заданий потокоутворюючий струм i_d
Похибка регулювання струму i_q	Похибка регулювання струму i_d
Керуючий вплив u_q	Керуючий вплив u_d

Таблиця 1.3 – Набір і розташування графічних вікон змінних #2

Напруга u_a	Струм i_a
Модуль напруги інвертора <u>з обмеженням</u>	Модуль струму <u>з обмеженням</u>
Механічна потужність	Момент двигуна <u>з обмеженням</u>
Активна потужність <u>з обмеженням</u>	Реактивна потужність

Пояснення до проведення тестувань

На нульовій швидкості необхідно повторити тест, змінивши початкові умови потокозчеплення на такі, щоб побачити їх вплив на відпрацювання швидкості системою векторного керування. Для цього дослідження лінії обмеження не наводяться.

Для наступних досліджень неможна повторювати графіки заданих величин, натомість треба дати посилання на вже наведені графіки заданих швидкості і потокозчеплення. Допускається виводити лише критичні змінні.

Для дослідження властивостей робастності алгоритмів керування, для того, щоб побачити вплив варіації параметрів на систему керування необхідно збільшити час моделювання приблизно в 5 разів відносно нормального. Графіки наводяться лише для 1 (одного) режиму варіації параметра.

Дослідження статичних характеристик має містити: а) для АД: 3 графіка – струм i_q , активна і механічна потужність в одному графічному вікні і ККД двигуна; б) для СДПМ: 4 графіка – струми i_d , i_q в «невірній» системі координат і реальні струми i_d , i_q ; активна і механічна потужність двигуна, ККД. Всі графіки мають мати по осі абсцис не вісь часу, а відповідний параметр, вплив варіації якого досліджується.

На окремих листах А1 (листи графічної частини) необхідно побудувати структурну схему алгоритму векторного керування швидкістю АД або СДПМ, а

також функціональну схему асинхронного або синхронного електроприводу з деталізацією вибраних елементів перетворювача частоти і механізмом.

Наприкінці проекту надається специфікація вибраних елементів функціональної схеми електроприводу.

1.3 Індивідуальні завдання

Для всіх варіантів завдань необхідно провести дослідження аналогічне до 1-го тесту з розгоном до номінальної швидкості, але зі зміненими: алгоритмом керування, умовами навантаження або деталізацією моделі двигуна.

1. Дослідження одного з алгоритмів без використання зворотних зв'язків за струмами статора (бездавачеве керування без вимірювання струмів).

2. Дослідження одного з бездавачевих алгоритмів без використання інформації з датчику швидкості.

3. Дослідження системи в режимі ослаблення поля.

4. Дослідження одного з алгоритмів IFOC з МТРА оптимізацією.

5. Дослідження системи керування положенням.

6. Дослідження, яке включає емуляцію дії механізму (зміна моменту інерції і профілю моменту навантаження).

7. Порівняльне дослідження DFOC зі спостерігачем потокозчеплення повного порядку.

8. Порівняльне дослідження з алгоритмом керування швидкістю на основі ПІ-регуляторів без компенсацій.

9. Порівняльне дослідження енергетичних характеристик систем векторного керування АД і СДПМ.

10. Порівняльне дослідження системи керування з дво-, три- або більше двигунною системою із загальним валом.

11. Порівняльне дослідження з машиною, в якій враховано насичення магнітної системи.

12. Порівняльне дослідження з машиною, в якій враховано неідеальності механічної частини.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНІВ ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГУ

2.1 Розрахунок параметрів асинхронного двигуна

Вихідні дані для розрахунку параметрів асинхронних двигунів знаходяться в Додатку А [1].

Методику розрахунку розглянемо на прикладі АД потужністю 2.2 кВт. Паспортні дані двигуна 4A90L4У3, при з'єднанні обмоток статора у зірку, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Паспортні дані двигуна 4A90L4У3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 2.2 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.0056 \text{ кгм}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.80$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.83$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.4$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.051$
Критичне ковзання	$s_k = 0.33$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\bar{x}'_1 = 0.076$
Активний опір статора	$\bar{R}'_1 = 0.098$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\bar{x}''_2 = 0.13$
Приведений активний опір ротора	$\bar{R}''_2 = 0.06$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\bar{x}_\mu = 2.1$

2.1.1 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова частота напруги статора

$$\omega_{0n} = 2\pi f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с.} \quad (2.1)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{2} = 157 \text{ рад/с.} \quad (2.2)$$

Номінальна швидкість двигуна

$$\omega_n = \omega_{xx}(1 - s_n) = 157 \cdot (1 - 0.051) = 149 \text{ рад/с.} \quad (2.3)$$

Номінальний момент двигуна

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{2200}{149} = 14.8 \text{ Нм.} \quad (2.4)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ)

$$M_k = \lambda M_n = 2.4 \cdot 14.8 = 35.52 \text{ Нм.} \quad (2.5)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / 1.73 = 220 \text{ В,} \quad (2.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3U_n \eta \cos(\phi)} = \frac{2.2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0.80 \cdot 0.83} = 5 \text{ А.} \quad (2.7)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = 1.41 \cdot 220 = 311 \text{ В,} \quad (2.8)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = 1.41 \cdot 5 = 7.1 \text{ А.} \quad (2.9)$$

Амплітудне значення потокозчеплення в режимі холостого ходу з $R_1 = 0$

$$\psi_{1xx} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0.99 \text{ Вб.} \quad (2.10)$$

2.1.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на Рис. 2.1, в той час як приведені в Додатку А параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, Рис. 2.2. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується методика з [2].

Коефіцієнт перерахунку між Т- та Г-подібною схемами заміщення

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}'_1 \bar{x}_\mu}}{2\bar{x}_\mu} = \frac{2.1 + \sqrt{2.1^2 + 4 \cdot 0.076 \cdot 2.1}}{2 \cdot 2.1} = 1.035. \quad (2.11)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях

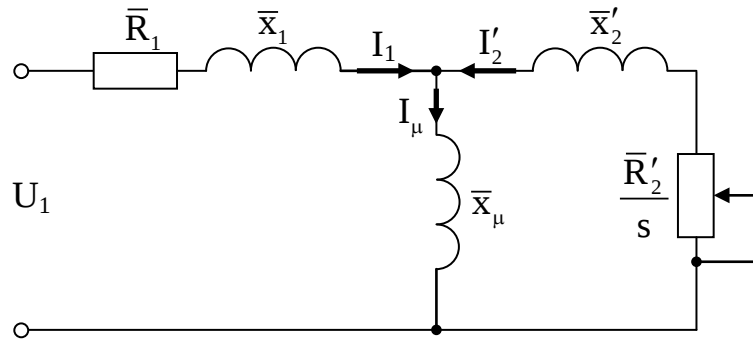


Рис. 2.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

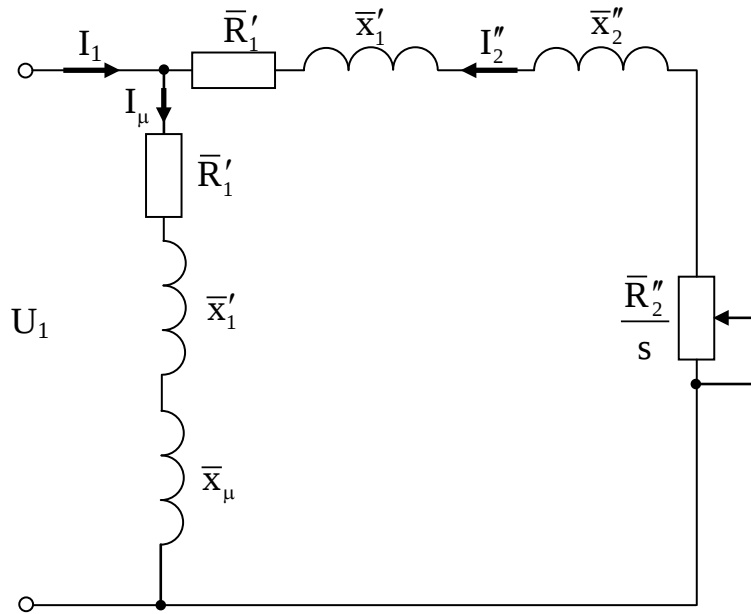


Рис. 2.2 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

$$\bar{x}_1 = \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.076}{1.035} = 0.0734, \quad (2.12)$$

$$\bar{R}_1 = \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.098}{1.035} = 0.0947, \quad (2.13)$$

$$\bar{x}'_2 = \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.13}{1.035^2} = 0.1214, \quad (2.14)$$

$$\bar{R}'_2 = \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.06}{1.035^2} = 0.056. \quad (2.15)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться наступним чином:

$$R_1 = \bar{R}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0947 \frac{220}{5} = 4.2 \text{ Ом}, \quad (2.16)$$

$$R_2 = \bar{R}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.056 \frac{220}{5} = 2.5 \text{ Ом}, \quad (2.17)$$

$$x_1 = \bar{x}_1 \frac{U_n}{I_n} = 0.0734 \frac{220}{5} = 3.2 \text{ Ом}, \quad (2.18)$$

$$x'_2 = \bar{x}'_2 \frac{U_n}{I_n} = 0.1214 \frac{220}{5} = 5.3 \text{ Ом}, \quad (2.19)$$

$$x_\mu = \bar{x}_\mu \frac{U_n}{I_n} = 2.1 \frac{220}{5} = 92 \text{ Ом}. \quad (2.20)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора та намагнічуючого контуру

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{3.2}{314} = 0.0102 \text{ Гн}, \quad (2.21)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x'_2}{\omega_0} = \frac{5.3}{314} = 0.017 \text{ Гн}, \quad (2.22)$$

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{92}{314} = 0.294 \text{ Гн}. \quad (2.23)$$

Індуктивності статора і ротора

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0.294 + 0.0102 = 0.304 \text{ Гн}, \quad (2.24)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0.294 + 0.017 = 0.311 \text{ Гн}. \quad (2.25)$$

На основі проведених розрахунків обчислюються значення параметрів різних схем заміщення α , α_1 , β , β_1 , γ , γ_1, γ_2 , σ , σ_1 за наведеними формулами (для часто застосовуваної моделі АД в струмах статора і потозчепленнях ротора (3.1) достатньо параметрів α , β , γ , σ):

$$\alpha = R_2 / L_2, \quad \alpha_1 = R_1 / L_1, \quad (2.26)$$

$$\beta = L_m / L_2 \sigma, \quad \beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \sigma_1}, \quad (2.27)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta, \quad \gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 L_m \beta_1, \quad \gamma_2 = \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta + \alpha \right), \quad (2.28)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right). \quad (2.29)$$

Результати розрахунку параметрів двигуна зведені до Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри двигуна 4A90L4У3

P_{2n} , кВт	2.2	R_1 , Ом	4.2	I_{na} , А	7.1	p_n	2
ω_{xx} , рад/с	157	R_2 , Ом	2.5	ψ_{1xx} , Вб	0.99	α , Ом/Гн	7.9
ω_n , рад/с	149	L_1 , Гн	0.304	η	0.8	β , 1/Гн	36.0
M_n , Нм	14.8	L_2 , Гн	0.311	$\cos \varphi$	0.83	γ , Ом/Гн	242
M_k , Нм	35.5	L_m , Гн	0.294	J_d , кг·м ²	0.0056	σ , Гн	0.026

2.2 Вибір явнopolюсного СДПМ та розрахунок його параметрів

2.2.1 Вибір двигуна

Розглянемо методику розрахунку будь-якого електричного двигуна на прикладі СДПМ. Вихідними даними є час розгону до номінальної швидкості $t_a = 55$ мс (з 3-хкратним номінальним моментом) та неприведений момент інерції механізму $J_m = 35$ кгм² з відомим передатним числом $i = 100$. В каталогі в Додатку А [3] представлені СДПМ з номінальною швидкістю $\omega_n = 188$ рад/с.

Розрахуємо динамічний момент при розгоні з основного рівняння руху

$$M_{\text{дин}} = J_{\Sigma} \frac{dw}{dt} = J_{\Sigma} \frac{(\omega_n - 0)}{(t_a - 0)} = J_{\Sigma} \frac{\omega_n}{t_a} = 0.007 \frac{188}{0.055} = 23.9 \text{ Нм}, \quad (2.30)$$

де $J_{\Sigma} = J_d + J'_m$ - сумарний момент інерції, $J'_m = J_m / i^2 = 0.0035$ кгм² – приведений момент інерції СДПМ (для попереднього вибору приймаємо $J_d = J'_m$).

Номінальний момент двигуна дорівнює

$$M_n = \frac{M_{\text{дин}}}{3} = \frac{23.9}{3} = 8 \text{ Нм}. \quad (2.31)$$

З Додатку А обираємо явнopolюсний СДПМ з найближчим номінальним моментом, потужністю 2.68 кВт.

2.2.2 Розрахунок параметрів СДПМ

Більшість виробників СДПМ надають параметри схеми заміщення для моделі в системі координат (d-q), тому розділ розрахунку параметрів та номінальних величин є коротким. Вихідні дані для розрахунку параметрів синхронних двигунів з постійними магнітами знаходяться в Додатку А.

Методику розрахунку розглянемо на прикладі СДПМ потужністю 2.68 кВт. Дані двигуна з каталогу при з'єднанні обмоток статора зіркою, наведено в Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Паспортні дані явнополюсного СДПМ

Номінальна потужність	$P_{2n} = 2.68 \text{ кВт}$
Номінальний момент	$M_n = 7.9 \text{ Нм}$
Номінальна швидкість	$\omega_n = 188 \text{ рад/с}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 460 \text{ В}$
Номінальне діюче значення фазного струму статора	$I_n = 3.2 \text{ А}$
Число пар полюсів	$p_n = 3$
Момент інерції	$J_d = 0.0035 \text{ кгм}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.865$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.4$
Номінальна частота напруги статора	$f = 90 \text{ Гц}$
Максимальна швидкість з постійною потужністю	$\omega_{\max} = 226 \text{ рад/с}$
Амплітудне фазне значення проти-ЕРС двигуна при ω_n	$U_{ea}(\omega_n) = 306 \text{ В}$
Параметри схеми заміщення	
Активний опір статора	$R = 1.76 \text{ Ом}$
Індуктивність статора по осі d	$L_d = 20 \text{ мГн}$
Індуктивність статора по осі q	$L_d = 48 \text{ мГн}$

Розрахуємо ті величини, які залишилися для повного опису електричної частини синхронного двигуна з постійними магнітами.

Критичний момент легко розраховується з перевантажувальної здатності як

$$M_k = \lambda M_n = 2.4 \cdot 7.9 = 19 \text{ Нм.} \quad (2.32)$$

Номінальне діюче значення фазної напруги статора за умови $f = 50 \text{ Гц}$ дорівнює

$$U_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{f_{50}}{f} U_{1n} = \frac{1}{1.73} \frac{50}{90} 460 = 148 \text{ В.} \quad (2.33)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора розраховуються як

$$U_{na} = \sqrt{2}U_n = 1.41 \cdot 148 = 208 \text{ В}, \quad (2.34)$$

$$I_{na} = \sqrt{2}I_n = 1.41 \cdot 3.2 = 4.5 \text{ А}. \quad (2.35)$$

Потік постійних магнітів можна дістати з використанням проти-ЕРС як

$$\Psi_m = \frac{U_{be}}{\sqrt{3}\omega p_n} = \frac{U_{be}(\omega_n)}{\sqrt{3}\omega_n p_n} = \frac{306}{1.73 \cdot 188.5 \cdot 3} = 0.31 \text{ Вб}. \quad (2.36)$$

На основі рівняння номінального моменту двигуна проводимо перевірку розрахунку потоку постійних магнітів, який дорівнює

$$\Psi'_m = \frac{2/3 M}{\sqrt{3} p_n i_q} = \frac{2/3 M}{\sqrt{3} p_n I_n} = \frac{0.67 \cdot 7.9}{1.73 \cdot 3 \cdot 3.2} = 0.32 \text{ Вб}. \quad (2.37)$$

Коефіцієнт потужності двигуна за умови синусоїдної форми напруги статора можна розрахувати через номінальну потужність як

$$\cos \varphi = \frac{P_{2n}}{3\sqrt{2}U_{na} \eta I_{na}} = \frac{2.68 \cdot 10^3}{3 \cdot 1.41 \cdot 208 \cdot 0.865 \cdot 4.5} = 0.78. \quad (2.38)$$

Усталене значення струму для режиму ослаблення поля за умови роботи на максимальній швидкості ω_{max} для стабілізації компоненти u_{1q} дорівнює

$$i_{dw} = \frac{\Psi_m}{L_d} \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega} \right| - 1 \right) = \frac{\Psi_m}{L_d} \left(\left| \frac{\omega_n}{\omega_{max}} \right| - 1 \right) = \frac{0.31}{20 \cdot 10^{-3}} \left(\left| \frac{188.5}{226} \right| - 1 \right) = -2.6 \text{ А}. \quad (2.39)$$

Максимальне значення моментного струму для забезпечення номінального моменту на швидкості ω_{max} дорівнює

$$i_{qw} = \sqrt{I_{na}^2 - i_{dw}^2} = \sqrt{4.5^2 - (-2.6)^2} = 3.7 \text{ А}. \quad (2.40)$$

Результати розрахунків параметрів СДПМ зведено до Таблиці 2.4, що дозволяє провести повномасштабне моделювання системи векторного керування і вибір обладнання перетворювача частоти для практичної реалізації.

Таблиця 2.4 – Параметри СДПМ потужністю 1.5 кВт

P_{2n} , кВт	1.5	η	0.87	R , Ом	1.8	λ	2.4
ω_n , рад/с	188	$\cos \varphi$	0.78	L_d , Гн	0.20	M_k , Нм	19
M_n , Нм	7.9	J_d , кг·м ²	0.0035	L_q , Гн	0.48	ω_{max} , рад/с	226
I_{na} , А	4.5	p_n	3	Ψ_m , Вб	0.31	i_{dw} , А	-2.6

3 ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ДВИГУНІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

3.1 Формулювання задачі векторного керування АД

Для моделювання систем керування АД використовується математична модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a – b) [2]:

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) - v\omega, \\
 M &= \mu_1 (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \\
 \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
 \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\
 \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
 \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

де ω – кутова швидкість ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – компоненти вектора струму статора в системі координат (a – b), $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – компоненти вектора потокозчеплень ротора, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – компоненти вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, v – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}, \quad \mu_1 = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2}, \quad \alpha = \frac{R_2}{L_2}, \quad \gamma = \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right),$$

де J – повний момент інерції ротора, R_1, R_2, L_1, L_2 – опори й індуктивності статора і ротора відповідно, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – число пар полюсів.

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проєктуються та записуються в синхронній системі координат (d – q), яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , див. Рис. 3.1.

Перетворення координат визначаються:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{ab}, \\ \mathbf{x}_{ab} &= \mathbf{e}^{j\varepsilon_0} \mathbf{x}_{dq}, \end{aligned} \quad \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_0 & \sin\varepsilon_0 \\ -\sin\varepsilon_0 & \cos\varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

де $\mathbf{x}_{yz}$ позначає двовимірний вектор напруги, потоку і струму статора, ε_0 – кутове положення системи координат (d – q) відносно стаціонарної (a – b).

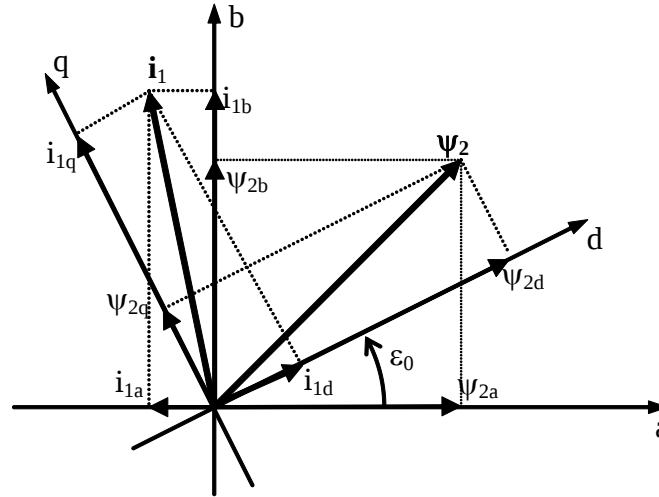


Рис. 3.1 – Розташування векторів АД

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутової швидкості – потокозчеплення формується наступним чином. Припустимо, що для моделі АД, заданої (3.1), виконується наступне:

A1. Струми статора та кутова швидкість ротора доступні для вимірювання.

A2. Параметри АД відомі і незмінні.

A3. Момент навантаження M_c невідомий, постійний та обмежений.

A4. Задані траєкторії кутової швидкості ω^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою та другою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого на непрямого векторного керування які забезпечують

O1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій швидкості – потокозчеплення, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0, \quad (3.3)$$

за умови обмеженості всіх внутрішніх змінних.

О2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0. \quad (3.4)$$

О3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми швидкості до лінійної повністю керованої форми.

О4. Асимптотичну розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

Синтез алгоритмів векторного керування по вимірюваному виходу виконано в два етапи: спершу синтезується підсистема керування потокозчепленням, а потім підсистема керування швидкістю. Обидві підсистеми синтезуються з використанням зворотної покрокової процедури проектування.

3.2 Алгоритм непрямого векторного керування АД

Структура алгоритму непрямого векторного керування містить:

– розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.5)$$

$$\ddot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \ddot{\psi}^* + \dot{\dot{\psi}}^*), \quad (3.6)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \phi, \quad (3.7)$$

де ψ^* , $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно, ϕ – робастифікуючий зв'язок, який буде визначено далі. В стандартному випадку $\phi = 0$;

– регулятор струму по осі (d) (польової складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d, u_{1d} – компонента вектора напруги статора по осі d, $(k_i, k_{ii}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;

– регулятор кутової швидкості

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu\psi^*} \left(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v\omega^* + \dot{\omega}^* \right), \quad (3.9)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega},$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu\psi^*} \left[-k_{\omega} \left(-k_{\omega} \tilde{\omega} + \mu\psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + v\dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^*, \quad (3.10)$$

де $\omega^*, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_{\omega}, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості;

– регулятор струму по осі q (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega_p \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі q, u_{1q} – компонента вектора напруги статора по осі q.

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

3.3 Алгоритм робастного непрямого векторного керування АД

Алгоритм робастного непрямого векторного керування АД відрізняється від алгоритму (3.5) – (3.11) відсутністю інтегральної компоненти в регуляторі струму по осі d і наявністю додаткових компонент в рівнянні кутової швидкості обертання системи координат.

Структура алгоритму робастного непрямого векторного керування містить:

– розімкнутий регулятор модуля вектора потокозчеплення

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*), \quad (3.13)$$

$$\dot{i}_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^*), \quad (3.14)$$

$$\dot{\varepsilon}_0 = \omega_0 = \omega p_n + \alpha L_m \frac{\dot{i}_{1q}}{\psi^*} + \frac{1}{\psi^*} \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d, \quad (3.15)$$

де ψ^* , $\dot{\psi}^*$, $\ddot{\psi}^*$ – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора та його перша і друга похідні відповідно;

– регулятор струму по осі d (польової складової струму статора)

$$u_{1d} = \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1q} - \alpha \beta \psi^* + \dot{i}_{1d}^* - k_i \tilde{i}_d \right), \quad (3.16)$$

де $\tilde{i}_d = i_{1d} - i_{1d}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі d, u_{1d} – компонента вектора напруги статора по осі d, $k_i > 0$ – коефіцієнт пропорційної складової регулятора струму;

– регулятор кутової швидкості

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^* \right), \quad (3.17)$$

$$\dot{\hat{M}}_c = -k_{\omega i} \tilde{\omega},$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \hat{M}_c + v \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \dot{i}_{1q}^*, \quad (3.18)$$

де ω^* , $\dot{\omega}^*$, $\ddot{\omega}^*$ – задана кутова швидкість, перша і друга похідні відповідно, $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості, $(k_\omega, k_{\omega i}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора кутової швидкості;

– регулятор струму по осі q (моментної складової струму статора)

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_{1q}^* + \omega_0 \dot{i}_{1d} + \beta \omega p_n \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_i \tilde{i}_q - x_q \right), \\ \dot{x}_q &= k_{ii} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.19)$$

де $\tilde{i}_q = i_{1q} - i_{1q}^*$ – похибка відпрацювання струму по осі q, u_{1q} – компонента вектора напруги статора по осі q.

Реальні прикладені напруги дорівнюють (3.12).

3.4 Алгоритм прямого векторного керування АД

Повний алгоритм прямого векторного керування швидкістю АД з використанням замкненого спостерігача магнітного потоку зниженого порядку, структурна схема якого показана на Рис. 3.2, містить:

- спостерігач магнітного потоку АД

$$\begin{aligned} \left| \dot{\hat{\Psi}}_2 \right| &= -\alpha \left| \hat{\Psi}_2 \right| + \alpha L_m \dot{i}_d, \\ \dot{\hat{\epsilon}}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{\dot{i}_q}{\left| \hat{\Psi}_2 \right|}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

- регулятор потоку

$$\begin{aligned} \dot{i}_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi \right), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

- регулятор струму по осі(d)

$$\begin{aligned} u_d &= \sigma \left(\gamma \dot{i}_d^* - \omega_0 \dot{i}_q - \alpha \beta \left| \hat{\Psi}_2 \right| + \dot{i}_d^* - k_i \tilde{i}_d - x_d \right), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\dot{i}_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[-(\alpha + k_\psi) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d - x_\psi \right] - \dot{x}_\psi \right\}, \quad (3.23)$$

- регулятор швидкості

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

- модифікований регулятор струму по осі (q)

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 \dot{i}_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} \left(\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta \right) \right], \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} \left(\psi^* \tilde{i}_q \right), \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$\dot{i}_{q1}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + v \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \dot{i}_q^*. \quad (3.26)$$

Реальні прикладені напруги дорівнюють (3.12).

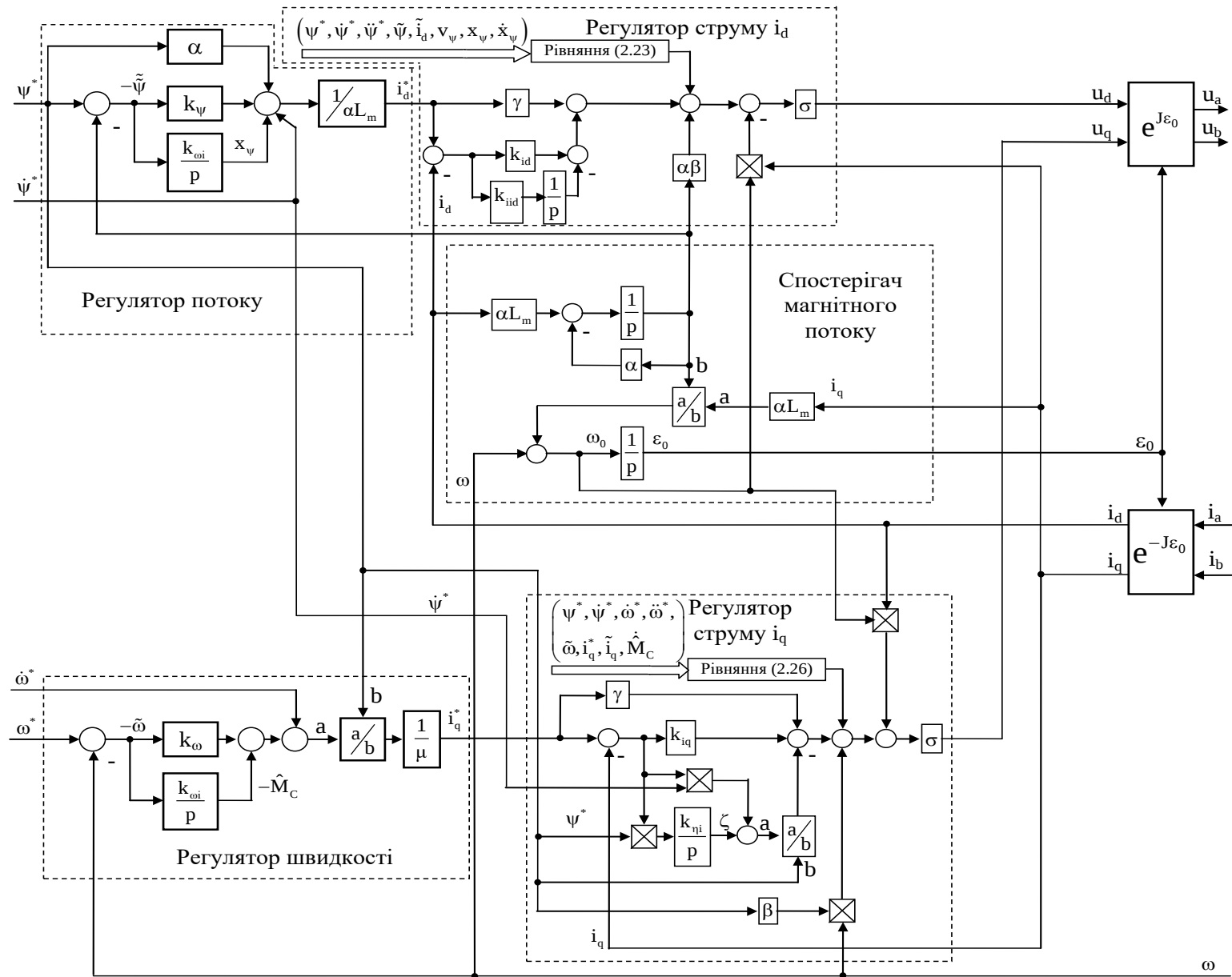


Рис. 3.2 – Структурна схема алгоритму прямого векторного керування

3.5 Алгоритм робастного прямого векторного керування АД

Повний алгоритм прямого векторного керування АД з використанням замкненого спостерігача магнітного потоку зниженого порядку містить:

- спостерігач магнітного потоку АД

$$\begin{aligned} \left| \dot{\hat{\Psi}}_2 \right| &= -\alpha \left| \hat{\Psi}_2 \right| + \alpha L_m i_d, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\left| \hat{\Psi}_2 \right|} + \frac{1}{\left| \hat{\Psi}_2 \right|} \gamma_1 \beta \omega \tilde{i}_d, \end{aligned} \quad (3.27)$$

- регулятор потоку

$$\begin{aligned} i_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi \right), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (3.28)$$

- регулятор струму по осі d

$$u_d = \sigma \left(\gamma i_d^* - \omega_0 i_q - \alpha \beta \left| \hat{\Psi}_2 \right| + \dot{i}_d^* - k_i \tilde{i}_d \right), \quad (3.29)$$

$$\dot{i}_d^* = \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[-(\alpha + k_\psi) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_d - x_\psi \right] - \dot{x}_\psi \right\}, \quad (3.30)$$

- регулятор швидкості

$$\begin{aligned} i_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \hat{M}_c + v \omega^* + \dot{\omega}^* \right), \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3.31)$$

- модифікований регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma i_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_i \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} \left(\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta \right) \right], \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} \left(\psi^* \tilde{i}_q \right), \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\dot{i}_{q1}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_\omega \left(-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q \right) + \dot{\hat{M}}_c + v \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_q^*. \quad (3.33)$$

Реальні прикладені напруги мають вигляд як у (3.12). Структурну схему робастного алгоритму керування прямого векторного керування швидкістю АД (3.12), (3.27) – (3.33) показано на Рис. 3.3.

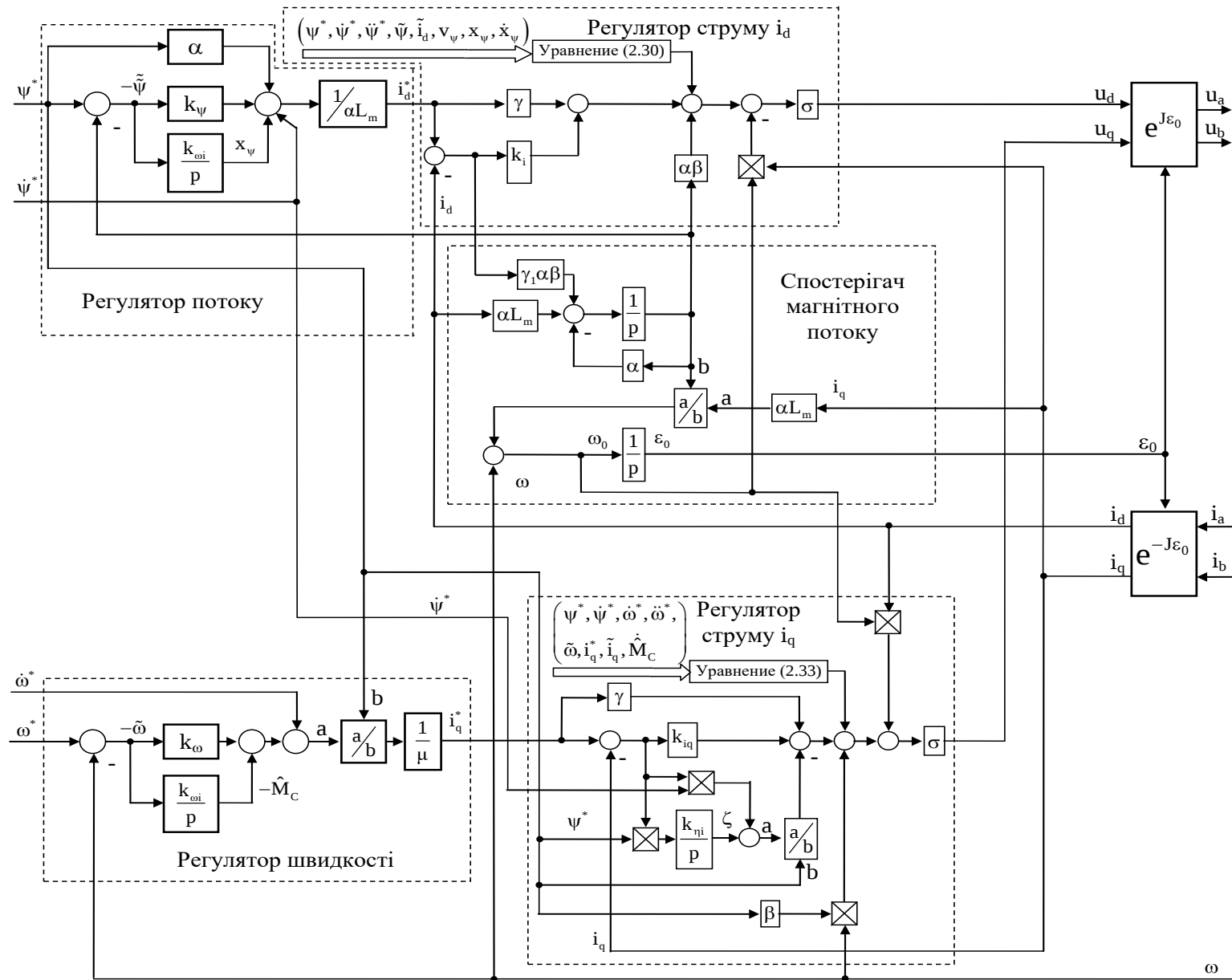


Рис. 3.3 – Структурна схема грубого алгоритму прямого векторного керування

3.6 Постановка задачі векторного керування швидкістю СДПМ

Для стандартної моделі двигуна припустимо, що:

А.1. Струми статора, кутова швидкість ротора ω та кутове положення ротора θ , необхідне для перетворення Парка-Горева, вимірюються.

А.2 Всі параметри двигуна відомі та постійні, момент навантаження T_L невідомий, постійний або змінюється повільно та обмежений.

А.3. Задана траєкторія зміни кутової швидкості ω^* є обмеженою функцією часу з обмеженими відомими першою $\dot{\omega}^*$ та другою $\ddot{\omega}^*$ похідними; i_d^* – задана обмежена траєкторія зміни струму i_d з обмеженою похідною $\dot{i}_d^*$.

За умов цих припущень необхідно синтезувати алгоритм керування, який має забезпечувати наступні цілі керування:

СО.1. Глобальне асимптотичне відпрацювання керованих змінних – кутової швидкості ротора ω та прямої компоненти струму статора i_d з обмеженням всіх внутрішніх сигналів

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\omega}, \tilde{i}_d) = 0, \quad (3.34)$$

де $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$ – похибка відпрацювання кутової швидкості ротора, $\tilde{i}_d = i_d - i_d^*$ – похибка відпрацювання компоненти струму статора по осі d.

СО.2. Асимптотичну розв'язку процесів регулювання кутовою швидкістю та прямою компонентною струму статора.

СО.3. Асимптотичну лінеаризацію підсистеми відпрацювання кутової швидкості за номінальної умови $\tilde{i}_d = 0$.

3.7 Математична модель явнополюсних СДПМ

Модифіковане перетворення координат визначаються рівняннями

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{dq} &= \mathbf{e}^{-j\theta} \mathbf{x}_{ab}, \quad \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \mathbf{e}^{j\theta} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}^{-j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}^{j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3.35)$$

де θ – кутове положення ротора.

Математична модель явнополюсних СДПМ в синхронній системі координат ротора (d-q) має вигляд [2]:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega, \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - v\omega - M_c), \quad M = \mu_2(i_d)i_q, \\
\dot{i}_d &= \frac{1}{L_{dd}(i_d)}(-R_1 i_d + L_q(i_q)\omega p_n i_q + u_d), \\
\dot{i}_q &= \frac{1}{L_{qq}(i_q)}(-R_1 i_q - L_d(i_d)\omega p_n i_d - \Psi_m \omega p_n + u_q),
\end{aligned} \tag{3.36}$$

де $L_d(i_d), L_q(i_q)$ та $L_{dd}(i_d), L_{qq}(i_q)$ – статичні та динамічні індуктивності статора в системі координат ротора $(d - q)$; $\Psi_m = L_m i_f = \text{const}$ – потік постійних магнітів; $\mu_2(i_d) = \frac{3}{2} p_n (L_m i_f + (L_d - L_q) i_d)$ – коефіцієнт моменту.

3.8 Алгоритм векторного керування СДПМ

Повний алгоритм векторного керування СДПМ має вигляд:

– регулятор струму по осі d :

$$\begin{aligned}
u_d &= R i_d^* - \omega p_n L_q(i_q) i_q + L_{dd}(i_d) (\dot{i}_d^* - k_{i1} \tilde{i}_d - x_d), \\
\dot{x}_d &= k_{i2} \tilde{i}_d,
\end{aligned} \tag{3.37}$$

де $(k_{i1}, k_{i2}) > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора струму; похідна заданого струму $\dot{i}_d^*$ розраховується та відома;

– регулятор швидкості:

$$\begin{aligned}
\dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu'(i_d)} \left(\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_{\omega} \tilde{\omega} \right), \\
\dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega},
\end{aligned} \tag{3.38}$$

де $\hat{M}_c$ – оцінене значення компоненти моменту навантаження

$\frac{M_c}{J}$, $\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$ – похибка оцінювання моменту навантаження; $k_{\omega} > 0$,

$k_{\omega i} > 0$ – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регулятора швидкості; додатній параметр $\mu'(i_d) = \frac{3 p_n}{2 J} [\Psi_m + (L_d(i_d) - L_q(i_q)) i_d] > 0$;

– нелінійний регулятор струму по осі q

$$\begin{aligned} u_q &= R_1 i_q^* + \omega p_n L_d(i_d) i_d + \omega p_n \Psi_m + L_{qq}(i_q) (\dot{i}_{q1}^* - k_{i1} \tilde{i}_q - x_q), \\ \dot{x}_q &= k_{i1} \tilde{i}_q, \end{aligned} \quad (3.39)$$

де відома компонента похідної струму i_q^* дорівнює

$$\begin{aligned} \dot{i}_{q1}^* &= \frac{1}{\mu'(i_d)} \left(\dot{M}_c + \frac{v}{J} \dot{\omega}^* + \ddot{\omega}^* \right) - \frac{3p_n}{2J\mu^2(i_d)} i_d^* \left(\hat{M}_c + \frac{v}{J} \omega^* + \dot{\omega}^* - k_\omega \tilde{\omega} \right) (L_d(i_d) - \\ &- L_q(i_q)) - \frac{k_\omega}{\mu'(i_d)} \left(- \left(k_\omega + \frac{v}{J} \right) \tilde{\omega} + \mu'(i_d) \tilde{i}_q + \frac{3p_n}{2J} (L_d(i_d) - L_q(i_q)) \tilde{i}_d i_q \right). \end{aligned} \quad (3.40)$$

Структурну схему алгоритму векторного керування кутовою швидкістю явнополюсного СДПМ представлено на Рис. 3.4.

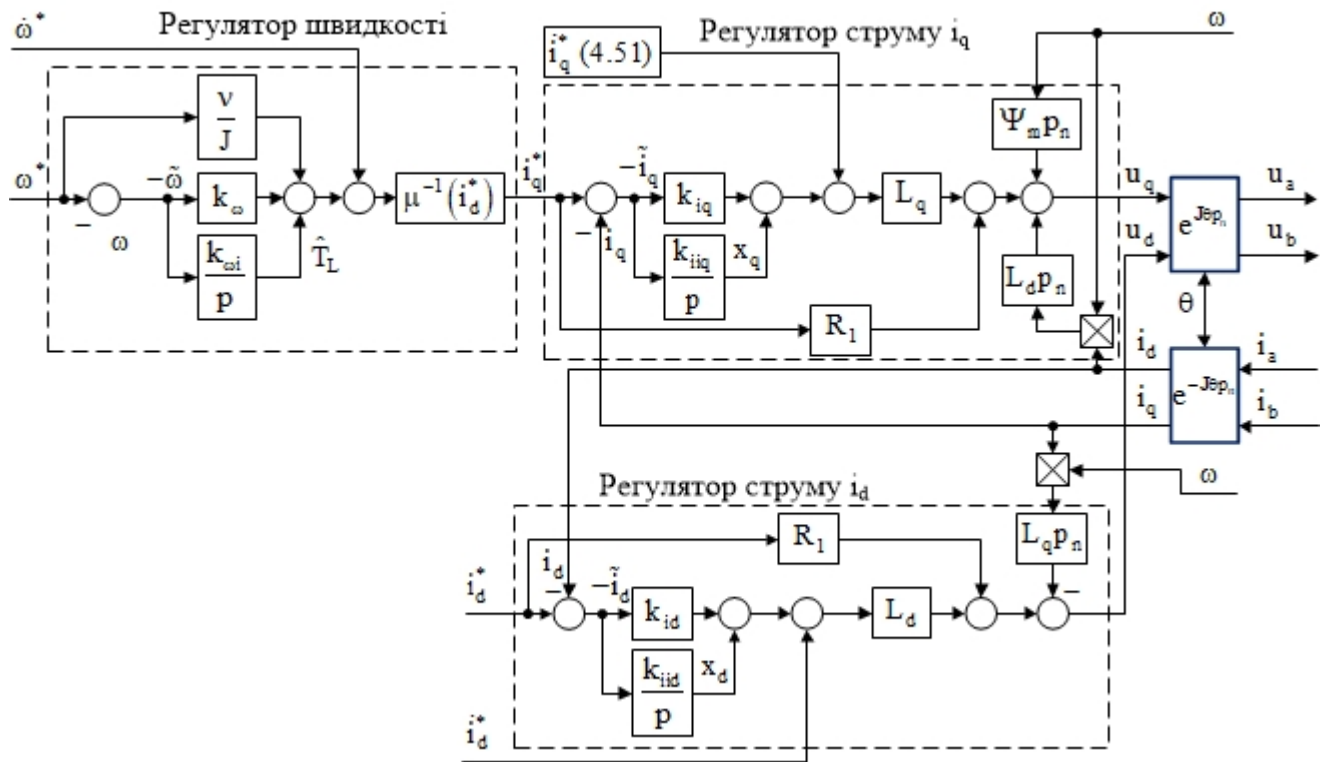


Рис. 3.4 – Структурна схема системи векторного керування кутовою швидкістю явнополюсного СДПМ

Модель двигуна (3.36) і алгоритм керування (3.37) – (3.40) можуть бути легко зведеними до випадку відсутності насичення, тобто приймається $L_d = L_{dd}(i_d) = L_d(i_d)$, $L_q = L_{qq}(i_q) = L_q(i_q)$. Для неявнополюсних СДПМ $L = L_d = L_q$. Для синхронних реактивних двигунів насичення магнітної системи не може бути знехтувано, проте потік постійних магнітів $\Psi_m = 0$ [4].

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

4.1 Вимоги до перетворювачів та функціональна електроприводу

Розглянувши технічні характеристики основних закордонних виробників сучасних перетворювачів частоти (ПЧ), таких як Alien Bradly, Siemens, ABB, Danfoss, Mitsubishi, Schneider Electric та ін., можна сформулювати загальні вимоги, які ставляться кінцевим споживачем до сучасних асинхронних та синхронних електроприводів. Основні вимоги до рівнів напруги ПЧ:

- напруга і частота живлення:

- а) трифазна напруга ~ 380 В, 50 Гц;

- б) однофазна напруга ~ 220 В, 50 Гц;

- в) акумуляторне джерело живлення опціонально з підвищувальним DC-DC перетворювачем $=24$ В, $=50$ В та кратні їм значення;

- вихідна частота перетворювачів частоти: 0...400 Гц.

Алгоритми керування, які реалізуються перетворювачами:

- традиційне частотне (скалярне) керування з квадратичною та лінійною U/f характеристикою з можливістю IR-компенсації і компенсації ковзання;

- частотне керування з ПІ-регулятором швидкості;

- векторне керування з датчиком швидкості;

- векторне бездатчикове керування.

В стандартній конфігурації електропривод має забезпечувати наступні мінімальні інтерфейсні можливості:

- кількість дискретних гальванічно-розв'язаних входів – 6;

- кількість аналогових входів 0...10 В – 1 канал;

- кількість аналогових входів 4...20мА – 1 канал;

- кількість аналоговий вихід 0...10 В;

- кількість виходів релейного типу – 2;

- гальванічно розв'язані інтерфейси зв'язку з системами верхнього рівня RS-485, CAN;

- вбудований ПІД-регулятор технологічного параметру;

- внутрішній ключ клампера на малих потужностях (до 15 кВт);
- можливість підключення фотоімпульсного датчика швидкості (енкодера);
- наявність джерел живлення +10 В та +24 В для обслуговування зовнішніх підключень аналогових та дискретних сигналів.

Типову функціональну схему сучасного електроприводу змінного струму побудованого на основі перетворювача частоти з ланкою постійного струму показано на Рис. 4.1. Її основу складає перетворювач частоти, який поєднує в собі перетворювальний і керуючий пристрій з класичного визначення електроприводу. З цієї причини досить часто перетворювачі частоти називають електроприводами, хоча в загальному випадку це не є коректним.

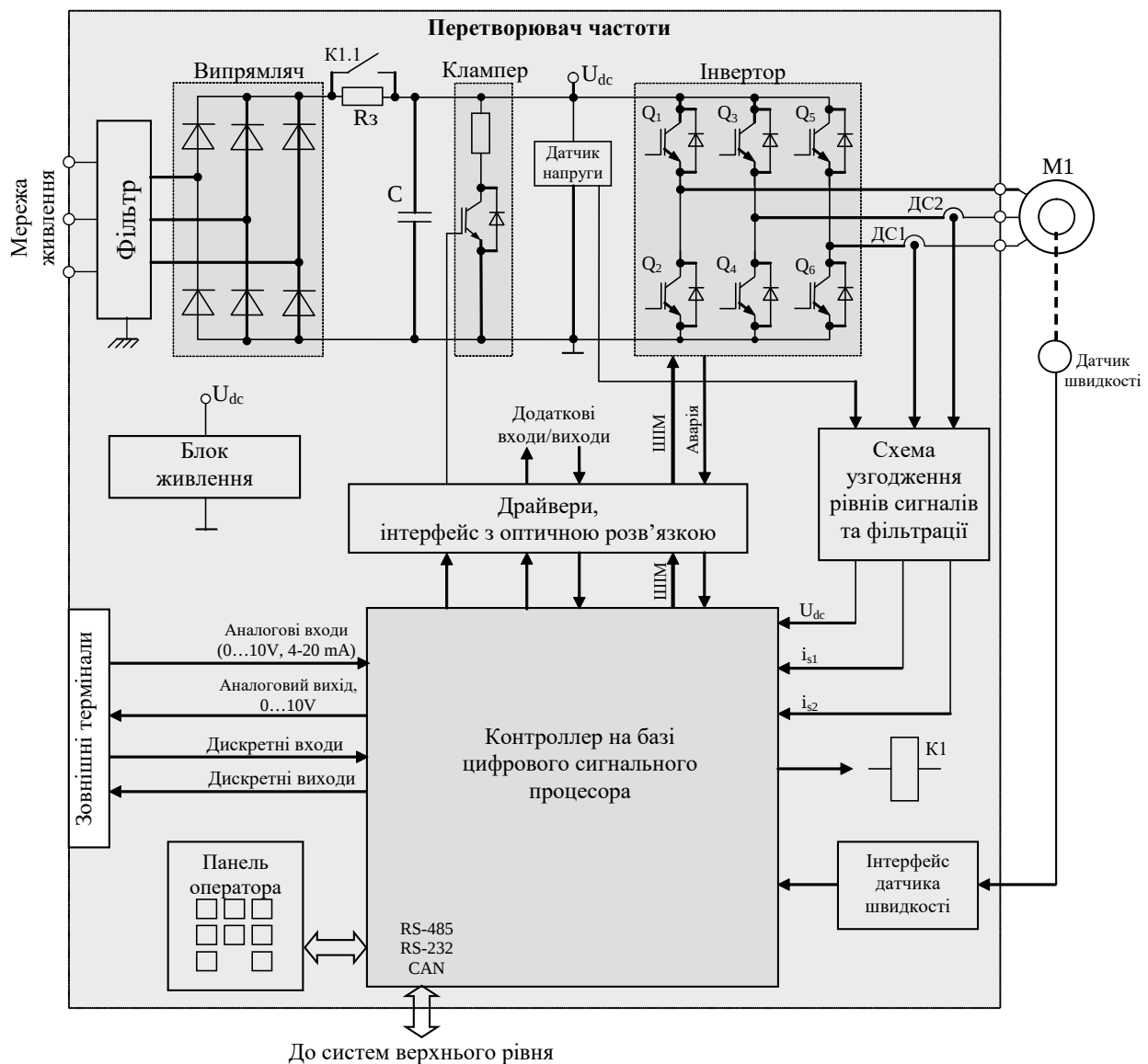


Рис. 4.1 – Функціональна схема асинхронного електроприводу

Стандартно перетворювач розділяють на дві основні складові:

– **силова частина**, до якої входять вхідний фільтр, некерований випрямляч, зарядне коло, ємність і датчик напруги ланки постійного струму (фільтр випрямляча), клампер, інвертор, датчики трифазних струмів, схеми драйверів та гальванічної розв'язки сигналів керування силовими ключами інвертора і клампера, блок живлення;

– **керуючий контролер**, до якого входять власне цифровий контролер, який, як правило, базується на цифровому сигнальному процесорі, та схеми узгодження сигналів.

Розглянемо більш детально призначення основних модулів та елементів показаних на Рис. 4.1.

Вхідний фільтр – як правило складається з двох основних складових: варисторів для запобігання перевищення напруги ланки постійного струму внаслідок сплесків напруги мережі живлення, та фільтру радіоперешкод, який запобігає розповсюдженню в мережу живлення високочастотних перешкод, які виникають при комутації ключів інвертора.

Випрямляч – перетворює змінну напругу мережі живлення в постійну напругу ланки постійного струму U_{dc} .

Ємність С – фільтр, призначений для згладжування випрямленої напруги на виході випрямляча.

Зарядне коло (резистор R_z та реле $K1$) – забезпечують плавний заряд ємності фільтру випрямляча С при подачі живлення на перетворювач. Після закінчення заряду контакт реле $K1.1$ замикається.

Клампер – призначений для стабілізації напруги в генераторних режимах роботи двигуна, які супроводжуються рекуперацією енергії до ланки постійного струму.

Інвертор – перетворює постійну напругу ланки постійного струму у задану трифазну напругу на виході перетворювача, результуючий вектор якої (усереднений на періоді широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)) має заданий модуль, частоту та кутове положення.

Датчик напруги ДН – призначений для передачі в керуючий контролер інформації про напругу ланки постійного струму U_{dc} , де вона використовується для забезпечення захисних функцій, контролю заряду ємності фільтру випрямляча, а також для генерування імпульсів керування ключами інвертора по законам ШІМ.

Датчики струму ДС1, ДС2 – призначені для передачі в керуючий контролер інформації про фазні струми двигуна, де вона використовується для організації захисних функцій інвертора та двигуна, а також для організації зворотних зв'язків в системах векторного керування.

Датчик швидкості ДШ – призначений для вимірювання контролером кутової швидкості (положення) з метою організації зворотних зв'язків та захисних функцій.

Драйвери – перетворюють параметри імпульсів керування силовими ключами, які надходять від контролера, з метою забезпечення надійного відкриття та запирання IGBT ключів. Фактично драйвери можна розглядати як підсилювачі сигналів. Досить часто драйвери додатково забезпечують захист від струмів короткого замикання інвертора.

Опторозв'язка – забезпечує гальванічну розв'язку дискретних сигналів керування з метою підвищення завадозахищеності керуючого контролера, а також для запобігання виходу його з ладу при аварійних режимах в силовій частині. Виконується за допомогою оптопар, або оптоволоконних ліній зв'язку у перетворювачах великої потужності.

Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – приводить рівні сигналів, які отримуються від датчиків струмів, напруги і швидкості до рівнів допустимої вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Для підвищення завадостійкості системи керування може застосовуватися фільтрація.

Інтерфейс датчика швидкості – дозволяє підключати до контролера фотоімпульсні датчики з різними типами апаратних інтерфейсів. Як правило містить гальванічну розв'язку.

Керуючий контролер – виконує функції автоматизації перетворювача, отримання завдання на регульовані координати, розраховує алгоритм керування двигуном, генерує імпульси керування ключами, реалізує захисні функції, здійснює комунікації з системами верхнього рівня.

Блок живлення – пристрій який забезпечує живлення власних потреб перетворювача: живлення контролера, драйверів, зовнішні +10 В та ± 24 В, живлення датчиків та ін. В сучасних перетворювачах вхідна напруга для блоку живлення власних потреб береться від ланки постійного струму, що забезпечує безпечну зупинку системи при зникненні напруги мережі живлення.

Зовнішні термінали – служать для підключення до перетворювача дискретних входів-виходів (наприклад сигналів керування перетворювачем «Пуск», «Стоп», «Реверс» тощо), аналогових входів-виходів (завдання швидкості, зворотні зв'язки за технологічними параметрами тощо).

Панель оператора – призначена для налаштування параметрів системи, подачі команд перетворювача та завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостереження за контрольними величинами та діагностики.

Додаткові входи-виходи – призначені для керування додатковими системами, наприклад, для включення вентиляторів системи охолодження, контролю спрацювання зарядного реле та ін.

4.2 Функції та функціональна схема керуючого контролера

Функції, які виконуються керуючим контролером в електроприводі змінного струму визначають вимоги до його апаратної та програмної частини, і умовно можуть ділитися на наступні групи:

Функції керування – включають розрахунок алгоритмів керування електричною машиною, генерування імпульсів керування ключами інвертора, розрахунок регуляторів технологічних параметрів та інші. Функції керування виконуються в режимі реального часу, тому вони в значній мірі визначають вимоги до швидкодії процесорного пристрою. Додатково до функцій керування можна віднести вимірювання та обробку сигналів зворотних зв'язків.

Функції автоматизації – включають в себе керування елементами перетворювача (зарядним реле, системою охолодження, ін.), виконання захисних функцій, отримання та обробка команд по каналах дискретних входів або від віддалених систем, формування станів дискретних виходів та аналогових сигналів, аналіз сигналів від зовнішніх аналогових входів.

Інтерфейсні функції – обмін інформацією з панеллю оператора та системами верхнього рівня.

З врахуванням вимог до сучасних електроприводів та з урахуванням перерахованих функцій керуючого контролера, його типова функціональна схема матиме вигляд представлений на Рис. 4.2.

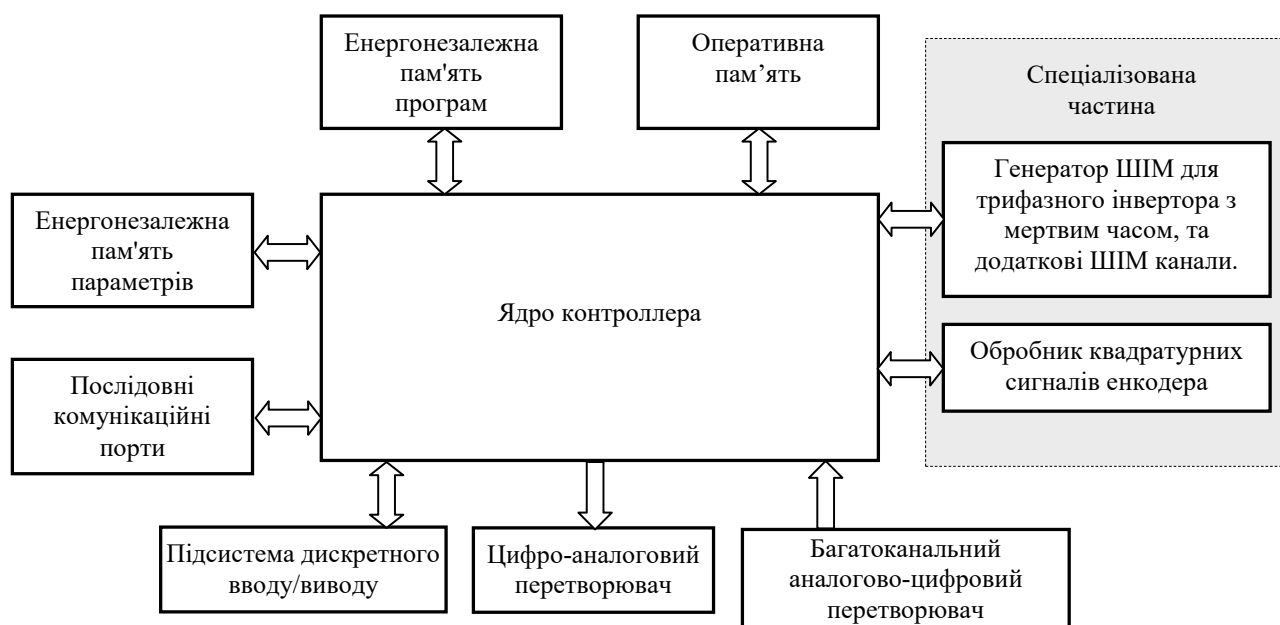


Рис. 4.2 – Типова функціональна схема керуючого контролера

На Рис. 4.2 сірим кольором виділено спеціалізовану частину, яка містить модулі, необхідні для керування електромеханічними системами.

Ядро контролера – виконує необхідні обчислення і маніпуляції з даними.

Енергонезалежна пам'ять програм – містить програму, за якою працює керуючий контролер. Як правило вміст цієї пам'яті є недоступним для зміни кінцевим користувачем.

Енергонезалежна пам'ять параметрів – призначена для збереження налаштувань системи, які здійснюються кінцевим користувачем. Наприклад параметри підключеного двигуна, час розгону/гальмування тощо.

Оперативна пам'ять – має стандартне призначення, тобто в ній зберігаються різноманітні робочі дані, значення змінних системи та інша оперативна інформація. Вміст оперативної пам'яті втрачається після зняття живлення контролера.

Генератор ШІМ для трифазного інвертора з «мертвим часом» – забезпечує формування шести імпульсів керування силовими ключами інвертора, при цьому імпульси формуються як три компліментарні пари (одна пара на кожне плече інвертора). Імпульси кожної з пар мають регульований «мертвий час».

Додаткові ШІМ-канали – призначені для керування ключем клампера, формування аналогового виходу та ін.

Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) – для перетворення аналогової інформації, що надходить від датчиків та задаючих елементів у цифрову форму.

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – як правило використовується для організації аналогового виходу з перетворювача частоти.

Підсистема дискретного вводу/виводу – набір дискретних входів-виходів для виконання необхідних функцій автоматизації, як внутрішніх так і зовнішніх (по відношенню до перетворювача частоти).

Послідовні комунікаційні порти – забезпечують апаратну підтримку інтерфейсних функцій керуючого контролера.

4.3 Загальна інформація про датчики струму і швидкості

4.3.1 Вимірювання струму та напруги на основі ефекту Холла

В сучасних електроприводах, побудованих на основі транзисторних ШІМ-перетворювачів, до систем вимірювання струму ставляться вимоги високої швидкодії та наявності гальванічної розв'язки між силовим колом і інформаційним сигналом.

Розглянемо три способи вимірювання струму, які забезпечують гальванічну розв'язку каналу вимірювання:

- трансформатори струму;

- датчики струму на ефекті Холла;
- аналогові датчики з гальванічною розв'язкою.

Трансформатор струму, приклад схеми включення якого показано на Рис. 4.3 є найбільш простим пристроєм для вимірювання струму. Перевагами трансформаторів струму є простота конструкції, наявність гальванічної розв'язки, висока заводо захищеність внаслідок формування струмового сигналу на виході. До недоліків відносяться: низька точність при вимірюванні струмі на малих частотах та при широких діапазонах вимірювання, неможливість вимірювання постійного струму, погані масо-габаритні показники. Наявність вказаних недоліків суттєво обмежує, а в більшості випадків унеможлиблює застосування трансформаторів струму в сучасних регульованих електроприводах.

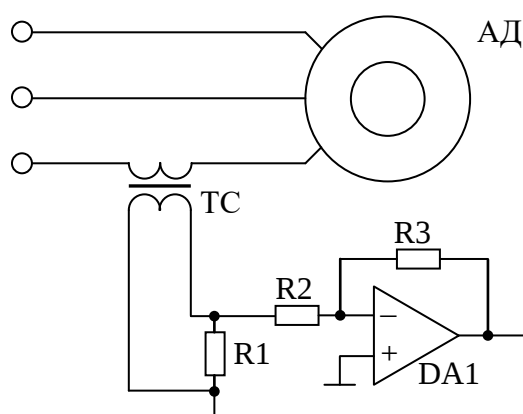


Рис. 4.3 – Схема включення трансформатора струму

Іншим способом вимірювання великих струмів є застосування датчиків Холла відкритого та компенсаційного типу. Принцип дії цих датчиків базується на ефекті, який був відкритим Едвардом Холлом у 1879 році і проілюстрований на Рис. 4.4. Ефект полягає в наступному: якщо через провідник, який знаходиться в магнітному полі, пропускати струм, напрям якого є перпендикулярним магнітному полю, то з боку магнітного поля на електрони в провіднику діє сила, яка відхиляє їх в поперечному напрямку, внаслідок чого виникає поперечна електрорушійна сила (ЕРС), яку називають ЕРС Холла. ЕРС

Холла є перпендикулярною струму і магнітному полю і є прямо пропорційною величині струму та магнітного поля.

Існують два основних різновиди датчиків на ефекті Холла для вимірювання струму і напруги: відкритого і компенсаційного типу.

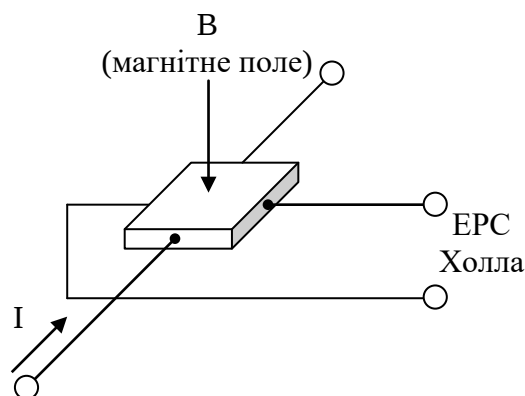


Рис. 4.4 – Пояснення щодо ефекту Холла

Конструкцію датчика відкритого типу показано на Рис. 4.5. Провідник зі струмом пропускається через отвір магнітного осердя. При протіканні струму через провідник в осерді створюється магнітне поле, лінії якого пронизують чутливий елемент – безпосередньо датчик Холла. За допомогою операційного підсилювача DA1 отримана з датчика Холла ЕРС підсилюється до необхідного рівня.

Очевидно, що датчик Холла забезпечує гальванічну розв'язку, так як вимірювання здійснюється за посередництвом магнітного поля, без наявності електричного контакту датчика з елементами, через які протікає вимірюваний струм. Вихідна напруга датчика відкритого типу пропорційна напруженості магнітного поля. Відповідно одним з недоліків датчиків відкритого типу, є вплив на покази вимірювань гістерезису магнітного осердя, тобто можливість існування зсуву нуля вихідного сигналу при нульовому струмі на вході.

Датчики компенсаційного типу на виході формують струм, який протікає через обмотку зворотного зв'язку і компенсує вихідний магнітний потік, як показано на Рис. 4.6. Цей же струм є вихідним сигналом компенсаційного датчика, пропорційним вимірюваному струму. Датчики компенсаційного типу працюють при нульовому потоку в осерді і тому є менш чутливі до гістерезису.

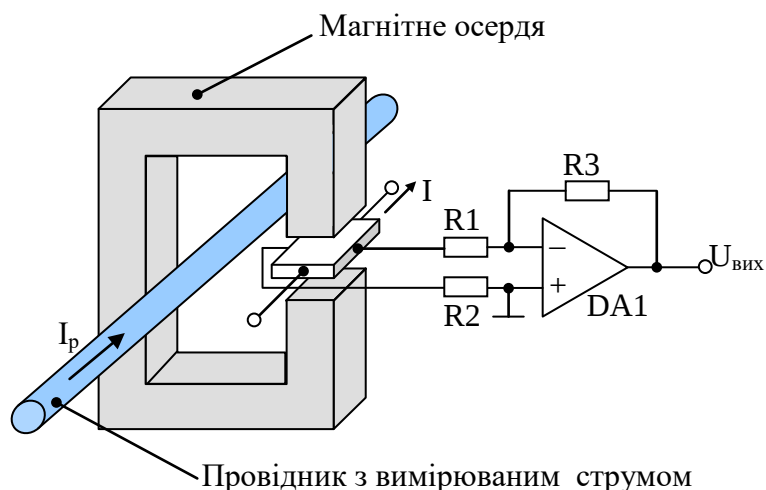


Рис. 4.5 – Датчик струму відкритого типу на ефекті Холла

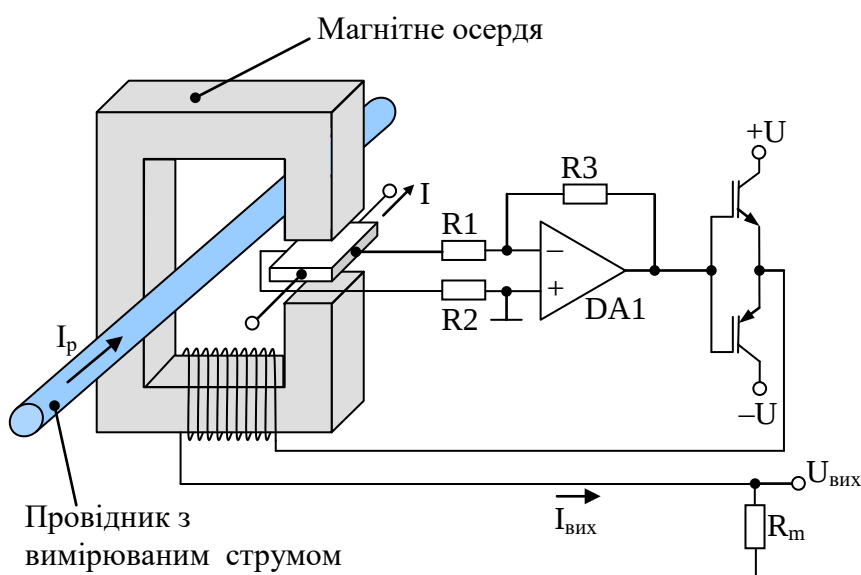


Рис. 4.6 – Датчик струму компенсаційного типу

Датчики компенсаційного типу характеризуються більш високою точністю, лінійністю, а також завадозахищеністю, яка досягається за рахунок використання струмового сигналу на виході. Як наслідок, вартість цих датчиків є вищою у порівнянні з датчиками відкритого типу. Додатковими перевагами датчиків на ефекті Холла є їх широка полоса пропускання, яка типово дозволяє вимірювати струми в діапазоні від нуля і до 100 кГц.

Для вимірювання напруги також використовують датчики побудовані на ефекті Холла. Для цього первинне коло датчика підключається через додатковий опір до вимірюваної напруги, що призводить до протікання через нього невеликого струму (на рівні декількох десятків міліампер), який є

пропорційним вимірювані напрузі і фактично вимірюється датчиком. На Рис. 4.7 – Рис. 4.8 показано зовнішній вигляд і основні характеристики декількох датчиків струму та напруги Рис. 4.9. Більш детальна інформація стосовно датчиків струму і напруги на ефекті Холла може бути знайдена в [5].



- Номінальний вхідний струм $I_{PN} = 100 \text{ A}$.
- Максимальний вхідний струм $I_p = \pm 150 \text{ A}$.
- Номінальний вихідний струм $I_{SN} = 50 \text{ mA}$.
- Напруга живлення $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$.
- Точність $\pm 0.7\%$.
- Нелінійність $\leq 0.15\%$.
- Час затримки 1 мкс .

Рис. 4.7 – Зовнішній вигляд та основні характеристики датчика LA-100P (LEM)



- Номінальний вхідний струм $I_{PN} = 25 \text{ A}$.
- Максимальний вхідний струм $I_p = \pm 80 \text{ A}$.
- Вихідна напруга при $I_p = 0$ $U_{out} = 2.5 \text{ V}$.
- Напруга живлення 5 V .
- Точність $\pm 0.7\%$.
- Нелінійність $\leq 0.1\%$.
- Час затримки 0.4 мкс .

Рис. 4.8 – Зовнішній вигляд і основні характеристики датчика LTS-25NP (LEM)



- Номінальний вхідний струм 10 mA
- Максимальний вхідний струм $\pm 14 \text{ mA}$
- Номінальний вихідний струм 25 mA
- Напруга живлення $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$
- Точність $\pm 0.9\%$
- Нелінійність $\leq 0.2\%$
- Час затримки 40 мкс .

Рис. 4.9 – Зовнішній вигляд та основні характеристики датчика LV-25NP (LEM)

4.3.2 Вимірювання кутової швидкості та положення

Фотоімпульсний датчик швидкості (енкодер) представляє собою пристрій, який містить: вал із закріпленим на ньому диском з рівномірно розташованими по колу отворами; набір світлодіодів та фотоприймачів (оптичних пар), які розміщені по різні сторони диска як показано на Рис. 4.10; електронні схеми для живлення світлодіодів та формування вихідних імпульсів.

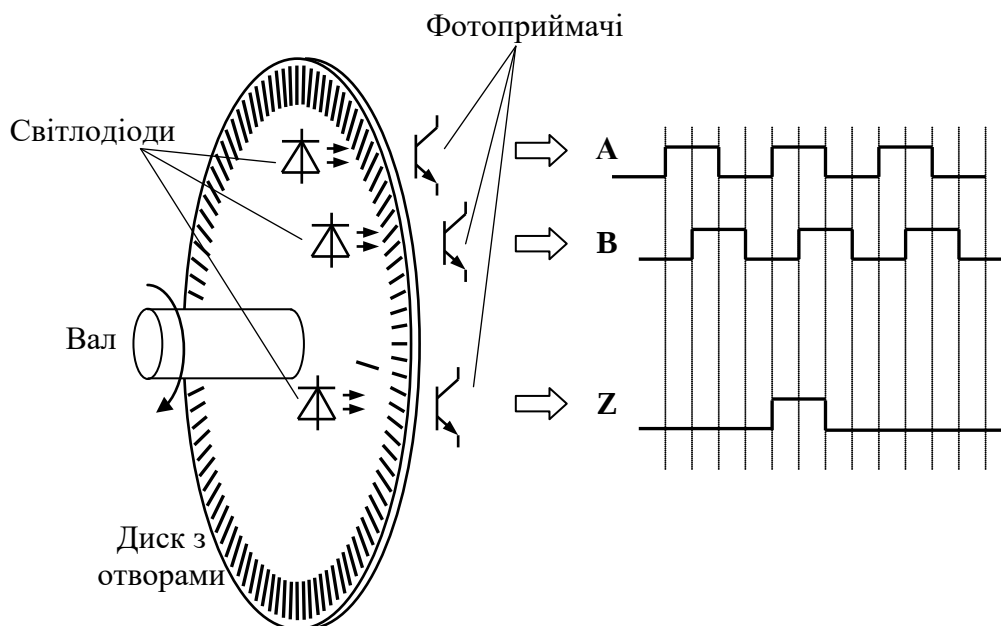


Рис. 4.10 – Принцип дії фотоімпульсного датчика швидкості

При обертанні валу датчика, внаслідок наявності у диску рівномірно розташованих отворів, світло від світлодіодів періодично попадає на фотоприймачі, які формують на виході електричні імпульси, частота яких пропорційна швидкості обертання диска.

Для визначення напрямку обертання (знаку кутової швидкості) використовують дві оптичні пари які формують «пряму» (А) та «зворотну» (В) послідовності імпульсів. Взаємне геометричне розташування цих оптичних пар виконується так, щоб зсув між вихідними імпульсами послідовностей А та В дорівнював четверті періоду. Для того щоб визначити напрямок руху, аналізується, наприклад, стан сигналу послідовності В при надходженні переднього фронту послідовності А. Припустимо, що вал датчика обертається проти годинникової стрілки, тобто імпульси на Рис. 4.10 умовно «рухаються»

вліво. В цьому випадку передній фронт послідовності А з'являється при $B = 0$. При русі у зворотному напрямку (імпульси «рухаються» вправо) передній фронт послідовності А з'являється при $B = 1$. Таким чином стан послідовності В при надходженні переднього фронту сигналу А визначає напрямок обертання валу датчика. Аналогічний аналіз можна виконувати по будь-якому з фронтів імпульсів послідовностей А і В.

Додатково, використання двох послідовностей імпульсів дозволяє підвищити розподільчу здатність фотоімпульсних датчиків швидкості в чотири рази. Для цього на основі сигналів А і В формується одна результуюча послідовність АВ, яка отримується за рахунок виділення передніх та задніх фронтів імпульсів сигналів А і В, як показано на Рис. 4.10. З метою вимірювання кутового положення чи кутової швидкості виконується підрахунок імпульсів результуючої послідовності АВ.

Третя оптична пара призначена для отримання послідовності імпульсів, яку називають нульовою або z-послідовністю. Для формування імпульсів цієї послідовності в диску датчика роблять окремий отвір (нульова мітка) таким чином, щоб генерувався один імпульс на оберт, див. Рис. 4.11. Основним призначенням нульової мітки є знаходження початкового положення робочого органу чи валу двигуна, а також корекція вимірювання кутового положення.

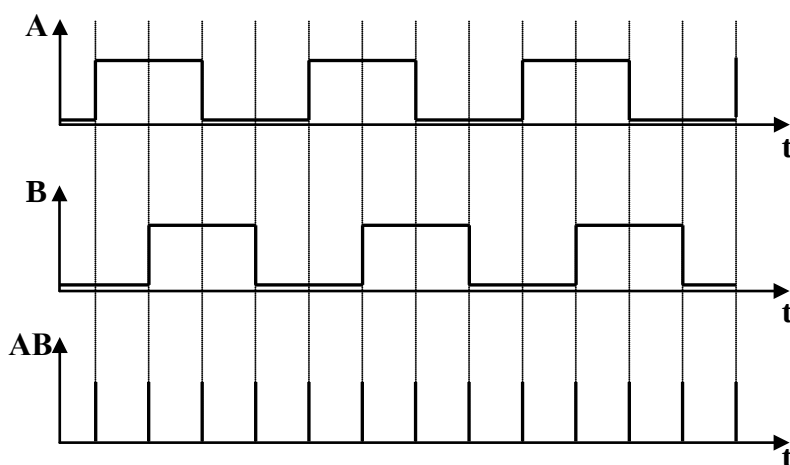


Рис. 4.11 – Формування результуючої послідовності імпульсів

Найпростішим способом вимірювання кутової швидкості за допомогою фотоімпульсного датчика є диференціювання кутового положення

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

де Δt – малий інтервал часу, протягом якого вал повертається на кут $\Delta\theta$.

Іншими словами, Δt – це час, протягом якого виконується підрахунок імпульсів результуючої послідовності АВ для визначення відносного кута повороту валу. Визначимо $\Delta t = T_{so}$ як такт вимірювання кутової швидкості.

Нехай, датчик має розподільчу здатність, яка вказана в його паспорті, N імп/об. Тоді ціна одного імпульсу результуючої послідовності АВ буде рівною

$$\theta_{1i} = \frac{2\pi}{4N}. \quad (4.2)$$

Виміряна кутова швидкість розраховується як

$$\omega = \frac{n\theta_{1i}}{T_{so}} = \frac{2\pi n}{4NT_{so}}, \quad (4.3)$$

де n – кількість імпульсів послідовності АВ, які надійшли за час T_{so} .

Розглянемо альтернативний спосіб вимірювання швидкості і положення на основі резольверів. Резольвер – це електричний автотрансформатор, який використовується для вимірювання кута повороту ротора електричних машин.

Принцип дії резольвера полягає в наступному. Первинна обмотка автотрансформатору закріплена на валі ротора, вторинна – вихід пристрою. До первинної обмотки подається змінна напруга постійної частоти і амплітуди. При зміні положення первинної обмотки відносно вторинної (зміні положення ротора двигуна) змінюється амплітуда напруги, яка наводиться у вторинній обмотці. Таким чином отримується інформація про абсолютне положення ротора двигунів, що особливо корисно для електромеханічних систем на основі синхронного електроприводу, а також для систем керування положенням. Використовуючи отриману інформацію можливо отримати параметри напрямку переміщення, положення і швидкості його зміни.

Датчики механічних координат можна знайти на сайтах [6] – [8].

Внаслідок високої точності вимірювання, резольвери типово мають більшу вартість за енкодери аналогічного діапазону вимірювання.

4.4 Розрахунок основних елементів силовій частини

Для розрахунку основних елементів ПЧ необхідно мати значення: напруга і кількість фаз живлення, потужність, ККД і номінальний струм двигуна. Розглянемо розрахунок силовій частини ПЧ для двигуна 4A90L4Y3, який приводить до руху вентилятор, параметри якого зведено у Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані двигуна 4A90L4Y3

Номінальна потужність	$P_{2n} = 2.2 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 0.0056 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.80$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.83$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2.4$
Номінальне ковзання	$s_n = 0.051$
Критичне ковзання	$s_k = 0.33$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$

Номінальні діючі і амплітудні значення фазної напруги і струму статора розраховано в (2.6) – (2.9): $U_n = 220 \text{ В}$, $U_{na} = 311 \text{ В}$, $I_n = 5 \text{ А}$, $I_{na} = 7.1 \text{ А}$.

Максимальне значення струму в фазі двигуна визначається перевантажувальною здатністю електроприводу k_{ovl} , яка, в загальному випадку, залежить від конкретного типу механізму і дорівнює орієнтовно: $k_{ovl} = (1.1 \div 1.3)$ – турбомеханізми (низькодинамічні застосування); $k_{ovl} = (1.4 \div 2)$ – екструдери, конвеєри, підйомно-транспортні механізми (середньодинамічні застосування); $k_{ovl} = (2 \div 3)$ – роботи-маніпулятори, електроприводи електричних транспортних засобів, приводи подачі тощо (високодинамічні застосування).

Згідно з завданням для привода вентилятора виберемо $k_{ovl}=1.2$.

Максимальний струм на виході інвертора дорівнює

$$I_{\max} = k_{ovl} I_{na} = 1.2 \cdot 7.1 = 8.5 \text{ A.} \quad (4.4)$$

За умови живлення ПЧ від трифазної мережі живлення $U_{grid} = 380 \text{ В}$, напруга ланки постійного струму за умови ідеальної фільтрації приблизно дорівнює $U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} = 1.41 \cdot 380 \approx 540 \text{ В}$. За умови живлення від однофазної мережі $U_{grid} = 220 \text{ В}$ номінальна напруга ланки постійного струму дорівнює $U_{dcn} = \sqrt{2} U_{grid} = 1.41 \cdot 220 \approx 311 \text{ В}$. Для акумуляторного живлення напруга U_{dcn} дорівнює напрузі акумуляторних батарей U_{bt} або напрузі на виході підвищувального DC-DC перетворювача U_{out} за умови його використання.

Максимальна напруга ланки постійного струму сучасних ПЧ визначається допустимою напругою встановлених електролітичних конденсаторів фільтру, і складає приблизно: $U_{dcmax} = 750 \text{ В}$ – для ПЧ з трифазним живленням; $U_{dcmax} = 375 \text{ В}$ – для перетворювачів з однофазним живленням; $U_{dcmax} = (1.1 \div 1.2) U_{bt}$ – для акумуляторного живлення; $U_{dcmax} = (1.1 \div 1.2) U_{out}$ – для АКБ з DC-DC перетворювачем.

При виборі IGBT для автономного інвертора напруги їх максимально допустима напруга «колектор-емітер» має бути щонайменше в 1.5 рази вищою, ніж максимальна напруга ланки постійного струму, тобто

$$U_{ce} = 1.5 \cdot U_{dcmax} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В.} \quad (4.5)$$

Транзистори типу IGBT, які випускаються сучасною промисловістю, мають стандартний ряд максимальної напруги «колектор-емітер»: 250, 600, 650, 750, 950, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В [9] – [12]. Обов'язковою є умова наявності антипаралельного діода, який в більшості випадків є вбудованим в один корпус із транзистором і не потребує окремого розрахунку.

Для побудови силової частини ПЧ часто використовують IGBT-збірки (2 транзистори) та IGBT-модулі, які в одному корпусі містять 6 або 7

транзисторів, а також модулі, які містять IGBT-модуль і вбудований випрямляч. Такі рішення є оптимальними за ціною для використання середньої потужності, тому вони типово виготовляються на потужності 2-80 кВт.

Вибір IGBT рекомендується здійснювати на сайтах [9] – [12] (оскільки вони є перевіреними) за критеріями

$$I_c > I_{\max} = 8.5 \text{ A}, \quad (4.6)$$

$$U_{ce} > U_{ce \max} = 1125 \text{ V}, \quad (4.7)$$

де I_c та $U_{ce \max}$ – тривалий струм колектору та напруга «колектор-емітер», які вказані в паспортних даних IGBT.

За критеріями (4.6), (4.7) вибираємо модуль типу FP10R12W1T4 [13], який включає IGBT-модуль, вбудований випрямляч і клампер з номінальними параметрами напруги «колектор-емітер» $U_{ce} = 1200 \text{ V}$ і струму колектора $I_c = 10 \text{ A}$.

Розрахуємо еквівалентний струм, який споживається з ланки постійного струму з врахуванням коефіцієнту перевантаження

$$I_{dc} = \frac{k_{ovl} P_n}{U_{dcn} \eta \eta_{inv}} = \frac{1.2 \cdot 2200}{540 \cdot 0.8 \cdot 0.96} = 6.4 \text{ A}, \quad (4.8)$$

де $\eta_{inv} = (0.95 \div 0.97)$ – коефіцієнт корисної дії інвертора.

Еквівалентний опір навантаження розраховується як

$$R_0 = \frac{U_{dcn}}{I_{dc}} = \frac{540}{6.4} = 85 \text{ Ом}. \quad (4.9)$$

Ємність ланки постійного струму визначається за формулою

$$C = \frac{1}{2\pi k_p m f R_0} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.04 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 85} = 312 \text{ мкФ}, \quad (4.10)$$

де $k_p = 0.04$ – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, який для перетворювачів частоти вибирають в діапазоні $(0.02 \div 0.05)$ в залежності від величини пульсацій; m – число фаз випрямляча; f – частота напруги мережі.

Вибір силових конденсаторів рекомендується проводити на сайтах [14], [15]. Обираємо два конденсатори типу B43510A3687M000 [16] ємністю

$C_c = 680$ мкФ і максимальною напругою $U_c = 385$ В. Потрібна максимальна робоча напруга ланки постійного струму $U_{dcmax} = 750$ В і ємність (4.10) досягаються послідовним включенням двох конденсаторів, тобто $U_{12} = 2 \cdot U_c = 2 \cdot 385 = 750$ В, $C_{12} = C_c / 2 = 680 / 2 = 340$ мкФ.

Вибір датчиків струму здійснюється за максимальний амплітудним значенням струму двигуна, який необхідно вимірювати (4.4). Обрано 2 давачі струму НУ 10-Р з номінальним струмом 10 А, діапазон вимірювання 30 А [17].

Звичайно в конструкцію клампера входять: резистор, зворотній діод та напівпровідниковий ключ, що підключає резистор паралельно в ланку постійного струму для розсіювання енергії в режимі гальмування двигуна.

У випадку, коли вся активна потужність рекуперується в ланку постійного струму, тоді струм, що протікатиме через клампер дорівнюватиме:

$$I_{br} = \frac{P_n}{U_{dcn}} = \frac{2200}{540} = 4.1 \text{ А}, \quad (4.11)$$

що менше за значення $I_c = 10$ А, на яке спроектовано IGBT-модуль, тобто вибирати окремий кламперний ключ не є потрібним.

Середня потужність за робочий цикл електроприводу, яку необхідно розсіювати на резисторі клампера, дорівнює:

$$P_{cp} = 0.25 \cdot P_n = 0.25 \cdot 2200 = 550 \text{ Вт}. \quad (4.12)$$

Мінімальний потрібний опір кламперного резистора можна розрахувати наступним чином:

$$R = \frac{P_{cp}}{I_{br}^2} = \frac{550}{4.1^2} = 33 \text{ Ом}. \quad (4.13)$$

Силові резистори можуть бути знайдені за посиланням [18].

Якщо для керування координатами двигуна використовуються методи, які не потребують організації зворотних зв'язків за струмом, а вимірювання струму здійснюється лише для захисту системи, то для здешевлення перетворювача датчики на виході інвертора не встановлюються, і обмежуються лише датчиком для вимірювання струму ланки постійного струму (4.8).

Канал вимірювання напруги ланки постійного струму може бути побудований з використанням датчика типу LV-25NP [19], схема підключення якого показана на Рис. 4.12.

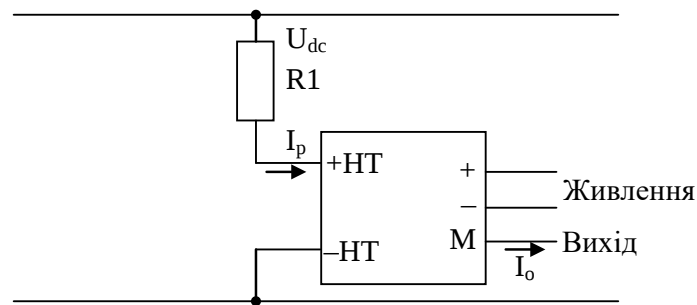


Рис. 4.12 – Підключення датчика напруги

В документації на датчик вказано, що максимальний струм первинного кола $I_{p\max} = 14$ мА, тому значення опору резистора R1 дорівнює:

$$R1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.014} = 54 \text{ кОм.}$$

Зі стандартного ряду резисторів вибираємо $R1 = 56$ кОм [18].

Згідно варіанту, для асинхронного електроприводу турбомеханізму не потребується висока точність регулювання швидкості. Виберемо датчик швидкості– енкодер GHSF58, діапазон вимірюваної швидкості 6000 об/хв, розподільча здатність 5000 імп/об [20]. Аналогічний резольвер

Як результат проведеного розрахунку і вибору обладнання в кінці любого технічного проекту наводиться специфікація обраних елементів і орієнтовна вартість. Розрахована вартість вибраних елементів ПЧ за допомогою сайту [18] зведено в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахована вартість елементів ПЧ

Елемент ПЧ	Ц, \$	Елемент ПЧ	Ц, \$
Силовий модуль IGBT FP10R12W1T4	37	Датчик напруги LV-25NP	70
Конденсатор B43510A3687M000	4*5	Кламперний резистор	10
Датчик струму НУ 10-Р	2*22	Енкодер GHSF58	79
Загалом	-	-	260

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кравчик, А. Э., Шлаф, М. М., Афонин, В. И., Соболенская, Е. А.. *Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник*. М.: Энергоиздат. 1982.
2. Теорія мехатронних систем – 1: Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів заочної форми навчання напряму підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса. –К.: НТУУ "КПІ", 2011 р. – 96 с.
3. Catalogue of Marathon SyMAX®, permanent magnet AC motors, SB385. Standard performance data 1800 RPM, 2013. [Електронний ресурс], URL: <https://info.ammc.com/hubfs/Partner%20Documents/Marathon%20Motors/SB385SyMAXPermanentMagnetCatalog-September2013f.pdf> (дата звернення 24.03.2022).
4. С. М. Пересада, Є. О. Ніконенко, "Керування електроприводами – посібник", КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2022, 396 с.
5. LEM – current transducer, voltage transducer, sensor, power measurement [Електронний ресурс], URL: <https://www.lem.com/en> (дата звернення 24.03.2022).
6. Products - Micronor [Електронний ресурс], URL: <https://micronor.com/> (дата звернення 24.03.2022).
7. Home - CALT Sensor [Електронний ресурс], URL: <https://caltensor.com/> (дата звернення 24.03.2022).
8. Encoder manufacturer rotary incremental & absolute encoders company [Електронний ресурс], URL: <https://www.encoder.com/> (дата звернення 24.03.2022).
9. Power modules and systems SEMIKRON [Електронний ресурс], URL: <https://www.semikron.com/> (дата звернення 24.03.2022).
10. Semiconductor & system solutions - Infineon technologies [Електронний ресурс], URL: <https://www.infineon.com/> (дата звернення 24.03.2022).

11. Powerex - Complete range of IGBTs and HVIGBTs and other integrated high power semiconductor solutions [Електронний ресурс], URL: <https://www.pwrx.com/> (дата звернення 24.03.2022).
12. IR packages [Електронний ресурс], URL: <https://www.irf.com/packaging> (дата звернення 24.03.2022).
13. Модуль IGBT з випрямлячем FP10R12W1T4 [Електронний ресурс], URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-FP10R12W1T4-DS-v02_01-EN.pdf?fileId=db3a3043163797a6011638990fd0016c (дата звернення 24.03.2022).
14. Home TDK Electronics - TDK Europe [Електронний ресурс], URL: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/> (дата звернення 24.03.2022).
15. Electronic components distributor micro-semiconductor [Електронний ресурс], URL: <https://www.micro-semiconductor.com> (дата звернення 24.03.2022).
16. Конденсатор B43510A3687M000 [Електронний ресурс], URL: <https://www.micro-semiconductor.com/products/EPCOS/B43510A3687M000>
17. Датчик струму HY 10-P [Електронний ресурс], URL: <https://www.lem.com/en/hy-10p> (дата звернення 24.03.2022).
18. DigiKey Electronics - Electronic components distributor [Електронний ресурс], URL: <https://www.digikey.com/> (дата звернення 24.03.2022).
19. Датчик напруги [Електронний ресурс], URL: <https://www.lem.com/en/lv-25p> (дата звернення 24.03.2022).
20. Інкрементальний енкодер GH5F58 - CALT Sensor [Електронний ресурс], URL: <https://caltensor.com/product/shaft-rotary-encoders-ghsf58-series/> (дата звернення 24.03.2022).

ДОДАТОК А. ДОВІДКОВІ ДАНІ АД, СДПМ, ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

Таблиця А.1 – Довідкові дані АД з синхронною частотою 3000 об/хв

Типорозмір електродвигуна	P2ном, кВт	Електромагнітні навантаження			Енергетичні показники										Параметри схеми заміщення у відносних одиницях								J, кгм ²
		В, Тл	А, А/см	J, А/мм ²	КПД, % при P2/P2ном, %					cos(phi), при P2/P2ном, %					Xm	В номінальному режимі				При К.З.			
					25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R1`	X1`	R2``	X2``	R``2п	Р к.п.	Х к.п.	
Синхронна частота обертання 3000 об/хв.																							
4AA50A2Y3	0.09	0.62	105	4.4	42.0	55.5	60.0	60.0	57.5	0.31	0.49	0.61	0.70	0.75	2.50	0.150	0.092	0.140	0.160	0.140	0.290	0.25	0.000025
4AA50B2Y3	0.12	0.60	114	4.1	48.5	60.0	63.5	63.0	58.0	0.31	0.50	0.62	0.70	0.75	2.30	0.110	0.076	0.120	0.140	0.120	0.230	0.22	0.000028
4AA56A2Y3	0.18	0.67	118	6.8	51.0	63.0	66.0	66.0	63.0	0.34	0.54	0.66	0.76	0.81	2.00	0.170	0.052	0.094	0.067	0.004	0.260	0.12	0.00042
4AA56B2Y3	0.25	0.66	133	6.8	57.0	67.5	69.0	68.0	64.0	0.35	0.57	0.66	0.77	0.81	2.40	0.160	0.053	0.110	0.079	0.110	0.270	0.12	0.00047
4AA63A2Y3	0.37	0.66	150	7.4	63.0	71.0	72.0	70.0	65.0	0.45	0.69	0.80	0.86	0.89	2.50	0.140	0.052	0.096	0.080	0.096	0.240	0.12	0.00076
4AA63B2Y3	0.55	0.70	174	8.0	69.0	75.0	75.0	73.0	68.0	0.47	0.69	0.80	0.86	0.88	2.50	0.130	0.049	0.096	0.083	0.097	0.230	0.12	0.0009
4A71A2Y3	0.75	0.67	168	7.3	71.0	78.0	78.5	77.0	73.0	0.50	0.72	0.82	0.87	0.89	2.60	0.120	0.052	0.064	0.077	0.065	0.190	0.11	0.00097
4A71B2Y3	1.1	0.72	200	8.5	76.0	79.5	79.5	77.5	73.0	0.50	0.73	0.82	0.87	0.89	2.80	0.130	0.054	0.069	0.084	0.070	0.2	0.11	0.0011
4A80A2Y3	1.5	0.72	194	6.1	73.0	80.5	81.5	81.0	79.0	0.48	0.70	0.80	0.85	0.87	2.50	0.084	0.051	0.049	0.081	0.050	0.130	0.099	0.0018
4A80B2Y3	2.2	0.73	218	6.5	77.0	83.0	83.5	83.0	81.0	0.51	0.73	0.83	0.87	0.89	2.70	0.076	0.050	0.049	0.087	0.050	0.130	0.098	0.0021
4A90L2Y3	3.0	0.68	233	6.4	80.0	85.5	85.5	84.5	82.0	0.58	0.78	0.85	0.88	0.89	3.40	0.072	0.057	0.047	0.1	0.048	0.120	0.11	0.0035
4A100S2Y3	4.0	0.67	232	5.2	80.0	86.0	88.0	86.5	85.0	0.60	0.80	0.86	0.89	0.90	3.40	0.054	0.055	0.036	0.099	0.038	0.091	0.11	0.0059
4A100L2Y3	5.5	0.68	247	5.6	82.5	87.5	88.0	87.5	86.0	0.65	0.83	0.88	0.91	0.91	3.80	0.050	0.054	0.036	0.11	0.038	0.087	0.10	0.0075
4A112M2Y3	7.5	0.70	252	5.7	78.0	85.5	87.5	87.5	86.5	0.56	0.74	0.83	0.88	0.89	3.70	0.046	0.058	0.028	0.14	0.032	0.077	0.15	0.01
4A132M2Y3	11	0.71	248	5.9	80.0	87.0	88.0	88.0	87.0	0.65	0.82	0.87	0.90	0.90	4.20	0.040	0.061	0.025	0.12	0.028	0.068	0.12	0.023
4A160S2Y3	15	0.72	335	6.3	80.0	86.5	88.0	88.0	87.0	0.68	0.84	0.89	0.91	0.91	4.00	0.052	0.092	0.022	0.12	0.029	0.081	0.16	0.048
4A160M2Y3	18.5	0.70	355	6.5	82.0	87.5	88.5	88.5	87.0	0.72	0.86	0.90	0.92	0.92	4.50	0.049	0.092	0.022	0.12	0.030	0.079	0.16	0.053
4A180S2Y3	22	0.78	387	5.6	79.0	86.0	88.5	88.5	88.0	0.65	0.82	0.88	0.91	0.92	3.60	0.030	0.091	0.020	0.11	0.026	0.065	0.15	0.07
4A180M2Y3	30	0.79	366	5.2	82.0	88.5	90.5	90.5	89.0	0.66	0.82	0.88	0.90	0.90	3.80	0.030	0.073	0.018	0.11	0.024	0.054	0.13	0.085
4A200M2Y3	37	0.82	403	4.8	81.0	87.5	90.0	90.0	89.5	0.67	0.82	0.87	0.89	0.89	4.10	0.029	0.094	0.021	0.12	0.031	0.060	0.16	0.15
4A200L2Y3	45	0.79	407	4.9	83.0	89.0	91.0	91.0	90.5	0.71	0.85	0.89	0.90	0.90	4.90	0.027	0.088	0.020	0.13	0.031	0.058	0.15	0.17
4A225M2Y3	55	0.74	405	5.0	82.5	89.5	91.0	91.0	90.5	0.78	0.89	0.91	0.92	0.92	5.60	0.026	0.092	0.019	0.12	0.029	0.055	0.16	0.25
4A250S2Y3	75	0.77	409	4.4	81.0	88.0	91.0	91.0	91.0	0.71	0.84	0.88	0.89	0.89	4.80	0.021	0.080	0.015	0.13	0.029	0.050	0.16	0.47
4A250M2Y3	90	0.75	419	4.6	84.0	90.0	92.0	92.0	91.5	0.71	0.84	0.89	0.90	0.90	5.20	0.020	0.078	0.016	0.13	0.030	0.050	0.16	0.52
4A280S2Y3	110	0.79	457	3.3	82.0	88.5	91.0	91.0	90.5	0.83	0.87	0.88	0.89	0.88	3.80	0.017	0.097	0.013	0.10	0.036	0.053	0.19	1.1
4A280M2Y3	132	0.77	474	3.6	84.0	89.5	91.5	91.5	91.0	0.83	0.87	0.88	0.89	0.88	4.20	0.017	0.095	0.013	0.10	0.031	0.048	0.19	1.2
4A315S2Y3	160	0.70	471	3.4	85.5	90.5	92.0	92.0	91.5	0.83	0.87	0.89	0.90	0.89	5.00	0.015	0.093	0.012	0.12	0.027	0.042	0.16	1.4
4A315M2Y3	200	0.72	468	3.2	87.0	91.5	92.5	92.5	92.0	0.83	0.88	0.89	0.90	0.89	4.90	0.012	0.080	0.011	0.19	0.029	0.041	0.14	1.6
4A355S2Y3	250	0.73	519	3.4	87.0	91.0	92.5	92.5	92.0	0.86	0.88	0.89	0.90	0.89	5.70	0.013	0.091	0.011	0.10	0.032	0.045	0.13	2.9
4A355M2Y3	315	0.70	563	3.7	89.0	92.0	93.0	93.0	92.0	0.88	0.89	0.90	0.91	0.90	6.10	0.013	0.088	0.011	0.11	0.033	0.046	0.16	3.2

Таблиця А.2 – Довідкові дані АД з синхронною частотою 1500 об/хв

Типорозмір електродвигуна	P2ном, кВт	Електромагнітні навантаження			Енергетичні показники										Параметри схеми заміщення у відносних одиницях								J, кгм^2	
		В, Тл	А, А/см	J, А/мм^2	КПД, % при P2/P2ном, %					cos(phi), при P2/P2ном, %					Xm	В номінальному режимі				При К.З.				
					25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R1`	X1`	R2``	X2``	R``2п	R к.п.	X к.п.		
Синхронна частота обертання 1500 об/хв.																								
4AA50A4Y3	0.06	0.64	136	4.5	25.0	40.0	50.0	50.0	49.5	0.31	0.41	0.51	0.60	0.68	1.20	0.160	0.170	0.220	0.17	0.220	0.380	0.34	0.000029	
4AA50B6Y3	0.09	0.68	152	4.9	31.0	46.0	55.0	55.0	54.5	0.31	0.40	0.51	0.60	0.68	1.20	0.130	0.160	0.210	0.17	0.210	0.035	0.33	0.000033	
4AA56A4Y3	0.12	0.71	146	6.2	40.0	55.0	63.0	63.0	61.5	0.30	0.43	0.56	0.66	0.70	1.20	0.180	0.087	0.150	0.15	0.150	0.320	0.23	0.0007	
4AA56B4Y3	0.18	0.75	167	6.9	43.5	58.0	64.0	64.0	61.5	0.26	0.40	0.53	0.64	0.71	1.30	0.180	0.090	0.160	0.17	0.160	0.330	0.24	0.00079	
4AA63A4Y3	0.25	0.82	162	6.8	49.0	63.0	68.0	68.0	65.5	0.26	0.41	0.54	0.65	0.72	1.40	0.150	0.082	0.140	0.17	0.140	0.290	0.25	0.0012	
4AA63B4Y3	0.37	0.87	189	8.4	51.5	64.5	68.0	68.0	64.0	0.29	0.45	0.58	0.69	0.75	1.40	0.170	0.086	0.140	0.18	0.140	0.300	0.23	0.0014	
4A71A4Y3	0.55	0.93	188	6.9	55.0	67.0	70.5	70.5	67.0	0.29	0.46	0.59	0.70	0.75	1.60	0.130	0.086	0.110	0.20	0.110	0.240	0.23	0.0023	
4A71B4Y3	0.75	0.97	225	8.5	58.5	70.0	73.0	72.0	68.5	0.33	0.50	0.64	0.73	0.79	1.50	0.110	0.084	0.110	0.20	0.110	0.230	0.22	0.0024	
4A80A4Y3	1.10	0.84	218	7.6	64.0	74.0	76.0	75.0	72.0	0.38	0.59	0.73	0.81	0.85	1.70	0.120	0.078	0.068	0.12	0.071	0.2	0.14	0.0032	
4A80B4Y3	1.50	0.82	231	8.0	70.0	78.0	73.5	77.0	73.0	0.41	0.63	0.76	0.83	0.86	1.90	0.120	0.078	0.069	0.12	0.072	0.190	0.15	0.0033	
4A90L4Y3	2.20	0.88	233	7.6	74.0	81.0	81.5	80.0	76.5	0.42	0.64	0.76	0.83	0.85	2.10	0.098	0.076	0.060	0.13	0.013	0.160	1.14	0.0056	
4A1100S1Y3	3	0.90	246	6.6	75.5	82.0	83.0	82.0	79.5	0.43	0.65	0.77	0.83	0.85	2.20	0.078	0.079	0.053	0.13	0.057	0.140	0.14	0.0087	
4A100L4Y3	4	0.87	254	6.3	79.5	84.5	85.0	84.0	81.5	0.46	0.68	0.79	0.84	0.86	2.40	0.067	0.079	0.053	0.14	0.058	0.130	0.15	0.011	
4A112M4Y3	5.5	0.85	248	7.1	82.0	86.5	85.5	85.5	83.0	0.51	0.72	0.80	0.85	0.85	2.80	0.064	0.078	0.041	0.13	0.048	0.110	0.14	0.017	
4A132S1Y3	7.5	0.90	252	5.9	77.5	86.0	87.5	87.5	86.0	0.53	0.71	0.83	0.86	0.87	3.00	0.048	0.085	0.033	0.13	0.040	0.088	0.15	0.028	
4A132M4Y3	11	0.89	264	6.1	80.0	86.0	88.0	87.5	87.0	0.55	0.75	0.84	0.87	0.88	3.20	0.043	0.085	0.032	0.13	0.039	0.082	0.15	0.04	
4A160S4Y3	15	0.72	314	5.7	86.0	89.5	89.5	88.5	86.5	0.63	0.81	0.87	0.88	0.88	4.00	0.047	0.086	0.025	0.13	0.038	0.085	0.15	0.1	
4A160M4Y3	18.5	0.69	310	5.5	87.5	90.5	90.5	89.5	87.5	0.66	0.82	0.86	0.88	0.88	4.30	0.042	0.085	0.024	0.13	0.037	0.079	0.14	0.13	
4A180S4Y3	22	0.74	333	5.4	85.5	89.5	90.0	90.0	87.0	0.65	0.82	0.87	0.90	0.89	4.00	0.041	0.080	0.021	0.12	0.034	0.076	0.15	0.19	
4A180M4Y3	30	0.79	335	5.5	87.0	90.5	91.0	91.0	89.0	0.66	0.83	0.88	0.89	0.89	3.90	0.034	0.068	0.018	0.12	0.031	0.064	0.13	0.23	
4A200M4Y3	37	0.76	368	5.9	87.0	90.5	91.0	91.0	90.5	0.67	0.84	0.89	0.90	0.90	4.40	0.039	0.086	0.018	0.14	0.035	0.074	0.16	0.37	
4A200L4Y3	45	0.73	362	5.6	88.5	92.0	92.5	92.0	91.0	0.69	0.85	0.89	0.90	0.90	4.60	0.034	0.082	0.017	0.14	0.034	0.060	0.16	0.45	
4A225M4Y3	55	0.76	370	5.3	88.5	92.0	92.5	92.5	91.5	0.68	0.84	0.89	0.90	0.90	4.20	0.027	0.086	0.015	0.14	0.030	0.058	1.15	0.64	
4A250S4Y3	75	0.74	334	4.3	88.5	92.0	93.0	93.0	92.5	0.69	0.84	0.88	0.90	0.90	4.40	0.025	0.089	0.014	0.11	0.027	0.052	0.15	1	
4A250M4Y3	90	0.70	413	4.4	89.0	92.5	93.0	93.0	92.0	0.73	0.87	0.90	0.91	0.90	5.00	0.024	0.093	0.014	0.12	0.029	0.054	0.15	1.2	
4A280S4Y3	110	0.75	446	3.8	89.5	92.5	93.0	92.5	91.0	0.82	0.90	0.91	0.90	0.87	4.90	0.023	0.122	0.019	0.16	0.048	0.071	0.21	2.3	
4A280M4Y3	132	0.79	473	3.9	90.0	93.0	93.5	93.0	91.5	0.81	0.90	0.91	0.90	0.87	4.50	0.021	0.115	0.018	0.15	0.047	0.068	0.20	2.5	
4A315S4Y3	160	0.78	470	3.8	91.0	93.5	94.0	93.5	92.5	0.81	0.90	0.91	0.91	0.88	4.60	0.018	0.107	0.017	0.15	0.045	0.064	0.19	3.1	
4A315M4Y3	200	0.79	462	3.8	91.5	94.0	94.5	94.0	93.0	0.82	0.90	0.92	0.92	0.89	4.10	0.014	0.086	0.014	0.12	0.038	0.052	0.19	3.6	
4A355S4Y3	250	0.79	444	3.5	91.5	94.0	94.5	94.5	93.5	0.82	0.90	0.92	0.92	0.89	4.60	0.013	0.090	0.013	0.13	0.024	0.037	0.15	6	
4A355M4Y3	315	0.72	439	3.4	92.5	94.5	95.0	94.5	93.5	0.85	0.92	0.92	0.92	0.89	5.70	0.012	0.099	0.014	0.14	0.027	0.039	0.16	7	

Таблиця А.3 – Довідкові дані АД з синхронною частотою 1000 об/хв

Типорозмір електродвигуна	P2ном, кВт	Електромагнітні навантаження			Енергетичні показники										Параметри схеми заміщення у відносних одиницях							J, кгм^2	
		В, Тл	А, А/см	J, А/мм^2	КПД, % при P2/P2ном, %					cos(phi), при P2/P2ном, %					Xm	В номінальному режимі				При К.З.			
					25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R1`	X1`	R2``	X2``	R``2п	R к.п.		X к.п.
Синхронна частота обертання 1000 об/хв.																							
4AA63A6Y3	0.18	0.74	195	7.6	34.5	49.5	56.0	56.0	52.0	0.25	0.38	0.51	0.62	0.71	1.3	0.240	0.150	0.220	0.18	0.220	0.460	0.30	0.0018
4AA63B1Y4	0.25	0.71	196	6.4	39.5	54.0	59.0	59.0	55.0	0.24	0.38	0.51	0.62	0.70	1.4	0.180	0.130	0.210	0.19	0.210	0.400	0.28	0.0022
4A71A6Y3	0.37	0.82	206	6.9	45.5	59.5	64.5	64.5	61.0	0.30	0.45	0.58	0.69	0.76	1.3	0.170	0.120	0.150	0.16	0.150	0.320	0.24	0.0027
4AA71B6Y3	0.55	0.80	213	7.5	52.5	65.5	68.5	67.5	62.5	0.30	0.47	0.60	0.71	0.77	1.4	0.160	0.110	0.150	0.17	0.150	0.310	0.24	0.003
4A80A6Y3	0.75	0.84	227	7.8	56.0	68.0	69.5	69.0	63.5	0.33	0.51	0.65	0.74	0.79	1.5	0.160	0.120	0.120	0.20	0.120	0.280	0.25	0.0031
4A80B6Y3	1.10	0.80	223	7.3	53.0	73.5	75.0	74.0	69.0	0.33	0.52	0.65	0.74	0.78	1.6	0.120	0.110	0.110	0.19	0.110	0.230	0.24	0.0046
4A90L6Y3	1.50	0.85	223	7.1	65.5	75.0	76.0	75.0	71.0	0.33	0.53	0.66	0.74	0.77	1.8	0.110	0.110	0.088	0.21	0.093	0.2	0.23	0.0073
4A100L6Y3	2.20	0.81	231	6.3	74.0	81.5	82.0	81.0	78.0	0.32	0.53	0.66	0.73	0.76	1.9	0.090	0.110	0.067	0.21	0.073	0.160	0.22	0.013
4A112MA6Y3	3.00	0.89	248	6.9	73.0	81.0	82.0	81.0	78.5	0.33	0.56	0.69	0.76	0.79	1.9	0.085	0.074	0.063	0.10	0.069	0.160	0.14	0.017
4A112MB6Y3	4.00	0.87	262	7.1	77.0	82.5	83.0	82.0	79.5	0.40	0.62	0.74	0.81	0.83	2.0	0.077	0.073	0.062	0.11	0.068	0.150	0.14	0.021
4A132S6Y3	5.50	0.90	258	7.0	71.0	81.0	84.0	85.0	83.0	0.33	0.56	0.69	0.80	0.84	1.9	0.067	0.072	0.041	0.11	0.050	0.120	0.14	0.04
4A132M6Y3	7.50	0.87	256	6.9	76.0	84.0	85.0	85.5	84.0	0.40	0.62	0.74	0.81	0.84	2.1	0.060	0.070	0.040	0.11	0.050	0.110	0.14	0.058
4A160S6Y3	11	0.75	293	6.9	83.5	87.5	87.5	86.0	83.5	0.54	0.75	0.83	0.86	0.87	3.0	0.073	0.110	0.030	0.15	0.047	0.120	0.18	0.14
4A160M6Y3	15	0.74	292	6.9	85.0	88.5	88.5	87.5	85.0	0.55	0.76	0.84	0.87	0.87	3.0	0.062	0.1	0.028	0.16	0.045	0.110	0.19	0.18
4A180M6Y3	18.5	0.82	377	6.3	85.0	89.0	89.0	88.0	86.0	0.54	0.76	0.84	0.87	0.87	2.9	0.056	0.110	0.026	0.13	0.046	0.1	0.18	0.22
4A200M6Y3	22	0.70	350	5.5	87.5	91.0	91.0	90.0	88.0	0.68	0.84	0.88	0.90	0.90	4.1	0.050	0.110	0.024	0.14	0.042	0.092	0.17	0.4
4A200L6Y3	30	0.77	375	6.0	88.0	91.0	91.0	90.5	89.0	0.64	0.82	0.88	0.90	0.90	3.7	0.046	0.120	0.022	0.13	0.040	0.085	0.16	0.45
4A225M6Y3	37	0.78	369	5.7	87.5	91.0	91.5	91.0	89.5	0.63	0.81	0.87	0.89	0.89	3.7	0.042	0.1	0.019	0.13	0.035	0.078	0.16	0.74
4A250S6Y3	45	0.76	356	5.1	87.5	91.0	91.5	91.5	90.5	0.64	0.82	0.87	0.89	0.89	3.8	0.037	0.090	0.015	0.14	0.032	0.069	0.16	1.2
4A250M6Y3	55	0.82	364	5.5	88.0	91.0	91.5	91.5	90.5	0.60	0.80	0.86	0.89	0.89	3.4	0.034	0.083	0.014	0.13	0.030	0.064	0.15	1.3
4A280S6Y3	75	0.79	401	4.6	90.0	92.5	92.5	92.0	90.0	0.70	0.85	0.88	0.89	0.88	3.7	0.032	0.120	0.021	0.13	0.046	0.079	0.20	2.9
4A280M6Y3	90	0.81	393	5	90	93	93	92.5	91	0.67	0.83	0.87	0.89	0.88	3.5	0.03	0.11	0.019	0.12	0.043	0.074	0.19	3.4
4A315S6Y3	110	0.81	391	4.7	91	93	93.5	93	92	0.68	0.84	0.88	0.9	0.89	3.9	0.026	0.1	0.018	0.12	0.042	0.068	0.17	0
4A315M6Y3	132	0.81	398	4.6	91.5	93.5	94	93.5	92.5	0.68	0.84	0.88	0.9	0.89	3.5	0.023	0.099	0.018	0.12	0.042	0.065	0.16	4.5
4A355S6Y3	160	0.8	420	4.1	91.5	93.5	94	93.5	92.5	0.73	0.86	0.89	0.9	0.89	3.8	0.02	0.1	0.015	0.14	0.043	0.063	0.17	7.3
4A355M6Y3	200	0.81	410	4.1	92	94	94	94	93	0.72	0.86	0.89	0.9	0.89	3.6	0.018	0.091	0.014	0.13	0.041	0.058	0.15	8.8

Таблиця А.4 – Довідкові дані АД з синхронною частотою 750 об/хв

Типорозмір електродвигуна	P2ном, кВт	Електромагнітні навантаження			Енергетичні показники										Параметри схеми заміщення у відносних одиницях							J, кгм^2	
		В, Тл	А, А/см	J, А/мм^2	КПД, % при P2/P2ном, %					cos(phi), при P2/P2ном, %					Xm	В номінальному режимі				При К.З.			
					25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R1`	X1`	R2``	X2``	R``2п	R к.п.		X к.п.
Синхронна частота обертання 750 об/хв.																							
4A71B8Y3	0.25	0.69	211	7.2	36.5	51.5	56.5	56	45	0.29	0.42	0.55	0.65	0.75	1.2	0.22	0.18	0.23	0.28	0.23	0.45	0.43	0.0019
4A80A8Y3	0.37	0.71	201	6.8	42.5	57	61.5	61.5	56.5	0.28	0.42	0.55	0.65	0.72	1.3	0.19	0.16	0.16	0.29	0.16	0.35	0.4	0.0034
4A80B8Y3	0.55	0.75	210	7.3	46	60	64.5	64	59	0.28	0.42	0.55	0.65	0.71	1.3	0.17	0.16	0.15	0.29	0.16	0.33	0.38	0.0041
4A90LA8Y3	0.75	0.81	209	7	49	63	68	68	65.5	0.26	0.4	0.52	0.62	0.68	1.3	0.14	0.15	0.11	0.29	0.12	0.26	0.35	0.0067
4A90LB8Y3	1.1	0.81	225	7.3	55	67.5	70.5	70	66	0.3	0.46	0.59	0.68	0.73	1.4	0.13	0.15	0.11	0.3	0.12	0.24	0.35	0.0086
4A100L8Y3	1.5	0.87	248	6.4	62	73	75	74	70	0.26	0.44	0.57	0.65	0.69	1.5	0.11	0.16	0.093	0.32	0.1	0.21	0.35	0.013
4A112MA8Y3	2.2	0.91	263	6.9	64	74.5	76.5	76.5	74	0.3	0.48	0.62	0.71	0.76	1.56	0.093	0.11	0.083	0.17	0.004	0.19	0.22	0.017
4A112MB8Y3	3	0.88	271	6.7	69.5	78	79.5	79.5	76.5	0.33	0.52	0.66	0.74	0.78	1.6	0.08	0.11	0.083	0.17	0.091	0.17	0.21	0.025
4A132S8Y3	4	0.96	257	6.9	71	80	83	83	81	0.27	0.46	0.59	0.7	0.73	1.6	0.068	0.1	0.058	0.17	0.069	0.14	0.21	0.042
4A132M8Y3	5.5	0.88	263	7.1	74.5	82	83.5	83	80.5	0.32	0.52	0.65	0.74	0.76	1.8	0.07	0.11	0.061	0.19	0.073	0.14	0.23	0.057
4A160S8Y3	7.5	0.78	274	6.3	79.5	86	85.5	86	84	0.35	0.57	0.69	0.75	0.77	2	0.075	0.14	0.032	0.18	0.053	0.13	0.2	0.14
4A160M8Y3	11	0.79	284	6.7	81	87	87.5	87	85	0.35	0.57	0.69	0.75	0.77	2	0.066	0.13	0.031	0.18	0.053	0.12	0.19	0.18
4A180M8Y3	15	0.81	378	6.4	82.5	87.5	88	87	84.5	0.46	0.68	0.78	0.82	0.83	2.4	0.064	0.13	0.03	0.17	0.057	0.12	0.22	0.25
4A200M8Y3	18.5	0.79	379	6.1	85.5	89.5	89.5	88.5	86.5	0.5	0.71	0.8	0.84	0.84	2.6	0.057	0.13	0.026	0.16	0.049	0.11	0.19	0.4
4A200L8Y3	22	0.75	404	6.7	87.5	90	90	88.5	88.5	0.54	0.75	0.82	0.84	0.84	3.1	0.062	0.14	0.029	0.18	0.055	0.12	0.21	0.45
4A225M8Y3	30	0.87	397	5.8	85	90	90.5	90.5	88.5	0.44	0.66	0.76	0.81	0.82	2.3	0.045	0.12	0.022	0.17	0.044	0.09	0.19	0.74
4A250S8Y3	37	0.81	395	5.9	86.5	90.5	90	90	88.5	0.5	0.72	0.8	0.83	0.83	2.8	0.047	0.11	0.017	0.18	0.042	0.088	0.2	1.2
4A250M8Y3	45	0.83	382	5.4	87	90.5	91.0	91	90	0.49	0.71	0.8	0.84	0.84	2.6	0.037	0.99	0.016	0.17	0.038	0.075	0.18	1.4
4A280S8Y3	55	0.83	385	4.3	90	92.5	92.5	92	90	0.57	0.76	0.81	0.84	0.82	2.5	0.035	0.12	0.022	0.14	0.047	0.082	0.22	3.2
4A280M8Y3	75	0.82	387	4	90.5	93	93	92.5	91	0.58	0.77	0.82	0.85	0.84	2.6	0.028	0.12	0.021	0.13	0.046	0.074	0.19	4.1
4A315S8Y3	90	0.79	360	3.8	93	93.5	93.5	93	91.5	0.57	0.76	0.82	0.85	0.84	2.6	0.023	0.11	0.019	0.13	0.043	0.066	0.18	4.9
4A315M8Y3	110	0.83	376	4.2	91	93	93.5	93	92	0.56	0.75	0.82	0.85	0.84	2.4	0.023	0.1	0.019	0.12	0.043	0.066	0.17	5.8
4A355S8Y3	132	0.82	399	4.3	91.5	94	94	93.5	86	0.6	0.78	0.83	0.85	0.84	2.9	0.023	0.12	0.017	0.16	0.051	0.074	0.2	9
4A355M8Y3	160	0.83	414	4	92	94	94	93.5	92	0.61	0.79	0.83	0.85	0.83	3	0.02	0.12	0.017	0.16	0.052	0.072	0.2	10

Таблиця А.5 – Довідкові дані АД з синхронною частотою 600 об/хв і 500 об/хв

Типорозмір електродвигуна	P2ном, кВт	Електромагнітні навантаження			Енергетичні показники										Параметри схеми заміщення у відносних одиницях							J, кгм^2	
		В, Тл	А, А/см	J, А/мм^2	КПД, % при P2/P2ном, %					cos(phi), при P2/P2ном, %					Xm	В номінальному режимі				При К.З.			
					25	50	75	100	125	25	50	75	100	125		R1`	X1`	R2``	X2``	R``2п	R к.п.		X к.п.
Синхронна частота обертання 600 об/хв.																							
4A250S10Y3	30	0.82	407	6.7	84.5	88.5	88.5	88	86	0.43	0.66	0.76	0.81	0.82	2.3	0.056	0.11	0.023	0.17	0.053	0.11	0.22	1.4
4A280S10Y3	37	0.78	362	3.8	86.5	90.5	91	91	89.5	0.44	0.65	0.73	0.78	0.77	2	0.031	0.11	0.027	0.15	0.051	0.082	0.2	3.6
4A280M10Y3	45	0.78	411	4.6	87	92	92	91.5	89.5	0.47	0.68	0.74	0.78	0.77	2.2	0.037	0.12	0.031	0.16	0.057	0.093	0.22	3.8
4A315S10Y3	55	0.77	362	3.8	88.5	92	92	92	91	0.49	0.69	0.76	0.79	0.79	2	0.028	0.1	0.026	0.14	0.048	0.076	0.19	5.2
4A315M10Y3	75	0.77	398	4.4	89.5	92.5	92.5	92	90.5	0.52	0.71	0.78	0.8	0.8	2.2	0.029	0.11	0.027	0.15	0.052	0.081	0.2	6.2
4A355S10Y3	90	0.74	407	4.4	91	93	93	92.5	90.5	0.6	0.77	0.81	0.83	0.8	3.1	0.028	0.12	0.021	0.16	0.053	0.081	0.21	9.3
4A355M10Y3	110	0.76	385	4.3	91	93.5	93.5	93.5	91.5	0.56	0.74	0.8	0.83	0.81	3	0.024	0.11	0.021	0.16	0.051	0.075	0.2	11
Синхронна частота обертання 500 об/хв.																							
4A315S12Y3	45	0.75	384	4.2	87.5	91	91	90	89	0.43	0.64	0.72	0.75	0.75	2.1	0.037	0.14	0.033	0.19	0.065	0.1	0.26	5.3
4A315M12Y3	55	0.76	379	4.1	88	91	91.5	91	89.5	0.42	0.63	0.71	0.75	0.75	2	0.033	0.13	0.032	0.19	0.062	0.1	0.24	6.2
4A355S12Y3	75	0.86	382	4	88	91.5	91.5	92	90.5	0.41	0.62	0.71	0.76	0.75	1.9	0.026	0.12	0.021	0.17	0.053	0.08	0.21	9.3
4A355M12Y3	90	0.88	372	4	88	91.5	92	92	91	0.4	0.61	0.71	0.76	0.76	1.8	0.024	0.11	0.02	0.16	0.051	0.08	0.2	10

Таблиця А.6 – Варіанти завдань АД

№ варіанту	Двигун	№ варіанту	Двигун	№ варіанту	Двигун	№ варіанту	Двигун
1	4A250S10Y3	8	4A280S10Y3	15	4A280M10Y3	22	4A315M12Y3
2	4A112MA8Y3	9	4A112MB8Y3	16	4A225M8Y3	23	4A250M8Y3
3	4A80B8Y3	10	4A280S6Y3	17	4A112MB6Y3	24	4AA71B6Y3
4	4AA63A4Y3	11	4A100L4Y3	18	4A315S4Y3	25	4A200L4Y3
5	4AA50B6Y3	12	4A355S2Y3	19	4A180S2Y3	26	4A80A2Y3
6	4AA56B2Y3	13	4AA50B2Y3	20	4A355M2Y3	27	4A280S4Y3
7	4A355M8Y3	14	4A112MA6Y3	21	4A355M12Y3	28	4A90LA8Y3

Таблиця А.7 – Довідкові дані СДПМ SyMAX

Номинальна потужність (кВт)	Номинальний момент (Нм)	Номинальний струм (А)	ККД	Лінійна проти-ЕРС (В)	Активний опір статора (Ом)	Індуктивність за віссю d (мГн)	Індуктивність за віссю q (мГн)	Момент інерції (кгм ²)
Двигуни з кількістю пар полюсів $p_n = 3$, частота напруги $f = 90$ Гц								
0.67	2	0.9	83.5	262	11.4	65.2	152.8	0.00093
1.01	3	1.3	85.8	284	6.3	50.0	106.8	0.00135
1.34	4	1.8	85.3	274	3.7	35.2	75.2	0.00181
2.01	6	2.7	86.1	274	1.8	19.8	46.0	0.00274
2.68	8	3.2	86.5	306	1.8	20.0	48.0	0.00353
Двигуни з кількістю пар полюсів $p_n = 5$, частота напруги $f = 150$ Гц								
4.02	12	3.8	91.7	403	1.7	34.6	44.1	0.008
6.71	20	6.4	91.7	409	0.9	22.9	30.1	0.011
10.06	30	9.4	93.0	403	0.4	10.5	12.9	0.023
13.41	40	11.8	93.6	443	0.7	9.0	11.1	0.029
Двигуни з кількістю пар полюсів $p_n = 4$, частота напруги $f = 120$ Гц								
20.12	59	18.5	94.5	404	0.23	10.2	16.7	0.16
26.82	79	22.9	95.0	400	0.21	6.6	11.0	0.20
33.53	99	28.1	95.0	404	0.10	6.1	9.8	0.24
40.23	119	33.7	95.4	387	0.06	4.8	7.7	0.27
53.64	158	45.5	95.4	395	0.06	4.4	7.0	0.30

Додаткові параметри двигунів цієї серії:

1. Дані надано для режиму живлення від мережі/інвертора ~460 В.
2. Номінальна швидкість двигунів – 1800 об/хв.
3. Максимальна швидкість (в режимі ослаблення поля) – 2160 об/хв.
4. Мінімальна швидкість режиму підтримання постійного номінального моменту – 90 об/хв.

Таблиця А.8 – Варіанти завдань СДПМ

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7
Розрахунковий час розгону до синхронної швидкості t_a , с	0.348	0.321	0.305	0.290	0.241	0.096	0.094
Неприведений момент інерції механізму J_m , кгм ²	1650	2020	2400	2750	3050	228	295

Таблиця А.9 – Варіанти завдань СДПМ – Продовження

№ варіанту	8	9	10	11	12	13	14
<u>Розрахунковий</u> час розгону до синхронної швидкості t_a , с	0.084	0.072	0.059	0.057	0.057	0.057	0.055
Неприведений момент інерції механізму J_m , кгм ²	80	114	10	18	14	27	35

Таблиця А.10 – Варіанти щодо вибору механізму

№ з/п	Механізм	№ з/п	Механізм
1	Промисловий вентилятор	11	ШПУ
2	Конвеєр	12	Електровелосипед
3	Екструдер	13	Механізм повороту крану
4	Димосос	14	Травалатор
5	Легкий ЕТЗ	15	Механізм підйому крану
6	Електросамокат	16	Ланка роботи-маніпулятора
7	Офісний ліфт	17	Тролейбус
8	Ліфт житлового будинку	18	Електробус
9	Трамвай	19	ЕТЗ (потужність >30 кВт)
10	Привід подачі	20	Електролітак (потужність >100 кВт)

ДОДАТОК Б. Вимоги до оформлення курсового проекту

Вимоги синтезовано на основі ДСТУ 3008:2015 і загальних вимог до оформлення наукових робіт МОН. Курсовий проект друкується на окремих листах формату А4 і підшивається у папку або жорстко скріплюється.

Проект складається з наступних елементів:

- **Титульний аркуш;**
- **Зміст** (перелік усіх пунктів проекту зі вказаними сторінками);
- **Завдання** до курсового проекту (відповідно до варіанту);
- **Вступ** (формулюються актуальність роботи та її основні цілі);
- **Основна частина** (розрахунок параметрів двигуна, вибір елементів перетворювача частоти, дослідження електромеханічної системи засобами моделювання з наведенням усіх проміжних розв'язків та необхідних пояснень);
- **Висновки** (які результати досягнуто, можливості їхнього використання у сучасних електромеханічних системах автоматизації);
- **Список використаної літератури.**

Текст роботи повинен бути набраний за такими вимогами: **шрифт** – Times New Roman, розмір – 14; **інтервал** – 1,5; **відступ першої строки** – 1,25; **вирівнювання** – по ширині тексту. Кожен розділ повинен починатися з нової сторінки, назва розділу – жирним, 14 шрифт, всі прописні. Після назви необхідно зробити один відступ.

Рисунки необхідно вставляти за допомогою Вставка→Об'єкт→Рисунок Microsoft Word та вирівнювати по центру. Дозволяється вставляти рисунки напряму з Microsoft Visio шляхом експорту. Такі рисунки повинні відкриватися для редагування, а не бути картинками. Розташовувати рисунки потрібно відразу після посилання на них з підписом та назвою. **Таблиці** підписуються зверху з відступом 1,25. Після таблиці необхідно зробити один відступ.

Всі формули необхідно подавати у редакторі MathType 5.2 і вище 14-м шрифтом. Вирівнювати формули необхідно по середині сторінки.

Сторінки нумеруються справа зверху. Перша сторінка не нумерується, але враховується як перша. Сторінка реферату нумерується у власній формі.