

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) С. М. Пересада
(ініціали, прізвище)

“ ____ ” червня 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка» по спеціалізації «Електромеханічні системи автоматизації та
електропривод»
(код і назва)

на тему: Автоматизація газорозподільної станції

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕПг-61-2
(шифр групи)

Паламарчук Микола Юрійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник ас. Желінський Микола Миколайович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент ас. Монахов Євген Андрійович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	141.61206.005.БР	Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	141.61206.005.БР	Пояснювальна записка	74	
3	A1	141.61206.005.БР	Структурна схема алгоритму прямого векторного керування положенням	1	
4	A1	141.61206.005.БР	Функціональна схема процесу	1	
5	A1	141.61206.005.БР	Графіки перехідних процесів	1	
6	A1	141.61206.005.БР	Схема електрична принципова	1	

				141.61206.005.БР		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Паламарчук М.Ю.			Відомість дипломного проекту	Лист	Листів
Керівн.	Желінський М.М.				2	74
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -г61-2	
Н/контр.	Приймак Б.І.					
Зав.каф.	Пересада С.М.					

**Пояснювальна записка
до дипломного проекту**

на тему: Автоматизація газорозподільної станції

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

(повна назва)

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва)

Спеціалізація – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ С. М. Пересада
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» червня 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Паламарчук Микола Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація газорозподільної станції

керівник проекту Желінський Микола Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту 10.06.19

3. Вихідні дані до проекту: параметри газопроводу: $P_{вх} = 5,4 \text{ МПа}$, $P_{вих} = 1,2 \text{ МПа}$, $D_y = 500 \text{ мм}$.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. 1. Аналітичний огляд. 2. Визначення потужності двигуна. 3. Обґрунтування вибору обладнання. 4. Синтез алгоритму керування положенням АД. 4. Синтез алгоритму керування положенням. 5. Дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи методом математичного моделювання. Висновки. Список використаних джерел. Додатки. 5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Структурна схема алгоритму прямого векторного керування положенням. Функціональна схема процесу. Схема електрична принципова. Графіки перехідних процесів.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 4.04.19

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналітичний огляд	14.04.19	
2	Визначення потужності двигуна та обґрунтування вибору обладнання	30.04.19	
3	Математичне моделювання та синтез алгоритмів керування	10.05.19	
4	Розробка графічної частини	20.05.19	
5	Дослідження динамічних режимів електромеханічної системи	31.05.19	
6	Оформлення роботи та підготовка до захисту	7.06.19	

Студент

(підпис)М.Ю. Паламарчук
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)М.М. Желінський
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 74, рисунків – 23, таблиць – 11 та графічну частину на 4 листах А1.

Актуальність теми дослідження зумовлене необхідністю пошуку нових методів регулювання тиску газу у вузлах редукування газорозподільних станцій в умовах модернізації застарілого обладнання, з метою забезпечення більш високої швидкодії та точності відпрацювання.

Метою бакалаврської роботи є впровадження засобів автоматизації регулювання тиску, шляхом встановлення у вузол редукування газу електроприводу для запірно-регулювальної арматури, що дозволяє отримати високу швидкодію, великий діапазон регулювання і більшу точність відпрацювання.

Об'єктом дослідження є асинхронний двигун, що застосовується в якості електроприводу засувки у вузлі редукування тиску газу.

Практичне значення одержаних результатів. Методом математичного моделювання досліджено перехідні процеси електромеханічної системи. З отриманих результатів видно що, система асимптотично відпрацьовує задану траєкторію кутового положення. Це означає, що даний підхід до регулювання тиску в трубопроводі шляхом керування кутовим положенням електроприводу засувки є доцільним для використання у вузлах редукування газорозподільних станцій.

РЕДУКУВАННЯ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОПРИВОД, СПОСТЕРІГАЧ, ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ, КУТОВЕ ПОЛОЖЕННЯ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СИНТЕЗ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕС

					141.61206.023.БР		
Зм.	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата	<i>Автоматизація газорозподільної станції Реферат</i>		
Розроб		Паламарчук М.					
Перевір		Желінський М.					
Н. Контр.		Приймак Б.І.					
Затв.		Пересада С.М.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						6	74
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -з61-2		

SUMMARY

The diploma project comprises: 74 pages, 23 figures, 11 tables and graphical part on 4 pages A1.

The relevance of the research topic is due to the need to find new methods for regulating gas pressure in the nodes of the reduction of gas distribution stations in the context of modernizing outdated equipment, in order to ensure higher productivity and accuracy of testing.

The aim of the work is to synthesize an algorithm for controlling the angular position and flux linkage of an induction motor, which is installed on the shut-off and control valves in the pipeline of the gas reduction unit.

The object of the study is an asynchronous motor used as a valve actuator in the gas pressure reduction unit.

The practical significance of the results. The transient processes of the electromechanical system are investigated by the method of mathematical modeling. From the obtained results it can be seen that the system asymptotically fulfills the specified trajectory of the angular position. This means that this approach to regulating the pressure in the pipeline by controlling the angular position of the electric drive of the valve is expedient for use in the nodes of reduction of gas distribution stations.

REDUCTION, INDUCTION MOTOR, ELECTRIC DRIVE, OBSERVER, FLUX ORIENTED CONTROL, ANGULAR POSITION, MATHEMATICAL MODELING, SYNTHESIS, TRANSIENTS

					141.61206.023.BW							
	Letter	№ of doc.	Sign.	Date								
Devel.	M. Palamarchuk				Automation of the gas distribution station Summary				L.	Page	Pages	
Checked	M. Zhelinskiyi										7	74
N. Contr.	B. Pryimak											
Approved	S. Peresada								NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA			

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	10
ВСТУП.....	12
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	14
1.1 Огляд електроприводів засувки.....	17
1.2 Вибір параметрів, які підлягають автоматичному контролю і регулюванню	19
1.3 Формулювання вимог до електроприводу	20
Висновки до розділу 1.....	20
2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА	22
2.1 Обґрунтування вибору потужності двигуна та його розрахунок	22
2.1.1 Визначення зусилля клину затвора	23
2.1.2 Визначення зусиль ущільнення	24
2.1.3 Розрахунок зусиль для переміщення клину і максимального зусилля вздовж шпинделя.....	25
2.1.4 Розрахунок обертового моменту на ходовій гайці	28
2.1.5 Вибір електроприводу.....	29
2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна ...	33
2.2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна	33
2.2.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення	35
Висновки до розділу 2.....	38
3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ.....	39
3.1 Вибір частотного перетворювача та дроселю.....	39
3.2 Вибір автоматичного вимикача	43
3.3 Вибір контакторів, реле, редукторів та енкодерів	44

3.4 Вибір датчиків тиску	46
Висновки до розділу 3.....	48
4 СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ	49
4.1 Постановка задачі.....	49
4.2 Розробка системи векторного керування	51
Висновки до розділу 4.....	64
5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХА- НІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	65
Висновки до розділу 5.....	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
ДОДАТОК А. Matlab файл для розрахунку параметрів двигуна	73

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$(a-b)$ – позначення стаціонарної системи координат, пов’язаної зі статором асинхронного двигуна;

$(d-q)$ – позначення системи координат, що синхронно обертається;

ε_0 – кутове положення синхронної системи координат $(d-q)$ відносно нерухомої системи координат $(a-b)$;

ω_0 – кутова швидкість обертання системи координат $(d-q)$;

ω_2 – кутова швидкість ковзання;

ω – кутова швидкість ротора;

ω^* – задана швидкість ротора;

$\tilde{\omega}$ – похибка відпрацювання кутової швидкості;

θ – кутове положення ротора;

θ^* – задане кутове положення ротора;

$\dot{\theta}^*$ – перша похідна від заданого кутового положення ротора;

$\ddot{\theta}^*$ – друга похідна від заданого кутового положення ротора;

$\ddot{\theta}^{**}$ – третя похідна від заданого кутового положення ротора;

$\tilde{\theta}$ – похибка відпрацювання кутового положення;

M – електромагнітний момент асинхронного двигуна;

M^* – заданий момент двигуна;

$\tilde{M}$ – похибка відпрацювання електромагнітного моменту;

M_c – момент навантаження;

$|\psi|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора;

$|\hat{\psi}|$ – оцінене значення модуля вектора потокозчеплення ротора;

ψ^* – задане значення модуля вектора потокозчеплення ротора;

$\tilde{\psi}$ – похибка відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора;

i_1 – вектор струму статора;

i_2 – вектор струму ротора;

u_1 – вектор напруги статора;

I_1 – модуль струму статора;

I_2 – модуль струму ротора;

i_a, i_b – компоненти вектора струму статора в системі координат (a – b);

i_d, i_q – компоненти вектора струму статора в системі координат (d – q);

u_a, u_b – компоненти вектора напруги статора в системі координат (a – b);

u_d, u_q – компоненти вектора напруги статора в системі координат (d – q);

ψ_a, ψ_b – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі координат (a – b);

ψ_d, ψ_q – компоненти вектора потокозчеплення ротора в системі координат (d – q);

R_1 – активний опір статора;

R_2 – активний опір ротора; L_1 – індуктивність статора;

L_2 – індуктивність ротора;

L_m – індуктивність контуру намагнічування;

J – момент інерції;

АД – асинхронний двигун;

ГРС – газорозподільна станція;

ГОСТ – державний стандарт;

ЕМ – електрична машина;

ЕП – електропривод;

ПЧ – перетворювач частоти;

IFOC – непряме векторне керування;

DFOC – пряме векторне керування.

ВСТУП

Природний газ – суміш газів, що утворилася в надрах землі при анаеробному розкладанні органічних речовин та при конденсації у пастках еманаций з верхньої мантії. Як правило, це суміш газоподібних вуглеводнів (метану, етану, пропану, бутану тощо), що утворюється в земній корі та широко використовується як високоекономічне паливо на електростанціях, у чорній та кольоровій металургії, цементній та скляній промисловості, у процесі виробництва будматеріалів та для комунально–побутових потреб, а також як сировина для отримання багатьох органічних сполук.

Перш ніж газ спалахне блакитним полум'ям на кухонній плиті, він проходить тисячі кілометрів по трубах. Природний газ, що нагнітається компресорними станціями до певних значень тиску прямує по магістральному газопроводу до газорозподільної станції. Високий тиск в газових магістралях (5,4 – 7,4 МПа) абсолютно не підходить для побутового споживання [1]. Тому одне з основних призначень газорозподільних станцій (ГРС) – зниження цього параметра до необхідного значення.

Вузол редукування призначений для зниження високого вхідного тиску газу з магістрального газопроводу до вихідного тиску в мережу газопроводу низького тиску і автоматичної підтримки заданого тиску на виході з вузла редукування, а також для захисту газопроводу споживача від неприпустимого підвищення тиску.

Для зменшення впливу людського фактору, пов'язаного з неправильною експлуатацією складного технологічного обладнання, що застосовується у вузлах редукування ГРС, необхідним є впровадження засобів автоматизації. Рациональне використання і скорочення втрат природного газу при використанні засобів автоматизації є дуже актуальною задачею, так як на досі працюючих ГРС, що були введені в експлуатацію кілька десятиліть тому, де використовуються морально і фізично застарілі прилади, в тому числі і у вузлах редукування газу.

Метою бакалаврської роботи є впровадження засобів автоматизації регулювання тиску, шляхом встановлення у вузол редукування газу

електроприводу для запірно–регулювальної арматури, що дозволяє отримати високу швидкодію, великий діапазон регулювання і більшу точність відпрацювання.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Газорозподільні станції (ГРС) (рис. 1.1) призначені для подачі газу населеним пунктам, промисловим підприємствам із заданим тиском і необхідним ступенем очищення й одоризації. На ГРС високий тиск газу знижується, і він зниженим тиском надходить у розподільні мережі та газорозподільні пункти споживачів [2].



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд газорозподільної станції

ГРС призначена для:

- прийому газу з магістральних газопроводів;
- очищення його від різних механічних домішок;
- пониження тиску до значень, необхідних в міських системах;
- підтримання тиску на постійному рівні;
- одоризації та підігріву газу;
- визначення його витрати.

Загальна структурна схема ГРС [3] з двома споживачами наведена на рис.

1.2.

у схемах вузла редукування застосовують сталеву запірно–регулювальну арматуру (засувку) на умовний тиск 6,3 МПа [4].

Функціональна схема вузла редукування з основою та резервною лінією зображені на рис. 1.3.

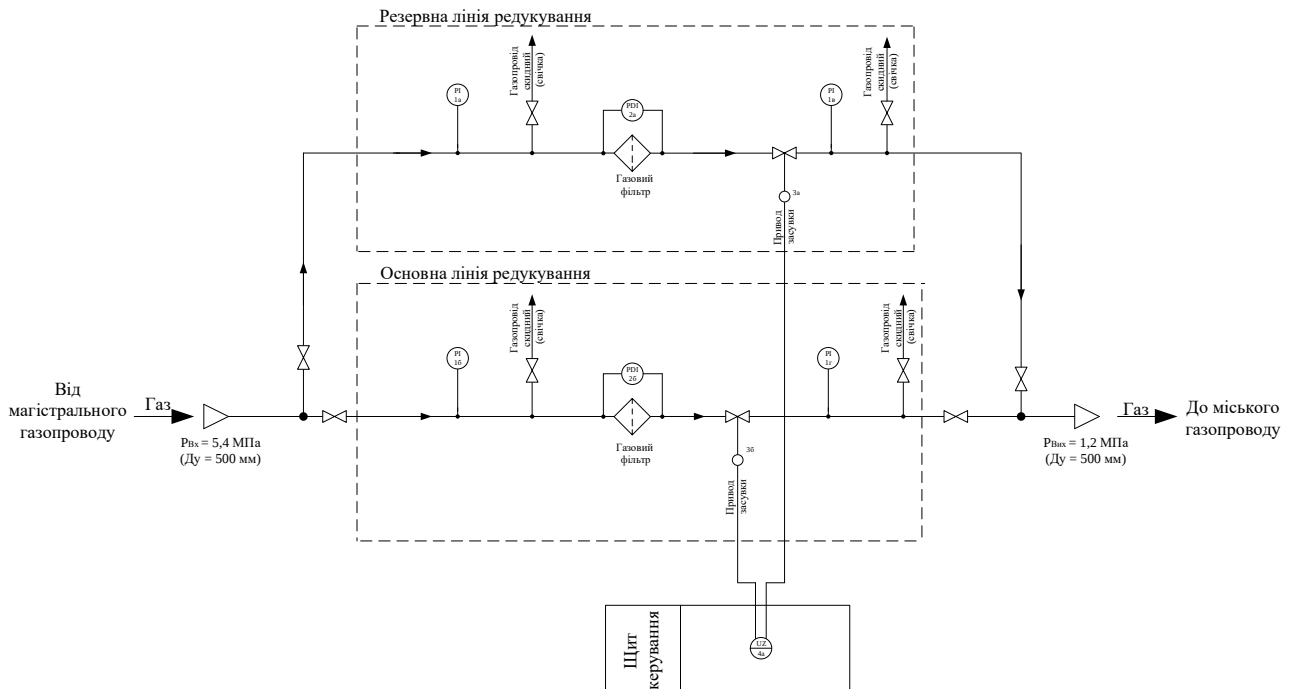


Рисунок 1.3 – Функціональна схема вузла редукування

Засувкою називається конструкція, у якій замикаючий елемент виконаний у вигляді клину або диска, який переміщається уздовж кілець ущільнювачів сідла корпусу перпендикулярно потоку робочого середовища, тим самим або перекриваючи потік в закритому положенні, або пропускаючи його в відкритому положенні. Засувки отримали широке застосування на різних трубопроводах. Діаметри трубопроводів, на які встановлюються засувки, змінюються в діапазоні від 50 мм до 2000 мм [3], діапазон робочих тисків від 0,4 до 25 МПа, а робоча температура від -60 до 56 градусів Цельсія.

Засувки мають наступні переваги: високий ступінь герметичності затвора в закритому стані, простота конструкції і малий гідравлічний опір (в порівнянні вентиллями), можливість подачі робочого середовища в будь–якому напрямку, можливість застосування в широкому діапазоні робочих середовищ, тисків, температур і інших умов експлуатації.

Для управління засувкою використовуються пневматичні, гідравлічні або електричні приводи [5].

1.1 Огляд електроприводів засувок

У системах з малим тиском і діаметром труб використовується арматура з ручним приводом, для управління якої не потрібно значних фізичних зусиль. Зі збільшенням тиску і перетину трубопроводу збільшується і розмір арматури, тому для автоматизованого або механізованого управління штоком засувки застосовують різні види приводів. До них відносяться пневматичні, гідравлічні і електричні [6].

Найбільшого поширення набули електричні приводи завдяки своїм наступним перевагам у порівнянні з іншими типами. Вони мають кращі масогабаритні показники, велику ремонтпридатність, що пов'язана з легким процесом зняття приводу з діючої арматури для її заміни або ремонту, при цьому відсутня небезпека мимовільного спрацювання робочого елемента, а також мають меншу кількість елементів для ремонту. Для роботи використовується електрична мережа, яка не засмічується і не замерзає в порівнянні з гідравлічними і пневматичними, а також є можливість дистанційного автоматичного управління будь-яким типом арматури, високий ККД роботи системи, володіє практично необмеженим діапазоном потужностей і моментів.

Електроприводи класифікують за такими ознаками [6]:

1. По виду переміщення і його величиною приводу класифікують наступним чином:

- прямоходові, використовуються для клапанів;
- неповноповоротні, у яких запираючий елемент повертається на $1/4$ обороту, застосовується для кульових кранів або поворотних дискових затворів;
- багатооборотні – у даного типу приводів робочий елемент робить обертовий рух (наприклад, шток), вони встановлюються на всіх типах засувки.

2. За вимогами вибухобезпеки – вибухозахищені або в нормальному виконанні.

3. За способом завершення роботи в кінцевому положенні:

- Привід з кінцевими вимикачами.
- З муфтою обмеження крутного моменту.
- З електричним реле обмеження сили струму.
- Комбінований спосіб із застосуванням кінцевих вимикачів і реле.
- У сучасних електроприводах використовується програмне обчислювання координати по сигналах з датчика положення (абсолютного енкодера), а також програмне обчислення моменту по відомим струмам і напругам, також контроль моменту може здійснюватися за допомогою тензометричних датчиків [7].

4. В залежності від керуючого пристрою електроприводи класифікуються на наступні класи:

- Не автоматизовані електроприводи, управління якими здійснюється за допомогою реверсивних магнітних пускачів.
- Привід з інтелектуальним реле управління і зовнішнім комутаційним пристроєм.
- Привід з реверсивним пристроєм плавного пуску, який реалізується на основі тиристорів (тиристорний регулятор напруги).
- Привід з перетворювачем частоти, в якому використовується скалярне або векторне управління.

На даний момент найбільшого поширення набули регульовані інтелектуальні електроприводи на основі тиристорних регуляторів напруги (ТРН) і перетворювачів частоти (ПЧ).

Переваги систем на базі ПЧ в порівнянні з ТРН полягають в тому, що існує можливість оптимізації технологічного процесу шляхом плавного регулювання частоти обертання двигуна, можливість плавного пуску двигуна та ін. Однак до недоліків ПЧ у порівнянні з ТРН можна віднести високу вартість даного пристрою.

Електропривод перетворює електричну енергію в крутний момент, створюваний на валу двигуна, що призводить до пересування елементів арматури. Для передачі крутного моменту служить редуктор з великим

передавальним відношенням, що дозволяє знизити швидкість обертання і підвищити момент, що прикладаються до вихідного валу механізму. До основних типів редукторів, які використовуються для електроприводу засувки відносяться: черв'ячний редуктор, планетарний редуктор, хвильовий редуктор з проміжними тілами кочення. До складу приводу також входить ручний дублер у вигляді маховика (штурвала), що служить для закриття засувки в разі непрацездатності двигуна або відключення електропостачання.

1.2 Вибір параметрів, які підлягають автоматичному контролю і регулюванню

Для справної роботи автоматичної газорозподільної системи потрібно контролювати та регулювати наступні параметри:

- рівень зібраної суміші в фільтрах сепараторах (контроль засміченості);
- рівень конденсату в ємностях;
- тиск газу на вході ГРС;
- тиск газу на вході блоку очистки;
- тиск газу на вході блоку редукування;
- тиск газу на вході вузла переключень;
- тиск газу на виході ГРС;
- температура газу на вході ГРС;
- температура газу в блоці очистки;
- температура газу на вході блоку редукування;
- температура газу на вході вузла переключень;
- температура газу на вході підігрівача газу;
- температура газу на виході ГРС;
- витрата газу в замірних блоках (перед блоками одоризації);
- концентрація одоранту в одоризаційних установках;
- концентрація газу в операторній;
- автоматичне регулювання положення засувки.

Для вузла редукування газу ГРС основним параметром, який потрібно підтримувати і регулювати є тиск на виході з цього вузла, який в залежності від технічного завдання може складати 0,3 МПа, 0,6 МПа або 1,2 МПа.

1.3 Формулювання вимог до електроприводу

Електропривод запірно-регулювальної арматури виконує свої функції у складних кліматичних умовах і агресивних середовищах, знаходячись на значній відстані від пунктів керування і в потенційно вибухонебезпечних зонах [8].

Керування засувкою за допомогою електроприводу буде здійснюватися у вузлі редукування газу газотранспортної системи. Тому електропривод повинен відповідати не тільки технічним вимогам, але й забезпечувати безпечну його експлуатацію.

Таким чином, висуваються наступні загальні вимоги до керування електроприводом запірно-регулювальної арматури:

- забезпечення точного позиціонування валу із точністю $\pm 5\%$;
- мінімізація вартості;
- забезпечення герметичності арматури;
- створення потрібних моментів ущільнення;
- забезпечення роботи в пограничних режимах;
- забезпечення необхідних швидкостей зміни стану арматури;
- реалізація широкого діапазону регулювання за швидкістю, кутовим положенням та обертовим моментом, в залежності від вимог;
- забезпечення незмінної швидкості за змінного навантаження.

Висновки до розділу 1

1. На основі порівняння існуючих приводів для встановлення на запірно-регулювальну арматуру (засувку), було встановлено, що найбільш доцільним є використання саме електричних приводів, так як вони мають суттєві переваги перед пневматичними або гідравлічними приводами.

2. Було здійснене порівняння керуючих пристроїв для електроприводів, та визначено, що застосування перетворювачів частоти для цих цілей раціонально застосовувати системи на базі перетворювачів частоти, так як вони мають більш широкий спектр можливостей, у порівнянні з тиристорними регуляторами та ін.

3. Зважаючи на умови використання електроприводу засувки, були сформовані основні вимоги до керування електричної машини.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ДВИГУНА

2.1 Обґрунтування вибору потужності двигуна та його розрахунок

Тиск на вході вузла редукування становить 5,4 МПа [9], а на виході вузла становить 1,2 МПа. Діаметр умовного проходу труби становить 500мм. Температура газу у вузлі редукування становить нижче 120°C, а температура навколишнього середовища від –40 до +45°C.

Електроприводу засувки, встановленому у вузол редукування газу, важливо формувати момент на регулюючому органі даної арматури. Це пов'язано з тим, що на засувку діє постійний реактивний момент навантаження, навіть на початку пуску.

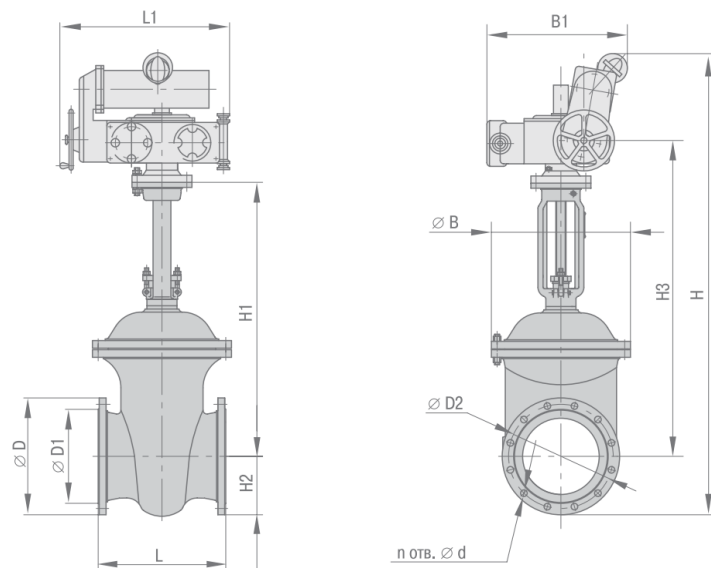


Рисунок 2.1 – Засувка 30с976нж під електропривод

В якості регулюючого пристрою в трубопроводі обираємо засувку стальну 30с976нж (рис. 2.1) під електропривод [10], паспортні дані якої наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики засувки 30с976нж

Параметр	Значення
Діаметр Ду (DN), мм:	50 – 500
Тиск PN, МПа (кг / см ²):	6,3 (63)

Продовження таблиці 2.1

Матеріал корпусу:	12X18H9ТЛ
Приєднання до трубопроводу:	фланцеве
Герметичність затвора:	клас «А», «Б» ГОСТ 9544
Кліматичне виконання:	У1, по ГОСТ 15150–69
Робоча температура:	від –40 до 450 °С
Робоче середовище:	вода, пар, масло, газ, нафта і нафтопродукти
Керування:	електропривод

Відповідно до методики [11], визначається момент та зусилля на електроприводі, необхідні для керування засувкою, виходячи з наступних параметрів $P_y=5,4$ МПа, $D_y=0,5$ м, $D1=0,54$ м [6]. Конструкція засувки приведена на рис. 2.1. Матеріал деталей: ущільнюючі кільця – наплавлення з нержавіючого матеріалу, шпindel – сталь, різьбова втулка – латунь [12]. Засувка має шпindel, що обертається. Кут нахилу клину $\varphi = 2^\circ 52'$ [6]. Затвор типу А [13]. Матеріал корпусу – 12X18H9ТЛ [14]. Матеріал набивки сальника – ТРГ [15].

2.1.1 Визначення зусилля клину затвора

Одним з сумарних зусиль, що діють на клин затвора, є сила власної ваги Q_G клину затвора, яка може бути визначена за наближеною формулою [11]:

$$Q_G = 2,04D_{HT}^2 S_T \rho_T g, \quad (2.1)$$

де D_{HT} і S_T – зовнішній діаметр і товщина тарілки, м; ρ_T – щільність матеріалу тарілки (в розрахунку можна прийняти 7800 кг/м^3); $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Товщина тарілки S_T , мм, може бути визначена за наближеною формулою:

$$S_T = D_y \sqrt{\frac{0,3P_{роб}}{\sigma_{дод}}}, \quad (2.2)$$

де D_y – умовний прохід, мм; $P_{\text{роб}}$ – робочий тиск середовища, МПа; $\sigma_{\text{дод}}$ – допустиме напруження матеріалів тарілок, МПа.

Допустимі напруги можна визначити за формулою:

$$\sigma_{\text{дод}} = \frac{\sigma_t}{n_t} = \frac{190}{2} = 95, \quad (2.3)$$

де σ_t – межа текучості матеріалу при робочій температурі середовища, МПа (для матеріалу «Сталь 25Л» при температурі матеріалу до 200 °С дорівнює 190 МПа); n_t – коефіцієнт запасу міцності (для тарілок можна прийняти $n_t = 2$).

$$S_t = D_y \sqrt{\frac{0,3P_{\text{роб}}}{\sigma_{\text{дод}}}} = 500 \cdot \sqrt{\frac{0,3 \cdot 5,4}{95}} = 65,29 \text{ мм}, \quad (2.4)$$

Зовнішній діаметр тарілки $D_{\text{нт}}$ рекомендується визначати з наступних співвідношень:

для $D_y > 400$ мм, $D_{\text{нт}} = D_1 + 20$ мм, тоді:

$$D_{\text{нт}} = 540 + 20 = 560 \text{ мм}, \quad (2.5)$$

Підставляючи (2.2) в (2.1), отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_G &= 2,04 \cdot 0,56^2 \cdot 0,0653 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 3196,56 \text{ Н}, \\ m_G &= 0,102 Q_G = 0,102 \cdot 3196,56 = 326,05 \text{ кг}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.1.2 Визначення зусиль ущільнення

Необхідно розглянути умови, при яких створюється щільне перекриття середовища засувкою. Для цього зіставляють величини тиску середовища $Q_{\text{ср}}$ на диск тарілки затвора і питомого тиску на ущільнюючих кільцях сідла засувки, необхідного для забезпечення щільності Q_y .

Величини тисків визначаються за такими залежностями, Н [11]:

$$Q_{\text{ср}} = 0,785 D_{\text{нт}} S_t P_{\text{роб}}, \quad (2.7)$$

$$Q_y = 0,3Q_{cp}, \quad (2.8)$$

де Q_{cp} – величина тиску середовища на диск тарілки затвора; Q_y – величина питомого тиску, необхідного для забезпечення щільності; $P_{роб}$ – робочий тиск, МПа.

Підставляючи (2.4) і (2.5) в (2.7) та (2.8), отримаємо:

$$Q_{cp_5.4} = 0,785 \cdot 560 \cdot 65,29 \cdot 5,4 = 154988,0136 \text{ Н}, \quad (2.9)$$

$$Q_{cp_1.2} = 0,785 \cdot 560 \cdot 65,29 \cdot 1,2 = 34441,78 \text{ Н}, \quad (2.10)$$

$$Q_{y_5.4} = 0,3Q_{cp_5.4} = 0,3 \cdot 154988,0136 = 46496,4 \text{ Н}, \quad (2.11)$$

$$Q_{y_1.2} = 0,3Q_{cp_1.2} = 0,3 \cdot 34441,78 = 10332,534 \text{ Н}. \quad (2.12)$$

2.1.3 Розрахунок зусиль для переміщення клину і максимального зусилля вздовж шпинделя

Найбільші зусилля, необхідні для переміщення клину в клиновий засувці при куті нахилу клину $\varphi = 2^\circ 5'$, визначаються за формулами (2.13) та (2.14)[16].

$$Q_1 = 0,8Q_y + 0,35Q_{cp} - Q_G, \quad (2.13)$$

$$Q_1' = 0,8Q_y + 0,45Q_{cp} + Q_G. \quad (2.14)$$

Найбільші зусилля на шпинделі будуть різними в початковий момент відкривання Q_0' і в кінцевий момент закривання Q_σ :

$$Q_\sigma = Q_1 + Q_{шп} + F_{трс}, \quad (2.15)$$

$$Q_0' = Q_1' - Q_{шп} + F_{трс}. \quad (2.16)$$

Тут $Q_{шп}$ – зусилля в Н, з яким робоче середовище «видавлює» шпиндель з засувки; $F_{трс}$ – сила тертя шпинделя в сальникових ущільненнях; Q_1 – найбільше зусилля в кінцевий момент закривання в Н; Q_1' – найбільше зусилля в початковий момент відкривання в Н.

$$Q_{\text{шп}} = 0,785d_{\text{шп}}^2 P_{\text{роб}}, \quad (2.17)$$

$$F_{\text{трс}} = \varphi d_{\text{шп}} S_{\text{с}} P_{\text{роб}}, \quad (2.18)$$

де $d_{\text{шп}}$ – діаметр шпинделя.

Діаметр шпинделя можна визначити застосовуючи попередню оцінку цього діаметра $d_{\text{шп}}^*$, використовуючи наступні співвідношення [11]:

$$d_{\text{шп}}^* = \frac{h_{\text{шп}}}{n_{\text{шп}}}, \quad (2.19)$$

де $h_{\text{шп}}$ – хід шпинделя, який визначається з умови, що клин затвора повинен повністю звільняти прохідний перетин для середовища, тобто:

$$h_{\text{шп}} = D_y + (20 \dots 40 \text{ мм}) = 500 + 40 = 540 \text{ мм}. \quad (2.20)$$

Коефіцієнт $n_{\text{шп}}$ приймає наступні значення:

для $D_y = 200 \dots 400 \text{ мм}$, $n_{\text{шп}} = 4 \dots 5$;

для $D_y > 400 \text{ мм}$, $n_{\text{шп}} = 6 \dots 7$.

Підставляючи отримані значення в (2.19), отримаємо:

$$d_{\text{шп}}^* = \frac{540}{7} = 77,14 \text{ мм}. \quad (2.21)$$

Після такої оцінки діаметра по табл. 2.2 [11] обираємо найближчу трапецеїдальну різьбу (для шпинделя) и назначаємо уточнений діаметр шпинделя, який, як правило, дорівнює зовнішньому діаметру різьби.

Таблиця 2.2 – Шпинделі з трапецеїдальною різьбою по ГОСТ 9484–60

Зовнішній діаметр шпинделя $d_{\text{с}}, \text{мм}$	Різьба		
	Крок S , мм	Середній діаметр $d_{\text{ср}}, \text{мм}$	Кут підйому, α
75	10	70	$2^\circ 36'$
78	10	73	$2^\circ 30'$

Обираємо шпindel з параметрами $d_{\text{шп}}=78$ мм, $S=10$ мм, $d_{\text{ср}}=73$ мм, $\alpha=2^{\circ}30'$.

Товщину сальникового ущільнення S_c рекомендується визначати по такому співвідношенню, мм:

$$S_c = (0,7 \dots 1,5) \sqrt{d_{\text{шп}}} = 1,3 \cdot \sqrt{78} = 11,5 \text{ мм.} \quad (2.22)$$

Висоту сальникової набивки вибирають в залежності від тиску робочого середовища. Тоді $h_c = (5 \dots 6)S_c$, для $P_{\text{роб}} \leq 8$ МПа:

$$h_c = 6 \cdot 11,5 = 69 \text{ мм.} \quad (2.23)$$

Коефіцієнти φ та φ_c та значення f знаходяться з табл. 2.3 [11].

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнтів φ та φ_c для $P_{\text{роб}}$ та h_c/S_c

Робочий тиска $P_{\text{роб}}$, МПа	Коефіцієнти φ та φ_c			
	h_c/S_c	5,5	6,0	6,5
2,6...6,3	φ_c	2,42	2,55	2,68
($f = 0,07$)	φ	1,61	1,80	2,00

Так як $\frac{h_c}{S_c} = \frac{69}{11,5} = 6$, тоді $f=0,07$, $\varphi=1,8$ та $\varphi_c=2,55$.

Підставляючи отримані значення в (2.17) та (2.18), отримаємо:

$$Q_{\text{шп_5.4}} = 0,785 d_{\text{шп}}^2 P_{\text{роб}} = 0,785 \cdot 78^2 \cdot 5,4 = 25790,076 \text{ Н,} \quad (2.24)$$

$$Q_{\text{шп_1.2}} = 0,785 d_{\text{шп}}^2 P_{\text{роб}} = 0,785 \cdot 78^2 \cdot 1,2 = 5731,13 \text{ Н,}$$

$$F_{\text{трс}} = \varphi d_{\text{шп}} S_c P_{\text{роб}} = 1,8 \cdot 78 \cdot 11,5 \cdot 5,4 = 8718,84 \text{ Н.} \quad (2.25)$$

Підставляючи (2.9), (2.11) та (2.6) в (2.13) та (2.14), отримаємо:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 0,8 \cdot Q_{y_5.4} + 0,35 \cdot Q_{\text{ср_5.4}} - Q_G = \\ &= 0,8 \cdot 46496,4 + 0,35 \cdot 154988,0136 - 3196,56 = 88246,364 \text{ Н,} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$Q'_{1_{5.4}} = 0,8 \cdot Q_{y_{5.4}} + 0,45 \cdot Q_{cp_{5.4}} + Q_G =$$

$$= 0,8 \cdot 46496,4 + 0,45 \cdot 154988,0136 + 3196,56 = 110138,286 \text{ Н}, \quad (2.27)$$

$$Q'_{1_{1.2}} = 0,8 \cdot Q_{y_{1.2}} + 0,45 \cdot Q_{cp_{1.2}} + Q_G =$$

$$= 0,8 \cdot 10332,534 + 0,45 \cdot 34441,78 + 3196,56 = 26961,388 \text{ Н}. \quad (2.28)$$

Тоді найбільші зусилля на шпинделі в початковий момент відкривання Q'_0 і в кінцевий момент закривання Q_σ будуть дорівнювати:

$$Q_\sigma = Q_{1_{5.4}} + Q_{шп_{5.4}} + F_{трс} = 110138,286 + 25790,076 + 8718,84 =$$

$$= 144647,2 \text{ Н}, \quad (2.29)$$

$$Q'_{0_{5.4}} = Q'_{1_{5.4}} - Q_{шп_{5.4}} + F_{трс} = 110138,286 - 25790,076 + 8718,84 =$$

$$= 93067,05 \text{ Н}, \quad (2.30)$$

$$Q'_{0_{1.2}} = Q'_{1_{1.2}} - Q_{шп_{1.2}} = 26961,388 - 5731,13 = 21230,258 \text{ Н}. \quad (2.31)$$

2.1.4 Розрахунок обертового моменту на ходовій гайці

Крутний момент на ходовій гайці розраховується з припущення, що він обумовлений тільки силами тертя в різьбі між шпинделем і ходової гайкою. У початковий момент відкриття максимальний крутний момент розраховується за формулою [11] :

$$M' = M'_{тр} = 0,5 Q'_0 d_{cp} \operatorname{tg}(\rho' - \alpha), \quad (2.32)$$

$$\operatorname{tg}(21^\circ 48' 5'' - 2^\circ 30') = \operatorname{tg}(19^\circ 18' 5'') = 0,35022, \quad (2.33)$$

$$\rho' = \operatorname{arctg} f'_p = \operatorname{arctg}(0,4) = 21^\circ 48' 5''. \quad (2.34)$$

де $\alpha = 2^\circ 30'$ – кут підйому гвинтової лінії різьби ; де ρ – кут тертя спокою, $\rho' = \operatorname{arctg} f'_p$ (f'_p – коефіцієнт тертя спокою, $f'_p = f_p + 0,1$). Так як різьба зі сталі знаходиться в середовищі то $f_p = 0,3$ [11].

Підставивши (2.33) та (2.34) в (2.32), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 M'_{5.4} &= M'_{\text{тр}} = 0,5Q'_{0_{5.4}}d_{\text{cp}}\text{tg}(\rho' - \alpha) = \\
 &= 0,5 \cdot 93067,05 \cdot 0,073 \cdot 0,35022 = 1189,678 \text{ Нм}.
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Момент, що діє на засувку, встановленні у положення для підтримання вихідного тиску на рівні 1,2 МПа:

$$\begin{aligned}
 M'_{1.2} &= M'_{\text{тр}} = 0,5Q'_{0_{1.2}}d_{\text{cp}}\text{tg}(\rho' - \alpha) = \\
 &= 0,5 \cdot 21230,258 \cdot 0,073 \cdot 0,35022 = 271,38 \text{ Нм}.
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

2.1.5 Вибір електроприводу

Відповідно до методики [11] частота обертання ходової гайки:

$$\begin{aligned}
 n_{\text{хг}} &= \frac{60h_{\text{шп}}}{S\tau} = \frac{60 \cdot 540}{10 \cdot 372} = 8,7187 \text{ об / хв}, \\
 \omega_{\text{хг}} &= 0,8379 \text{ рад/с}, \\
 V &= \frac{n_{\text{хг}}Z_{\text{г}}S}{60} = \frac{8,7187 \cdot 54 \cdot 0,01}{60} = 0,078 \text{ м/с},
 \end{aligned}
 \tag{2.37}$$

де $\tau=372 \text{ с}=6,2 \text{ хв}$ – час повного закриття засувки; $Z_{\text{г}}=54$ – кількість заходів шпindelю; $S=0,01\text{м}$ – крок різьби.

Потужність, що необхідна для обертання ходової гайки, Вт:

$$P = \frac{M_{\text{кр}}\pi n_{\text{хг}}}{30} = \frac{1189,678 \cdot 3,14 \cdot 8,7187}{30} = 1085,64 \text{ Вт},
 \tag{2.38}$$

де $M_{\text{кр}}$ – обертовий момент на ходовій гайці, Нм (приймається максимальним у відповідності до п. 2.1.4).

Коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу розраховуємо як:

$$\eta_{\text{пр}} = \eta_{\text{м}}^2 \eta_{\text{п.к}}^2 \eta_3 = 0,96^2 \cdot 0,99^2 \cdot 0,95 = 0,858097,
 \tag{2.39}$$

де ККД муфти $\eta_{\text{м}} = 0,96$; ККД підшипника кочення, $\eta_{\text{п.к}} = 0,98 \dots 0,99$; ККД зубчатого зачеплення $\eta_3 = 0,95$.

У цій формулі враховано, що крутний момент передається від електродвигуна на ходову гайку через дві хрестово–шарнірних муфти і одне зубчасте зачеплення.

Потужність електродвигуна розраховується за формулою:

$$P_{\text{ел}}^* = \frac{N}{\eta_{\text{пр}}} = \frac{1085,64}{0,858097} = 1265,17 \text{ Вт} = 1,26 \text{ кВт}, \quad (2.40)$$

Далі обираємо двигун з каталогу типу 4A100L8Y3 [18] з потужністю $P_{\text{дв}} = 1,5 \text{ кВт}$, частотою обертання 750 об/хв , з номінальним ковзання $s_{\text{ном}} = 7\%$, та кількістю пар полюсів $p_n = 4$.

Номінальну частоту обертання $n_{\text{ном}}$, розрахуємо за формулою:

$$\begin{aligned} n_{\text{ном}} &= n_c - \frac{s_{\text{ном}}}{100} n_c = 750 - \frac{7}{100} \cdot 750 = 697,5 \text{ об/хв}, \\ \omega_{\text{ном}} &= \frac{2\pi f}{p_n} (1 - s_n) = 78,5 \cdot (1 - 0,07) = 73,005 \text{ рад/с}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Передаточне число редуктора визначається:

$$i_{\text{необ}} = \frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{хг}}} = \frac{697,5}{8,7187} = 80. \quad (2.42)$$

Враховуючи (2.42), зі стандартного ряду [19] обираємо редуктор з передаточним числом $i_{\text{пр}} = 80$.

Далі визначаємо крутний момент на ведучому валу двигуна для початку переміщення:

$$M_{\text{кр1}_5.4} = \frac{M_{\text{кр}}}{\eta_3 \eta_{\text{пк}} i_{\text{пр}}} = \frac{1189,678}{0,95 \cdot 0,99 \cdot 80} = 15,811 \text{ Нм}. \quad (2.43)$$

Визначаємо крутний момент на валу двигуна, що необхідний для утримання засувки у заданому положенні $P_{\text{вих}} = 1,2 \text{ МПа}$:

$$M_{\text{кр1}_1.2} = \frac{M_{\text{кр1}_2}}{\eta_z \eta_{\text{пк}} i_{\text{пр}}} = \frac{271,38}{0,95 \cdot 0,99 \cdot 80} = 3,606 \text{ Нм.} \quad (2.44)$$

Далі необхідно визначити кількість обертів валу необхідних для встановлення засувки у положення, яке буде відповідати вихідному тиску $P_{\text{вих}} = 1,2 \text{ МПа}$. Для цього побудуємо графік залежності вихідного тиску від кількості обертів шпинделя (рис 2.2).

Так як, час повного закриття $\tau = 6,2 \text{ хв}$, а $n_{\text{хг}} = 8,7187 \text{ об / хв}$, то з повністю відкритого стану, до повністю закритого необхідно зробити:

$$n_{\text{закр}} = n \cdot \tau = 8,7187 \cdot 6,2 = 54,0559 \text{ обертів.} \quad (2.45)$$

Тоді за графіком рис. 2.2 при $P_{\text{вих}} = 1,2 \text{ МПа}$ визначаємо кількість обертів і відповідне положення шпинделя, які становлять:

$$\begin{aligned} h_{\text{шп}_1.2} &= h_{\text{шп}_5.4} - \frac{P_{\text{вих}} h_{\text{шп}_5.4}}{P_{\text{вх}}} = 540 - \frac{1,2 \cdot 540}{5,4} = 420 \text{ мм,} \\ n_{\text{рт}} &= \frac{h_{\text{шп}_1.2} n_{\text{закр}}}{h_{\text{шп}_5.4}} = \frac{420 \cdot 54,0559}{540} = 42,043 \text{ оберти,} \end{aligned} \quad (2.46)$$

Визначаємо кутове положення вихідного валу редуктора та валу двигуна, відповідно:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{ред}}^* &= 2\pi n_{\text{рт}} = 6,28 \cdot 42,043 = 264,03 \text{ рад,} \\ \theta_{\text{дв}}^* &= \theta_{\text{ред}}^* i_p = 264,03 \cdot 80 = 21122,4 \text{ рад.} \end{aligned} \quad (2.47)$$

Враховуючи, що моменти інерції двигуна $J_d = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, виконуємо приведення моментів інерції редуктора та засувки до валу двигуна:

$$J_{\text{зас}} = m_G \rho^2 = m_G \cdot \left(\frac{V}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^2 = 326,05 \cdot \left(\frac{0,078}{73} \right)^2 = 0,00037 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

$$J_p = \frac{J_{\text{зас}}}{i_p^2} = \frac{0,00037}{80^2} = 0,00000000578 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2.48)$$

$$J_{\Sigma} = J_d + J_p + J_{\text{зас}} = 0,013 + 0,00000000578 + 0,00037 = 0,01337 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Графік залежності тиску від положення засувки та кутового положення валу двигуна зображений на рис. 2.2.

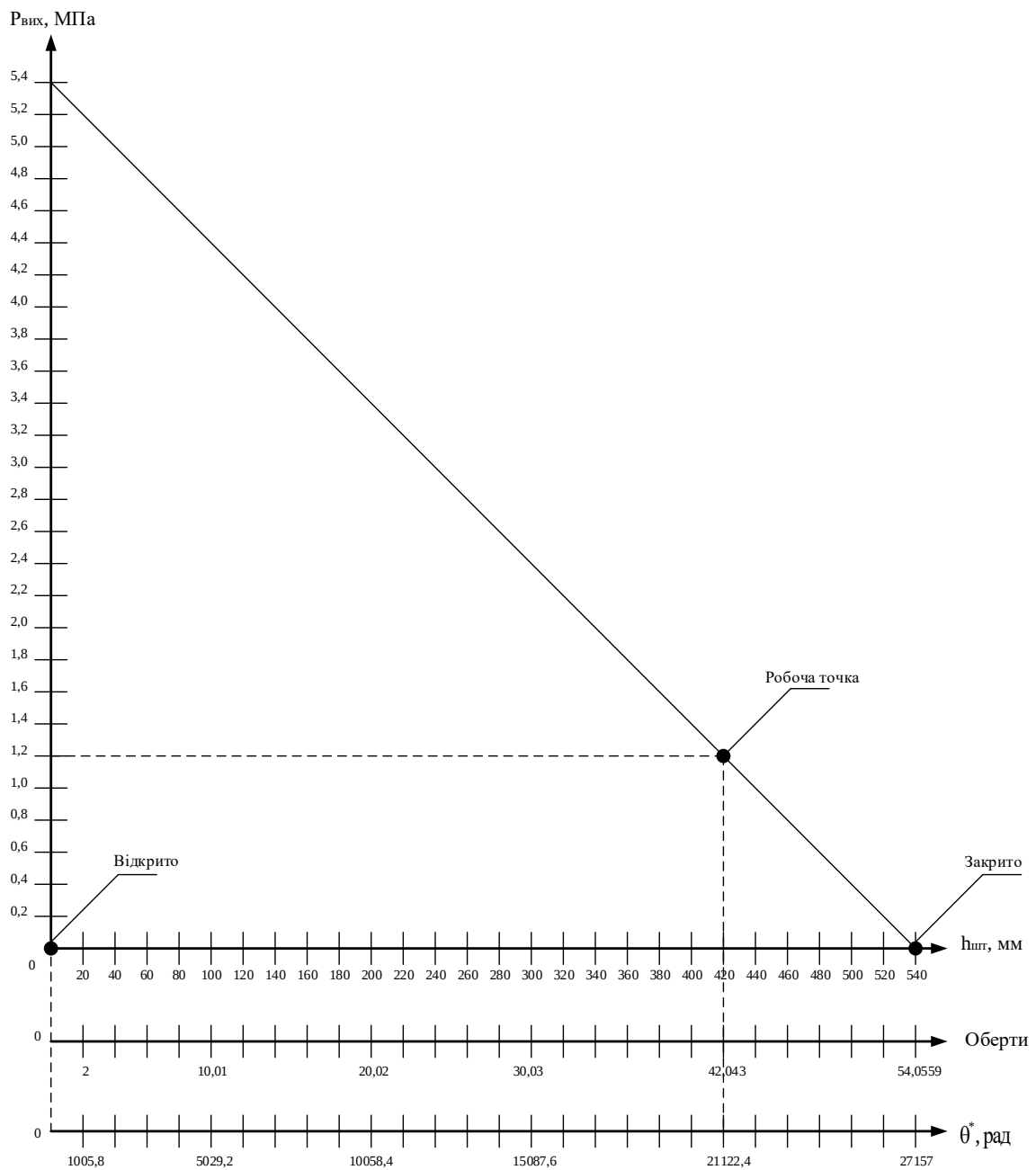


Рисунок 2.2 – Залежність тиску від положення засувки

2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Паспортні дані двигуна 4A100L8Y3 [18], наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Паспортні дані двигуна 4A100L8Y3

Параметр	Значення
Номінальна потужність	$P_{2n}=1,5 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n}=380 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n=4$
Момент інерції	$J_d=0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta=0,74$
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi=0,65$
Перевантажувальна здатність	$\lambda=1,9$
Номінальне ковзання	$s_n=0,07$
Критичне ковзання	$s_k=0,27$
Номінальна частота напруги статора	$f=50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{x_1}'=0,16$
Активний опір статора	$\overline{R_1}'=0,11$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$\overline{x_2}''=0,32$
Приведений активний опір ротора	$\overline{R_2}''=0,093$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$\overline{x_\mu}=1,5$

2.2.1 Розрахунок номінальних даних двигуна

Кутова частота напруги статора:

$$\omega_{0n}=2\pi f=2 \cdot 3,14 \cdot 50=314 \text{ рад/с.} \quad (2.49)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_{0n}}{p_n} = \frac{314}{4} = 78,5 \text{ рад/с.} \quad (2.50)$$

Номінальна швидкість двигуна:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - s_n) = 78,5 \cdot (1 - 0,07) = 73,04 \text{ рад/с.} \quad (2.51)$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n} = \frac{1500}{73,005} = 20,536 \text{ Нм.} \quad (2.52)$$

Критичний момент двигуна (по перевантажувальній здатності λ з каталогу):

$$M_k = \lambda M_n = 1,9 \cdot 20,536 = 39,0186 \text{ Нм.} \quad (2.53)$$

Номінальні діючі значення фазної напруги та струму статора:

$$U_n = U_{1n} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В,} \quad (2.54)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 U_n \eta \cos \varphi} = \frac{1500}{3 \cdot 220 \cdot 0,74 \cdot 0,65} = 4,725 \text{ А.} \quad (2.55)$$

Амплітудні значення фазної напруги і струму статора:

$$U_{na} = \sqrt{2} U_n = \sqrt{2} \cdot 220 = 311 \text{ В,} \quad (2.56)$$

$$I_{na} = \sqrt{2} I_n = \sqrt{2} \cdot 4,725 = 6,6622 \text{ А.} \quad (2.57)$$

Амплітудне значення потокозчеплення статора в режимі холостого ходу при $R_1 = 0$:

$$\Psi_{1XX} = \frac{U_{na}}{\omega_{0n}} = \frac{311}{314} = 0,99 \text{ Вб.} \quad (2.58)$$

2.2.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення

Математична модель АД отримана для Т-подібної схеми заміщення, що показана на рис. 2.3, в той час як приведені каталожні параметри відповідають Г-подібній схемі заміщення, рис. 2.4. Для перерахунку параметрів з Г-подібної схеми в Т-подібну використовується наступна методика:

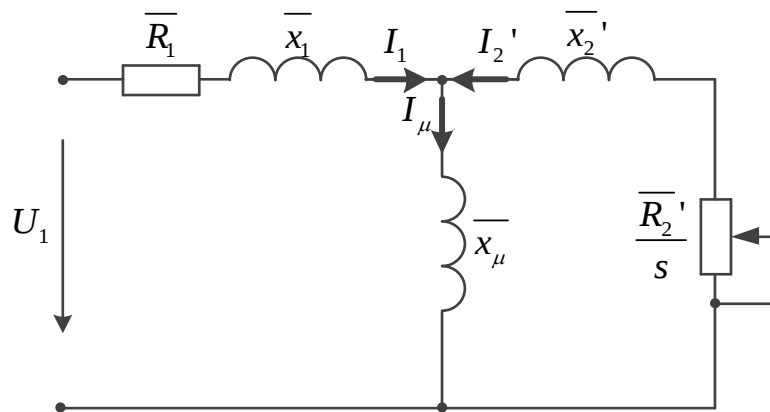


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

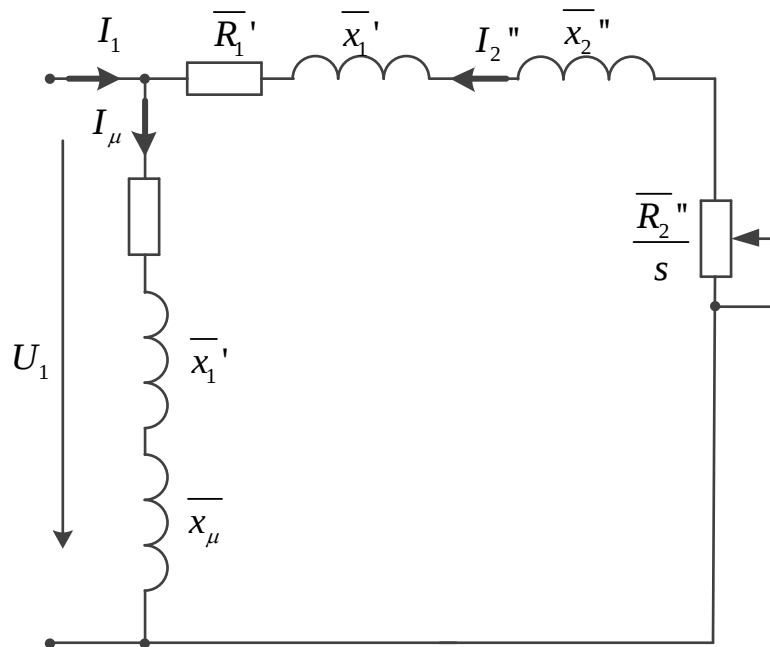


Рисунок 2.4 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Коефіцієнт перерахунку між Т-подібною та Г-подібною схемами заміщення:

$$c_1 = \frac{\bar{x}_\mu + \sqrt{\bar{x}_\mu^2 + 4\bar{x}_1'\bar{x}_\mu}}{2 \cdot \bar{x}_\mu} = \frac{1,5 + \sqrt{(1,5)^2 + 4 \cdot 0,16 \cdot 1,5}}{2 \cdot 1,5} = 1,0972. \quad (2.59)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

$$\overline{x_1} = \frac{\overline{x_1}'}{c_1} = \frac{0,16}{1,0972} = 0,1458, \quad (2.60)$$

$$\overline{R_1} = \frac{\overline{R_1}'}{c_1} = \frac{0,11}{1,0972} = 0,1003, \quad (2.61)$$

$$\overline{x_2}' = \frac{\overline{x_2}''}{c^2} = \frac{0,32}{(1,0972)^2} = 0,2658, \quad (2.62)$$

$$\overline{R_2}' = \frac{\overline{R_2}''}{c^2} = \frac{0,093}{(1,0972)^2} = 0,0773. \quad (2.63)$$

Параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишуться:

$$x_1 = \overline{x_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,1458 \cdot \frac{220}{4,725} = 6,7897 \text{ Ом}, \quad (2.64)$$

$$R_1 = \overline{R_1} \frac{U_n}{I_n} = 0,1003 \cdot \frac{220}{4,725} = 4,6679 \text{ Ом}, \quad (2.65)$$

$$x_2' = \overline{x_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,1458 \cdot \frac{220}{4,725} = 12,3762 \text{ Ом}, \quad (2.66)$$

$$R_2 = \overline{R_2}' \frac{U_n}{I_n} = 0,0773 \cdot \frac{220}{4,725} = 3,5968 \text{ Ом}, \quad (2.67)$$

$$x_\mu = \overline{x_\mu} \frac{U_n}{I_n} = 1,5 \cdot \frac{220}{4,725} = 69,8412 \text{ Ом}. \quad (2.68)$$

Індуктивності розсіювання статора і ротора:

$$L_{1\sigma} = \frac{x_1}{\omega_0} = \frac{6,7897}{314} = 0,0216 \text{ Гн}, \quad (2.69)$$

$$L_{2\sigma} = \frac{x_2'}{\omega_0} = \frac{12,3762}{314} = 0,0394 \text{ Гн}. \quad (2.70)$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{x_\mu}{\omega_0} = \frac{69,8412}{314} = 0,2223 \text{ Гн.} \quad (2.71)$$

Індуктивності статора і ротора:

$$L_1 = L_m + L_{1\sigma} = 0,2223 + 0,0216 = 0,2439 \text{ Гн,} \quad (2.72)$$

$$L_2 = L_m + L_{2\sigma} = 0,096 + 0,0394 = 0,2617 \text{ Гн.} \quad (2.73)$$

На основі проведених розрахунків обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma, \mu_1$:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} = \frac{3,5968}{0,2617} = 13,7438 \text{ Ом/Гн,} \quad (2.74)$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1} = \frac{4,6679}{0,2439} = 19,1367 \text{ Ом/Гн,} \quad (2.75)$$

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right) = 0,2439 \cdot \left(1 - \frac{0,2223^2}{0,2439 \cdot 0,2617}\right) = 0,0551 \text{ Гн,} \quad (2.76)$$

$$\sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2}\right) = 0,2617 \cdot \left(1 - \frac{0,2223^2}{0,2439 \cdot 0,2617}\right) = 0,0591 \text{ Гн,} \quad (2.77)$$

$$\beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma} = \frac{0,2223}{0,2617 \cdot 0,0551} = 15,4234 \text{ 1/Гн,} \quad (2.78)$$

$$\beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \sigma_1} = \frac{0,2223}{0,2439 \cdot 0,0591} = 15,4234 \text{ 1/Гн,} \quad (2.79)$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta = \frac{4,6679}{0,0551} + 13,7438 \cdot 0,2223 \cdot 15,4234 = 131,8772 \text{ Ом/Гн,} \quad (2.80)$$

$$\gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 L_m \beta_1 = \frac{3,5968}{0,0591} + 13,7438 \cdot 0,2223 \cdot 15,4234 = 123,4843 \text{ Ом/Гн,} \quad (2.81)$$

$$\mu_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,2223}{0,2617} = 1,274. \quad (2.82)$$

Узагальнені параметрів двигуна, в результаті розрахунків наведені в табл.

Таблиця 2.5 – Параметри двигуна 4A100L8Y3

Параметр	Значення	Параметр	Значення
P_{2n} , кВт	1,5	R_1 , Ом	4,6679
J_d , кг·м ²	0,013	R_2 , Ом	3,5968
ω_n , рад/с	73,042	L_1 , Гн	0,2439
M_n , Нм	20,531	L_2 , Гн	0,2617
M_k , Нм	39,0186	L_m , Гн	0,2223
λ	1,9	α , Ом/Гн	13,7438
I_{na} , А	4,725	σ , Гн	0,0551
Ψ_{1XX} , Вб	0,99	β , 1/Гн	15,4234
η	0,74	β_1 , 1/Гн	15,4234
$\cos\varphi$	0,65	γ , Ом/Гн	131,8772
p_n	4	μ_1	1,274

Висновки до розділу 2

1. Зважаючи на величину вхідного тиску у трубопроводі вузла редукування газу, яка становить 5,4 МПа, було обрано запірно-регулювальну арматуру (засувку) типу 30с976нж, що розрахована на тиск 6,4 МПа.

2. На основі розрахованого моменту, необхідного для переміщення засувки в трубопроводі, було вибрано асинхронний двигун 4A100L8Y3 потужністю 1,5 кВт з номінальним моментом 20,536 Нм та зі стандартного ряду був обраний редуктор з передатним числом $i_p=80$.

3. Для подальшого моделювання був здійснений розрахунок основних параметрів двигуна (R_1, R_2, L_1, L_2, L_m).

3 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ

Для правильної роботи системи керування редукуванням газу необхідно виконати вибір відповідного обладнання.

За результатами розрахунків попереднього розділу для приводу засувки вузла редукування був обраний двигун 4A100L8Y3 потужністю 1,5 кВт і номінальним струмом 4,725 А та з діаметром валу $d_1=28$ мм [20]. Технічні параметри двигуна вказані в табл. 2.4

3.1 Вибір частотного перетворювача та дроселю

В наш час у сфері автоматизації роботи електропривода майже у всіх відповідальних виробництвах знайшли своє застосування перетворювачі частоти. На світовому ринку перетворювачів монополістами в цій сфері є такі компанії: Mitsubishi electric, ABB, Schneider electric, Siemens та ін.

Для електропривода засувки обираємо частотний перетворювач типу Altivar 71 від компанії Schneider electric, так як в ньому присутній широкий спектр можливостей [21]. Перетворювачі Altivar 71 задовольняє усім потребам технологічного процесу, шляхом застосування різних законів керування двигуном. Ці перетворювачі пристосовані для виконання найбільш важких задач електроприводу:

1. Підвищена точність крутного моменту і швидкості при дуже низьких швидкостях і поліпшені динамічні характеристики з алгоритмами управління векторним потоком у відкритих або закритих системах.

2. Робота в режимах регулювання швидкості, положення і регулювання моменту, при цьому забезпечується підвищена точність регулювання при роботі на дуже низьких швидкостях, а також поліпшені динамічні характеристики з алгоритмами векторного управління потоком в розімкнутій або замкненій системі.

3. Збільшений діапазон вихідної частоти.

4. Робота двигунів паралельно і спеціальні приводи із застосуванням скалярного закону управління.

5. Безударне та плавне керування незбалансованими механізмами шляхом застосування засобів адаптації потужності.

Перетворювач частоти Altivar 71 має такі функціональні можливості:

- мінімальний час реакції на відпрацювання команд – $(2 \pm 0,5)$ мс;
- керування кутовим положенням двигуна;
- завдання по імпульсному або диференційному аналоговому входу;
- параметризація шляхом перемикання комплектів параметрів.
- полоса пропускання до 50 Гц;
- контур швидкості з покращеними характеристиками;
- керування асинхронними і синхронними двигунами;
- швидка керована зупинка при обриві живлення мережі;
- захист двигуна від перенапруг;
- ПІД-регулятор;
- висока роздільна здатність сигналу завдання;
- регулювання швидкості, положення або моменту;
- підключення до основних комунікаційних мереж;
- визначення кутового положення привідного двигуна.

Приклад схеми з'єднання ПЧ з АД, зображено на рис. 3.1.

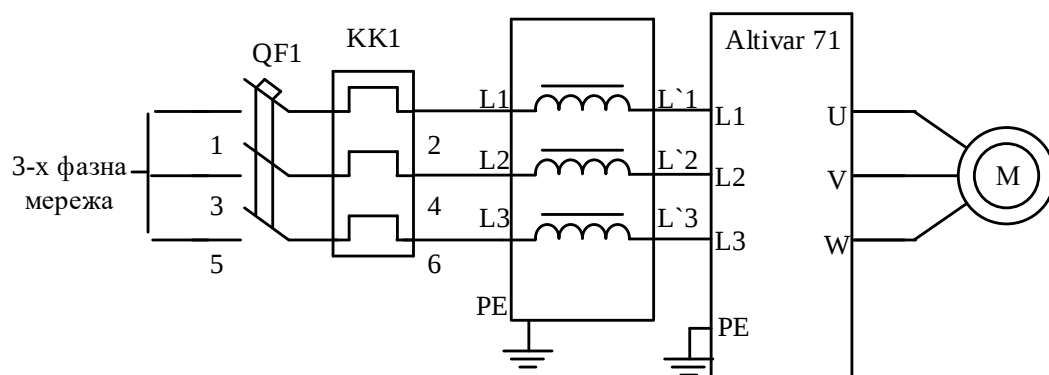


Рисунок 3.1 – Приклад з'єднання ПЧ з АД

Перетворювачі частоти Altivar 71 поставляються з виносним графічним терміналом (рис. 3.2), який забезпечує простий та швидкий доступ до інтерфейсу на 6 мовах, має графічний екран з текстовим відображенням, довідкову систему,

доступ до складних функцій та функцію збереження і пересилання конфігурацій та ін.

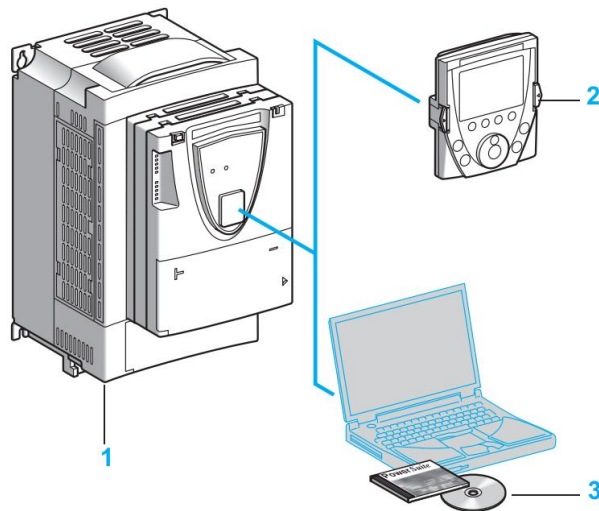


Рисунок 3.2 – Комплект поставки Altivar 71:

1 – перетворювач частоти; 2 – графічний термінал; 3 – програмне забезпечення.

Перетворювач частоти Altivar 71 забезпечує просте та швидке програмування, з безліччю конфігурацій, які повністю піддаються модифікаціям.

Програмне забезпечення PowerSuite (рис. 3.2) дозволяє конфігурувати та налаштовувати перетворювач частоти при прямому підключенні, через Ethernet, за допомогою модему або технології Bluetooth.

За заданої потужності та номінальним струмом приводного двигуна засувки, остаточно вибираємо з каталогу [21] частотний перетворювач типу ATV71HU22N4 (рис 3.3), характеристики якого наведені в табл. 3.1 [22].



Рисунок 3.3 – Частотний перетворювач Schneider electric ATV71HU22N4

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики частотного перетворювача ATV71HU22N4

Параметр	Значення
Потужність, кВт	2,2
Номінальний струм, А	7,8
Піковий струм протягом 2 секунд, А	15,6
Максимальна вихідна частота, Гц	50
Вбудований регулятор	ПД
Число фаз	3-ф
Напруга на вході/виході, В	380
Кількість релейних виходів	2
Сумісність з RS 422	Так

Також необхідно мати на увазі, що для справної роботи системи необхідно забезпечити захист від електромагнітних перешкод, які виникають в мережі живлення. Такі перешкоди призводять до збоїв в роботі обладнання, яке розташоване поруч, або підключене до тієї ж мережі живлення. Для зменшення електромагнітних перешкод електричної мережі застосовуються дроселі.

Вибір дроселя здійснюється в залежності від величини струму та сумісності з перетворювачем частоти. Тому обираємо дросель типу VW3A4552 від компанії Schneider electric (рис. 3.4), характеристики якого наведені в табл. 3.2 [23].



Рисунок 3.4 – Дросель Schneider electric VW3A4552

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики VW3A4552

Параметр	Значення
Сумісність серій продукту	Altivar 71
Кількість фаз	3
Номінальний струм, А	10
Теплові втрати, Вт	64
Значення індуктивності, мГн	4

3.2 Вибір автоматичного вимикача

Перепади напруги в мережах через аварії, нерівномірні навантаження або перевантаження можуть призвести до значних проблем та виведення з ладу електрообладнання. Для надійного захисту при побудові системи електроживлення приладів необхідно застосовувати тільки автоматичні вимикачі, які можуть комутувати аварійні режими мережі та короткі замикання обладнання.

Вибір автоматичного вимикача здійснюємо зважаючи на параметри робочої напруги, струму та струму короткого замикання.

Для системи керування електроприводом засувки в якості комутуючого приладу обираємо автоматичний вимикач типу EZ9F34306 від компанії Schneider electric (рис. 3.5), характеристики якого наведені в табл. 3.3 [24].



Рисунок 3.5 – Автоматичний вимикач Schneider electric EZ9F34306

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики EZ9F34306

Параметр	Значення
Напруга, В	380
Номінальний струм, А	6
Вимикаюча здатність, кА	4,5
Переріз проводів, мм ²	25

3.3 Вибір контакторів, реле, редукторів та енкодерів

Так як в системі передбачена основна та резервна лінії редукування з однаковими приводними двигунами, відповідно потрібно обрати два однакових контактори, два редуктори та два енкодери.

Так як в системі присутнє перемикання між двигунами і енкодерами для основних та резервних ліній редукування, тому, в залежності від потреб потрібно забезпечити комутацію тільки одного двигуна та встановленого на нього енкодеру, в той час як інший двигун та енкодер не будуть працювати.

Для організації такого алгоритму комутації, враховуючи те що перетворювач частоти ATV71HU22N4 [22] має тільки два релейних виходи буде застосована така послідовність включення. Наприклад: потрібно здійснити включення двигуна М1 і відповідного енкодеру (рис.3.9). Для цього ПЧ видає сигнал на релейний вихід, до якого підключений контактор КМ3, який замикає свої контакти, до одного з яких підключений контактор КМ1, що комутує двигун М1. В той же час він розмикає контактор КМ4, до якого підключений контактор КМ2, тим самим не даючи можливість запустити двигун М2. В той же час контактор КМ3 замикає контакти в КМ3.1, тим самим здійснюючи підключення енкодеру двигуна М1 до ПЧ.

Вибір контакторів КМ1 та КМ2 здійснюється з врахуванням струму двигуна. Враховуючи значення цих параметрів обираємо контактор Schneider electric LC1K0610M7 (рис. 3.6), в кількості двох штук. Параметри контактора наведені в табл. 3.4 [25].



Рисунок 3.6 – Триполюсний контактор Schneider electric LC1K0610M7

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики Schneider electric LC1K0610M7

Параметр	Значення
Номінальна напруга, В	230/660
Номінальний струм, А	40
Виконання	Відкрите
Частота, Гц	50

В якості КМ3 та КМ4 обираємо допоміжне реле DILER-31 (230V50HZ), розраховане на номінальний струм 6 А та має 3 нормально відкриті і 1 нормально закритий контакти [26]. В якості КМ3.1 та КМ3.2 обираємо модуль допоміжних контактів 40DILE [26].

Так як асинхронна частота обертання двигуна більша, ніж частота обертання ходової гайки (див. п.2.1.5), тому для передачі обертів від двигуна до шпинделю засувки необхідно застосовувати редуктор.

Вибір редукторів здійснюється шляхом врахування необхідного передаточного числа та діаметра валу двигуна d_1 . За значеннями цих параметрів, обираємо редуктор типу СМ130, параметри якого вказані в табл. 3.5[19].

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики СМ130

Параметр	Значення
Номінальне передатне число	80
Діаметр вхідного валу, мм	28
Потужність, кВт	до 2,2

Для того щоб перетворювач отримував інформацію про положення валу двигуна застосовуємо енкодери. Вони представляють кутове переміщення об'єкта, що позиціонується, у вигляді придатних для подальшої обробки сигналів. Враховуючи частоту обертання двигуна та габаритні розміри двигуна, з каталогу [27] обираємо абсолютний енкодер типу Kuebler 9081 (рис. 3.7), параметри якого вказані в табл. 3.6.



Рисунок 3.7 – Енкодер багатооборотний Kuebler 9081

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики Kuebler 9081

Параметр	Значення
Діаметр входного валу, мм	до 28
Максимальна кількість обертів, об/хв	6000
Напруга живлення, В	10...30
Сумісність з RS 422	Так

3.4 Вибір датчиків тиску

Згідно функціональної схеми автоматизації необхідно здійснити вибір місцевих показуючих манометрів.

Вибір манометрів здійснюються за величиною тиску у трубопроводі. Тому на вхід вузлів редукування обираємо з каталогу [28] манометр типу ТМ серії 10, який розрахований на тиск до 10 МПа, а на вихід вузлів обираємо манометри тієї ж серії, який розрахований на тиск до 2,5 МПа (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 –Манометр ТМ-10

В якості дифманометру обираємо тип ДСП-160-М1 [30], що розрахований на робочий тиск 6,3 МПа.

Схема електрична принципова зображена на рис. 3.9.

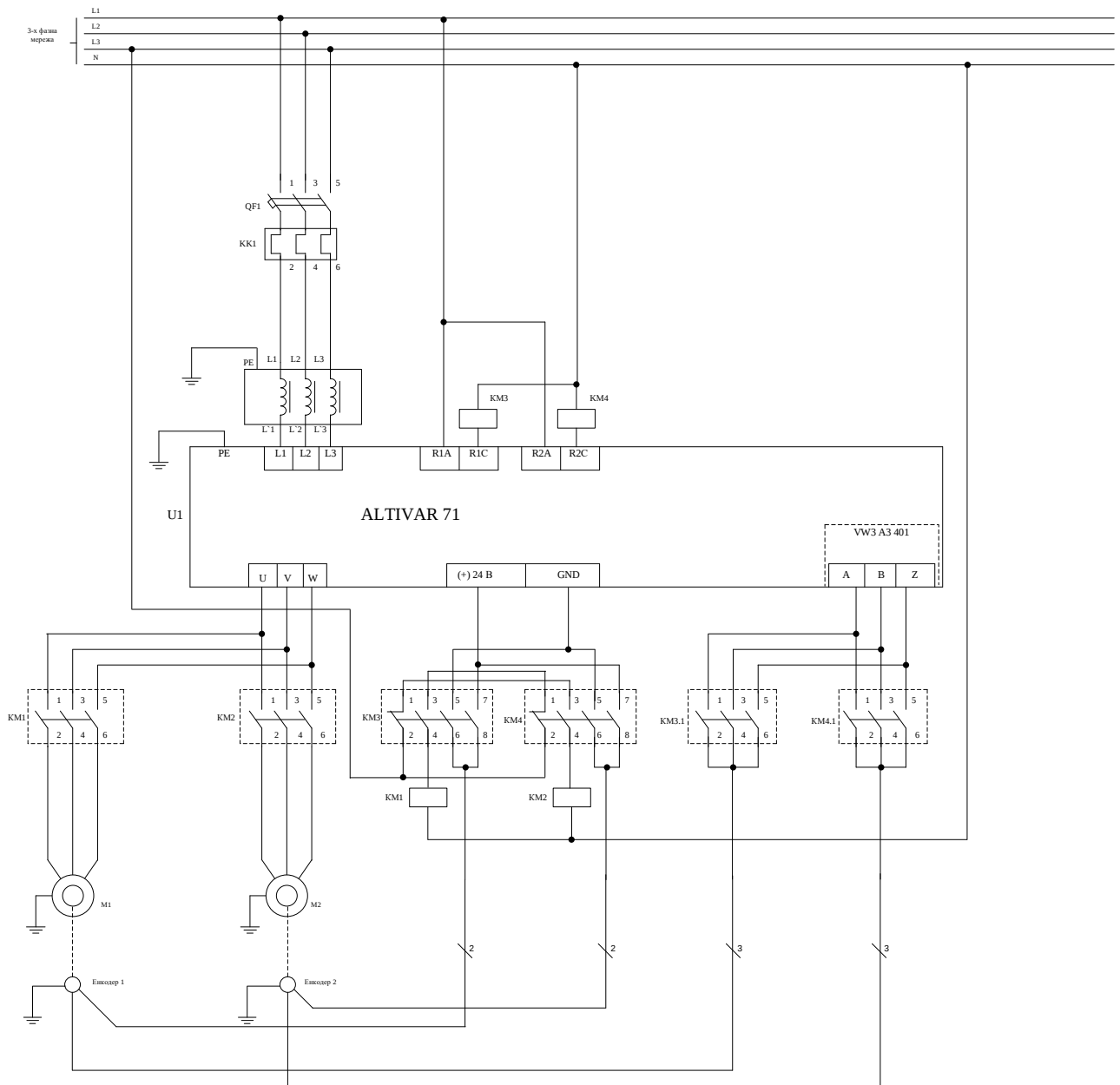


Рисунок 3.9 – Схема електрична принципова

Висновки до розділу 3

1. Для здійснення керування електроприводом, на основі значень потужності та номінального струму двигуна був обраний перетворювач частоти типу Altivar 71.

2. Оскільки, частота обертання ходової гайки менша за частоту обертання двигуна, тому для передачі обертів від двигуна до шпинделя, відповідно до розмірів двигуна, був обраний редуктор CM130 з передаточним числом 80. Для того, щоб ПЧ отримував інформацію про швидкість та кутове положення валу двигуна, був обраний абсолютний енкодер типу Kuebler 9081.

3. За величиною номінального струму двигуна був обраний автоматичний вимикач типу EZ9F34306. Також для комутації двигунів та енкодерів були обрані відповідні контактори та реле.

4 СИНТЕЗ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ

Керування кутовим положенням є основною функцією електроприводів в системах керування рухом. Ця задача вирішується використовуючи векторне керування з алгоритмами відпрацювання потокозчеплення та моменту. Відносно електромагнітного моменту електричної машини, з загальної форми рівнянь руху механічної частини відомо, що ці рівняння однакові для всіх типів електричних машин. Керування потокозчепленням та моментом для різних типів електричних машин були побудовані так, що динамічна поведінка підсистеми потокозчеплення (електромагнітної) є розв'язаною асимптотично відносно електромеханічної підсистеми. Підсистеми відпрацювання моменту побудовані так, що вони є структурно ідентичними. Отже, є можливість створити універсальний спосіб побудови алгоритмів керування кутовим положенням.

4.1 Постановка задачі

За умов лінійної магнітної характеристики електричної машини та збалансованого живлення двофазна модель симетричного АД, записана в довільній системі координат $(a - b)$, має вигляд:

$$\begin{aligned}
 \dot{\theta} &= \omega, \\
 \dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - v\omega, \\
 M &= \mu(\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a}), \\
 \dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
 \dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\
 \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
 \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

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, ν – коефіцієнт в'язкого тертя. Додатні константи, що відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначені в такий спосіб:

$$\sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right); \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2}; \mu = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}; \alpha = \frac{R_2}{L_2}; \gamma = \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right), \quad (4.2)$$

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.

Перетворені змінні задаються виразами:

$$\begin{aligned} x^{(d-q)} &= e^{-J\varepsilon_0} x^{(a-b)}, \\ x^{(a-b)} &= e^{J\varepsilon_0} x^{(d-q)}, \\ e^{-J\varepsilon_0} &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, e^{J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де $x^{(y-z)}$ – визначає двомірні вектори напруг, струмів та потокозчеплень.

У нелінійній моделі АД (4.1) вимірюваним є вектор змінних $y = (\theta, \omega, i_{1a}, i_{1b})^T$, в той час, як потокозчеплення ротора не вимірюється, тому векторне керування АД визначається як задача керування за вимірюваним вектором y .

У загальному випадку задача асимптотичного відпрацювання кутового положення та модулю потокозчеплення формується наступним чином. Нехай $\theta^*(t)$ та $\psi^*(t)$ є задані гладкі функції кутового положення та модулю потокозчеплення ротора $|\psi_2|$. Момент навантаження розглядається, як обмежена зовнішня функція часу. Тоді для АД необхідно сконструювати вектор керуючих дій u , як функцію вимірюваних змінних стану та завдань $\theta^*(t)$ та $\psi^*(t)$ що гарантують системі:

а) глобальне асимптотичне регулювання кутового положення (при $M_c = 0$) та модулю потокозчеплення, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$, де похибки визначені як:

$$\tilde{\theta} = \theta - \theta^*, \tilde{\psi} = |\psi_2| - \psi^*;$$

б) розв'язаність процесів керування кутовим положенням та потокозчеплення, тобто з умови $\tilde{\psi}(0) = 0$ слідує $\tilde{\psi}(t) = 0 \forall t \geq 0$.

Для взаємозв'язку реальних електричних трифазних змінних $x_{(abc)}$ електричної машини та двофазних змінних $x_{(\alpha\beta)}$ узагальненої машини використовуються наступні вирази:

$$x_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} x_{(abc)} \stackrel{\Delta}{=} [3 \rightarrow 2] x_{(abc)}, \quad (4.4)$$

де $[3 \rightarrow 2]$ – матриця перетворення векторів трифазних змінних $x_{(abc)}$ до двофазних $x_{(\alpha\beta)}$; $x_{(\alpha\beta)}$ – вектор у будь-якій двофазній системі координат (a - b), (d - q), (u - v).

Зворотнє перетворення визначається у вигляді:

$$x_{(abc)} = [2 \rightarrow 3] x_{(\alpha\beta)}, \text{ де } [2 \rightarrow 3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (4.5)$$

4.2 Розробка системи векторного керування

Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, яка записується в стаціонарній системі координат (a - b) [30], [31]:

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c) - v\omega, \\
M &= \mu (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \\
\dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} u_{1a}, \\
\dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} u_{1b}, \\
\dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
\dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}.
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Алгоритми векторного керування АД, як правило, проектується та записуються в синхронній системі координат $(d-q)$, яка обертається відносно стаціонарної системи координат з швидкістю ω_0 , див. рис. 4.1.

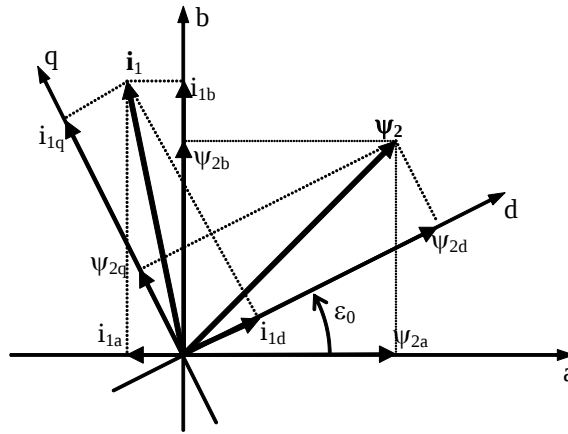


Рисунок 4.1 – Розташування векторів АД

Проблема відпрацювання заданих траєкторій кутового положення – потокозчеплення формулюється наступним чином [32]. Припустимо, що для моделі АД, 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 кутового положення θ^* і потокозчеплення $\psi^* > 0$ є обмеженими функціями з обмеженими першою, другою та третьою похідними по часу.

В умовах цих припущень відбувається проектування алгоритмів прямого векторного керування, які забезпечують:

О1. Глобальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій кутового положення – потокозчеплення, тобто: $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} = 0$, при умові обмеженості всіх внутрішніх змінних.

О2. Асимптотичне орієнтування по вектору потокозчеплення ротора: $\lim_{t \rightarrow \infty} \psi_q = 0$.

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.

Надамо базові особливості реалізації векторного керування з орієнтацією за полем АД. В ідеалізованому випадку, якщо кутове положення вектора потокозчеплення ротора ε_ψ вважається відомим, умова $\varepsilon_0 = \varepsilon_\psi$ в (4.3) гарантує, що вісь d системи координат $(d-q)$ співпадає з напрямком вектора потокозчеплення ротора, тобто:

$$\begin{aligned}\psi_{2d} &= |\psi_2|, \\ \psi_{2q} &\equiv 0.\end{aligned}\tag{4.7}$$

Умова (4.7) визначає ідеальну орієнтацію за вектором потокозчеплення ротора, а система координат $(d-q)$ називається ідеально орієнтованою за вектором потокозчеплення ротора.

Перетворення координат (4.3) з $\varepsilon_0 = \varepsilon_\psi$ має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{i}_{1d} \\ \mathbf{i}_{1q} \end{pmatrix} = \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} \begin{pmatrix} \mathbf{i}_{1a} \\ \mathbf{i}_{1b} \end{pmatrix}, \mathbf{e}^{-j\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon_0 &= \frac{\psi_{2a}}{|\psi_2|}, \\ \sin \varepsilon_0 &= \frac{\psi_{2b}}{|\psi_2|}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Згідно принципу розділення, невимірювані змінні (ψ_{2a}, ψ_{2b}) замінюються на значення $\hat{\psi}_{2a}, \hat{\psi}_{2b}$, що отримуються за допомогою нелінійного асимптотичного спостерігача потокозчеплення із властивостями експоненційної стійкості. При певних умовах використання нелінійного принципу розділення гарантує алгоритму, що базується на інформації спостерігача, властивості локальної асимптотичної стійкості. Принцип розділення історично використовувався в перших системах векторного керування АД, даючи задовільні результати, але не маючи чіткого математичного обґрунтування.

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Припустимо, що зовнішні сигнали ω, i_{1a}, i_{1b} в (4.10) є обмеженими, тоді розімкнений спостерігач для системи (4.10) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\psi}}_{2a} &= -\alpha \hat{\psi}_{2a} - p_n \omega \hat{\psi}_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\ \dot{\hat{\psi}}_{2b} &= -\alpha \hat{\psi}_{2b} + p_n \omega \hat{\psi}_{2a} + \alpha L_m i_{1b}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Визначивши похибки оцінювання потокозчеплень, як:
 $\tilde{\psi}_{2a} = \psi_{2a} - \hat{\psi}_{2a}, \tilde{\psi}_{2b} = \psi_{2b} - \hat{\psi}_{2b}$, їх динаміка згідно (4.10), (4.11) запишеться у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\psi}}_{2a} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2a} - p_n \omega \tilde{\psi}_{2b}, \\ \dot{\tilde{\psi}}_{2b} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2b} + p_n \omega \tilde{\psi}_{2a}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Для аналізу стійкості системи (4.12) розглянемо функцію Ляпунова у вигляді:

$$V = \frac{1}{2}(\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2), \quad (4.13)$$

похідна якої вздовж траєкторій (4.12) дорівнює:

$$\dot{V} = -\alpha(\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2) = -2\alpha V. \quad (4.14)$$

З (4.13) та (4.14) безпосереднє використання теореми Ляпунова свідчить, що положення рівноваги $(\tilde{\psi}_{2a}, \tilde{\psi}_{2b})^T = 0$ є глобально експоненційно стійким.

Більш того, форма (4.14) дає більш строгу оцінку у вигляді: $e_\psi(t) \leq \|e_\psi(0)\| e^{-\alpha t}$,

де $e_\psi = (\tilde{\psi}_{2a}^2 + \tilde{\psi}_{2b}^2)^{\frac{1}{2}}$.

Таким чином, модуль помилок оцінювання $e_\psi(t)$ експоненційно затухає в нуль із швидкістю, що визначається зворотною сталою часу роторного кола АД α . Якщо $e_\psi(0) = 0$, то $e_\psi(t) \equiv 0 \forall t \geq 0$.

Для того, щоб побудувати алгоритм векторного керування по вимірюваному виходу з використанням принципу розділення, використаємо в (4.3), (4.8) – (4.9) заміну реальних потокозчеплень на їх оцінені значення:

$$\begin{aligned} \cos \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2a}}{|\hat{\psi}_2|}, \\ \sin \varepsilon_0 &= \frac{\hat{\psi}_{2b}}{|\hat{\psi}_2|}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

де $|\hat{\psi}_2| = (\hat{\psi}_{2a}^2 + \hat{\psi}_{2b}^2)^{\frac{1}{2}}$.

Рівняння АД (4.1) з урахуванням (4.8) та рівняння спостерігача (4.11), в силу цього перетворення, (в системі координат (d-q), що орієнтована за оціненим вектором потокозчеплення ротора) набувають вигляду:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega, \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \frac{3}{2}p_n \frac{L_m}{L_2}(\psi_{2d}i_{1q} - \psi_{2q}i_{1d}), \\
\dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha\beta\psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + v_d, \\
\dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha\beta\psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q, \\
\dot{\psi}_{2d} &= -\alpha\psi_{2d} + (\omega_0 - p_n\omega)\psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\
\dot{\psi}_{2q} &= -\alpha\psi_{2q} - (\omega_0 - p_n\omega)\psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}, \\
|\dot{\hat{\psi}}_2| &= -\alpha\hat{\psi}_2 + \alpha L_m i_{1d}, \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n\omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\psi}_2|}.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Для подальшого конструювання алгоритму керування зручно визначити похибки оцінювання потокозчеплень в системі координат $(d-q)$:

$$\begin{aligned}
\tilde{\psi}_{2d} &= \psi_{2d} - |\hat{\psi}_2|, \\
\tilde{\psi}_{2q} &= \psi_{2q}.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

З останніх чотирьох рівнянь в (4.16) отримаємо диференціальне рівняння для похибок оцінювання в системі координат $(d-q)$:

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha\tilde{\psi}_{2d} + \omega_2\tilde{\psi}_{2q}, \\
\dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha\tilde{\psi}_{2q} - \omega_2\tilde{\psi}_{2d},
\end{aligned} \tag{4.18}$$

де $\omega_2 = \omega_0 - p_n\omega$.

Зрозуміло, що система рівнянь (4.18) могла бути отримана шляхом безпосереднього перетворення (4.12) в систему координат $(d-q)$.

Визначимо електромеханічну підсистему АД, задану рівняннями:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta} &= \omega, \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c), \\
M &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2d} i_{1q} - \tilde{\psi}_{2q} i_{1d}), \\
\dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + v_q,
\end{aligned} \tag{4.19}$$

а також електромагнітну підсистему у вигляді:

$$\begin{aligned}
|\dot{\hat{\psi}}_2| &= -\alpha \hat{\psi}_2 + \alpha L_m i_{1d}, \\
\dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} + v_d, \\
\dot{\tilde{\psi}}_{2d} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2d} + \omega_2 \tilde{\psi}_{2q}, \\
\dot{\tilde{\psi}}_{2q} &= -\alpha \tilde{\psi}_{2q} - \omega_2 \tilde{\psi}_{2d}, \\
\dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = p_n \omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\psi}_2|}.
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Визначивши похибки відпрацювання струмів статора та потокозчеплень ротора у вигляді:

$$\begin{aligned}
\tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^*, \tilde{i}_{1q} = i_{1q} - i_{1q}^*, \\
\tilde{\psi}_d &= \psi_{2d} - \psi^*, \tilde{\psi}_q = \psi_{2q}.
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Тоді рівняння (4.19), (4.20) у формі похибок відпрацювання запишуться:

$$\tilde{M} = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \psi^* \tilde{i}_{1q} + \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_d (\tilde{i}_{1q} + i_{1q}^*) - \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \tilde{\psi}_q (i_{1d}^* + \tilde{i}_{1d}), \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{i}}_{1q} &= -\gamma \tilde{i}_{1q} + \alpha \beta \tilde{\psi}_q - \beta p_n \omega (|\hat{\psi}_2| + \tilde{\psi}_{2d}) - \gamma i_{1q}^* - \dot{i}_{1q}^* + v_q, \\
\dot{\tilde{\psi}} &= -\alpha \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_{1d} - \alpha \psi^* + \alpha L_m i_{1d}^* - \dot{\psi}^*, \\
\dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma \tilde{i}_{1d} + \alpha \beta (|\hat{\psi}_2| + \tilde{\psi}_{2d}) - \beta p_n \omega \tilde{\psi}_{2q} - \gamma i_{1d}^* - \dot{i}_{1d}^* + v_d.
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Для електромагнітної підсистеми (4.23) синтезуємо:

- регулятор модуля потокозчеплення:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}; \end{aligned} \quad (4.24)$$

- регулятор струму польової компоненти вектора струму статора i_{1d} :

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma(\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^* - k_{ii} \tilde{i}_{1d} - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \\ \dot{i}_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[-(\alpha + k_\psi) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_{1d} - X_\psi \right] - \dot{X}_\psi \right\}, \end{aligned} \quad (4.25)$$

де $(k_\psi, k_{\psi i}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора модуля потокозчеплення ротора, $(k_{id1}, k_{iid}) > 0$ - коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії регулятора струму по осі (d).

Визначимо $\theta^*(t)$ як задану траєкторію змін кутового положення, функцію обмежену з обмеженими трьома похідними за часом $\dot{\theta}^*, \ddot{\theta}^*, \ddot{\theta}^*$. Визначивши похибку відпрацювання кутового положення як

$$\tilde{\theta} = \theta - \theta^*, \quad (4.26)$$

сформулюємо ціль відпрацювання кутового положення наступним чином: для моделі механічної частини електричної машини спроектувати алгоритм змін керуючої дії M^* , що забезпечить асимптотичне відпрацювання кутового положення

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0, \quad (4.27)$$

за умов дії незмінного невідомого моменту навантаження M_c .

Для досягнення цієї цілі напишемо перше рівняння в (4.19) у формі похибок відпрацювання у вигляді:

$$\dot{\tilde{\theta}} = \omega^* + \tilde{\omega} - \dot{\theta}^*. \quad (4.28)$$

Визначимо задане значення кутової швидкості ω^* в (4.28) наступним чином:

$$\omega^* = \dot{\theta}^* - k_\theta \tilde{\theta}, \quad (4.29)$$

де $k_\theta > 0$ коефіцієнт підсилення пропорційного регулятора положення. Після підстановки (4.28) в (4.29) отримаємо рівняння динаміки контуру відпрацювання кутового положення:

$$\ddot{\tilde{\theta}} = -k_\theta \tilde{\theta} + \tilde{\omega}. \quad (4.30)$$

Рішення лінійного рівняння таке, що умова $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$ дає асимптотичне відпрацювання кутового положення $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta} = 0$.

- Регулятор положення:

$$\omega^* = \dot{\theta}^* - k_\theta \tilde{\theta}, \quad (4.31)$$

- регулятор швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left[\dot{M}_c + \ddot{\theta}^* + k_\theta^2 \tilde{\theta} - (k_\omega + k_\theta) \tilde{\omega} \right], \\ \dot{M}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}; \end{aligned} \quad (4.32)$$

- регулятор струму по осі (q):

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 i_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} (\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta) \right], \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} (\psi^* \tilde{i}_q), \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{q1}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} \left\{ \dot{M}_c + \ddot{\theta}^* + k_\theta^2 (-k_\theta \tilde{\theta} + \tilde{\omega}) - \right. \\ &\quad \left. - (k_\omega + k_\theta) [-k_\omega \tilde{\omega} + \mu \psi^* \tilde{i}_q] \right\} - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \dot{i}_q^*. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Напруги, що прикладаються до обмоток статора двигуна, дорівнюють:

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix}. \quad (4.35)$$

Структура похибок відпрацювання в ізольованих контурах регулювання кутової швидкості і модифікованому контурі регулювання струму уніфікована і задана лінійним диференціальним рівнянням другого порядку з характеристичним рівнянням:

$$p^2 + k_p p + k_i = 0, \quad (4.36)$$

де k_p і k_i – значення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної дії регуляторів швидкості та струму.

Використовуються стандартні співвідношення для розрахунку коефіцієнтів регуляторів:

$$\begin{aligned} k_i &= \frac{k_p^2}{2} (\xi = 0,707), \\ k_i &= \frac{k_p^2}{4} (\xi = 1), \end{aligned} \quad (4.37)$$

де ξ – коефіцієнт демпфування. Типове співвідношення між швидкодією контурів регулювання таке, що кожний зовнішній контур щонайменше вдвічі менш швидкодіючий ніж внутрішній, задається вибором співвідношення власних частот недемпфованих коливань в кожному з ізольованих контурів регулювання $\omega_{oc} > (2-3)\omega_{oi}$, $\omega_{oi}^2 = k_i$, $i = c, \omega$, де індекси c і ω відносяться до контурів регулювання струму і кутової швидкості відповідно.

Остаточний алгоритм керування кутовими положенням запишеться у наступному вигляді:

Механічна підсистема:

- регулятор положення:

$$\omega^* = \dot{\theta}^* - k_\theta \tilde{\theta}, \quad (4.38)$$

- регулятор швидкості:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} \left[\hat{M}_c + \ddot{\theta}^* + k_\theta^2 \tilde{\theta} - (k_\omega + k_\theta) \tilde{\omega} \right], \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega}; \end{aligned} \quad (4.39)$$

- регулятор струму по осі (q):

$$\begin{aligned} u_q &= \sigma \left[\gamma \dot{i}_q^* + \omega_0 \dot{i}_d + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{q1}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} (\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta) \right], \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} (\psi^* \tilde{i}_q), \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}_{q1}^* &= \frac{1}{\mu\psi^*} \left\{ \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\theta}^* + k_\theta^2 (-k_\theta \tilde{\theta} + \tilde{\omega}) - \right. \\ &\quad \left. - (k_\omega + k_\theta) [-k_\omega \tilde{\omega} + \mu\psi^* \tilde{i}_q] \right\} - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} \dot{i}_q^*. \end{aligned} \quad (4.41)$$

Електромагнітна підсистема:

- регулятор модуля потокозчеплення:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_\psi \tilde{\psi} - x_\psi), \\ \dot{x}_\psi &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (4.42)$$

- регулятор струму польової компоненти вектора струму статора i_{1d} :

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma (\gamma \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 \dot{i}_{1q} - \alpha \beta |\hat{\psi}_2| + \dot{i}_{1d}^* - k_{ii} \tilde{i}_{1d} - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{ii} \tilde{i}_{1d}, \\ \dot{i}_d^* &= \frac{1}{\alpha L_m} \left\{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_\psi \left[-(\alpha + k_\psi) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d + \gamma_1 \alpha \beta \tilde{i}_{1d} - X_\psi \right] - \dot{X}_\psi \right\}. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Рівняння динаміки похибок матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\theta}} &= -k_{\theta}\tilde{\theta} + \tilde{\omega}, \\
\dot{\tilde{M}}_c &= k_{\omega i}\tilde{\omega}, \\
\dot{\tilde{\omega}} &= -k_{\omega}\tilde{\omega} - \tilde{M}_c + \mu\tilde{i}_q + \frac{1}{J}\tilde{M}_1(t), \\
\dot{x}_q &= k_{ii}\tilde{i}_q, \\
\dot{\tilde{i}}_q &= -k_i\tilde{i}_q - x_q - \frac{(k_{\omega} + k_{\theta})}{\mu}\tilde{M}_c + \frac{(k_{\omega} + k_{\theta})}{\mu}\frac{1}{J}\tilde{M}_{12}(t) + \varphi(t)e(t), \\
\dot{\tilde{\psi}} &= -\alpha\tilde{\psi} + \alpha L_m\tilde{i}_{1d}, \\
\dot{\tilde{i}}_{1d} &= -\gamma\tilde{i}_{1d} + \alpha\beta\tilde{\psi}_{2d} - \beta p_n\omega\tilde{\psi}_{2q}.
\end{aligned} \tag{4.44}$$

Структурна схема алгоритму керування зображена на рис. 4.2.

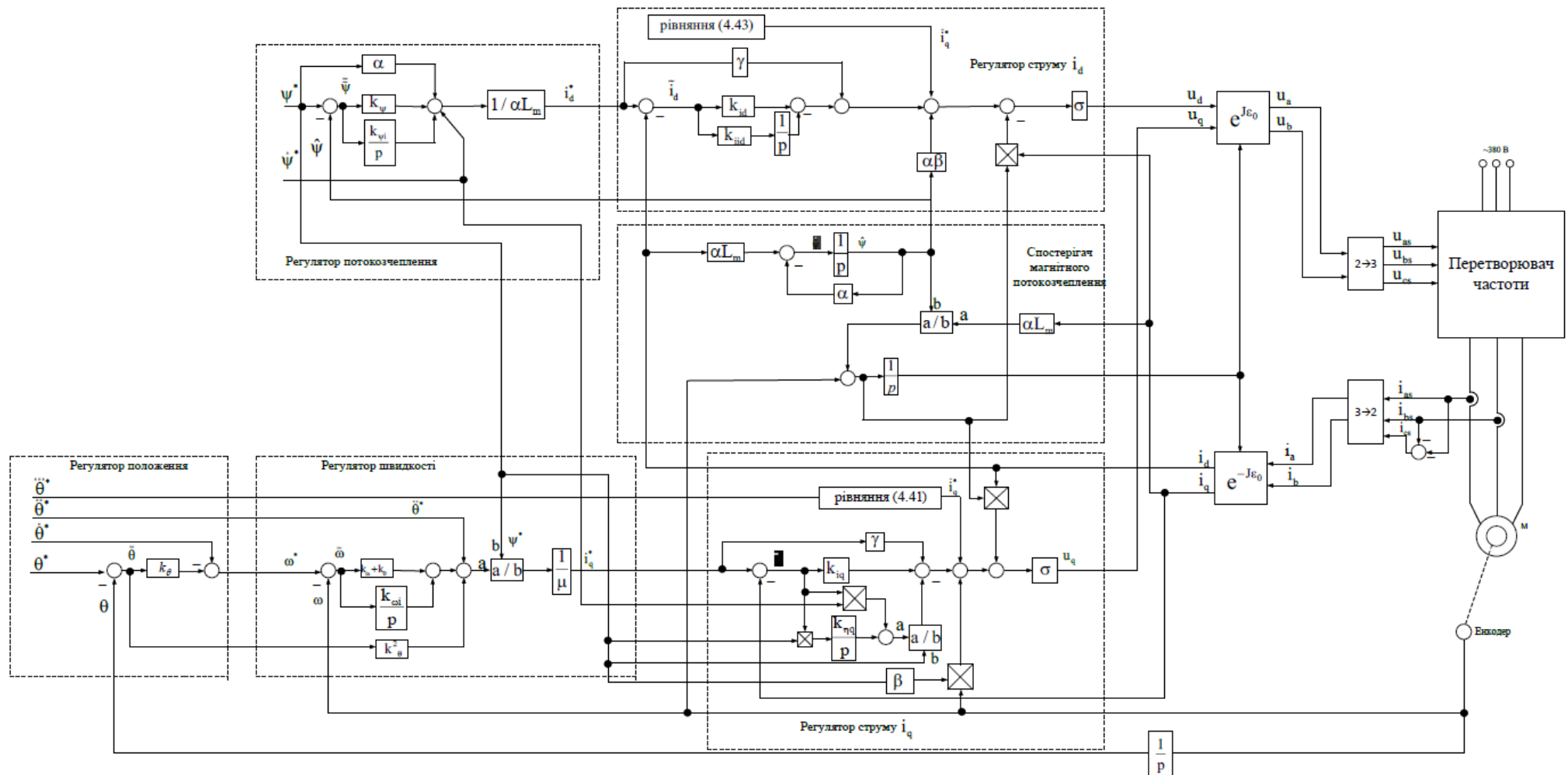


Рисунок 4.2 – Структурна схема алгоритму керування

Висновки до розділу 4

1. Було синтезовано систему прямого векторного керування кутовим положенням АД. Синтез проведено на основі двофазної математичної моделі асинхронного двигун. В результаті синтезу отримано П-регулятор кутового положення, ПІ-регулятор потокозчеплення та ПІ-регулятори струмів по осям (d) та (q).

2. Було визначено, що синтезований алгоритм дозволяє виконувати розв'язку процесів керування електромеханічними та електромагнітними координатами АД.

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дослідження поведінки системи керування положенням проводиться методом математичного моделювання в пакеті програм Matlab Simulink. Дослідження проводиться для АД з наступними параметрами: номінальна потужність 1,5 кВт, номінальний електромагнітний момент 20,53 Нм, номінальний струм статора 4,73 А, опір статора $R_1=4,6679$ Ом, індуктивність статора $L_1=0,2439$ Гн, опір ротора $R_2=3,5968$ Ом, індуктивність ротора $L_2=0,2617$ Гн, індуктивність контуру намагнічування $L_m=0,2223$ Гн, кількість пар полюсів $p_n=4$. Так як, керування здійснюється механізмом, момент інерції якого невідомий, то робимо припущення, що загальний момент інерції буде дорівнювати подвійному моменту інерції двигуна, тобто $J_\Sigma = 0,01337 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

При моделюванні використовувались наступні налаштування регуляторів: $k_\theta = 50$, $k_\omega = 100$, $k_{\omega i} = 5000$, $k_i = 500$, $k_{ii} = 62500$, $k_\psi = 80$, $k_{\psi i} = 1600$.

В умовах моделюючого тесту на початковому інтервалі часу $0\text{с} - 1\text{с}$ відбувається збудження АД. Починаючи з $t=2\text{с}$ від АД вимагається відпрацювання заданої траєкторії кутового положення, що має обмежені першу, другу та третю похідні за часом. Задане значення кутового положення становить $\theta^* = 21122,4$ рад.. Момент навантаження прикладається до двигуна в момент часу $t=2\text{с}$ і чисельне значення якого 15,811 Нм. При відпрацюванні заданої траєкторії кутового положення момент плавно зменшується до значення 3,606 Нм і не знімається до кінця тесту.

Задані траєкторії положення та потокозчеплення, а також профіль моменту навантаження (для наочності промасштабований в 1000 разів) зображені на рис.

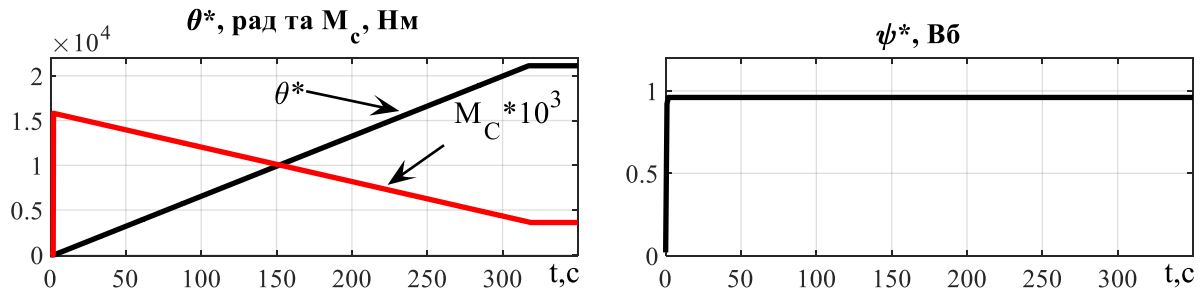


Рисунок 5.1 – Задані траєкторії положення, потокозчеплення та профіль моменту навантаження

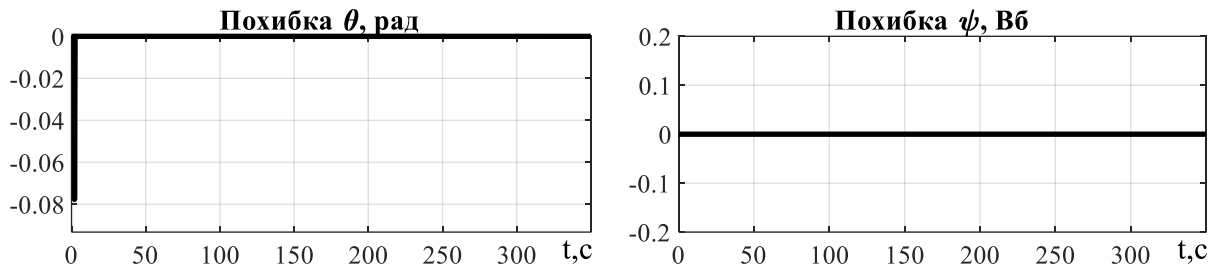


Рисунок 5.2 – Графіки похибок відпрацьованих кутового положення та потокозчеплення

З графіків, що представлені на рис. 5.2, видно, що задане кутове положення валу ротора відпрацьовується без статичної похибки на ділянках з постійним навантаженням. В момент ступінчатого прикладання навантаження ($t=2c$) виникає динамічна похибка, яка компенсується за інтервал часу менш ніж 0.5с, при цьому максимальне значення не перевищує 0,08 рад. З графіку похибки відпрацювання заданого потокозчеплення бачимо, що в системі відбувається полеорієнтування за вектором потокозчеплення ротора. На рис. 5.3 зображені графіки заданої кутової швидкості, моменту на валу двигуна, похибка відпрацювання заданої швидкості та моменту та потокозчеплення ротора по осям (d) та (q).

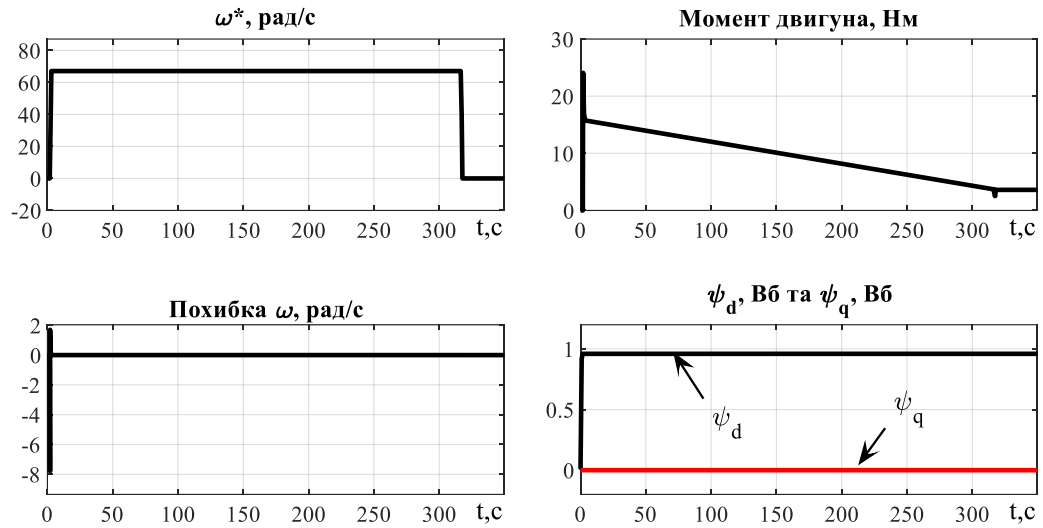


Рисунок 5.3 – Графіки відпрацювання заданої швидкості, моменту та потокозчеплення ротора по осям (d) та (q)

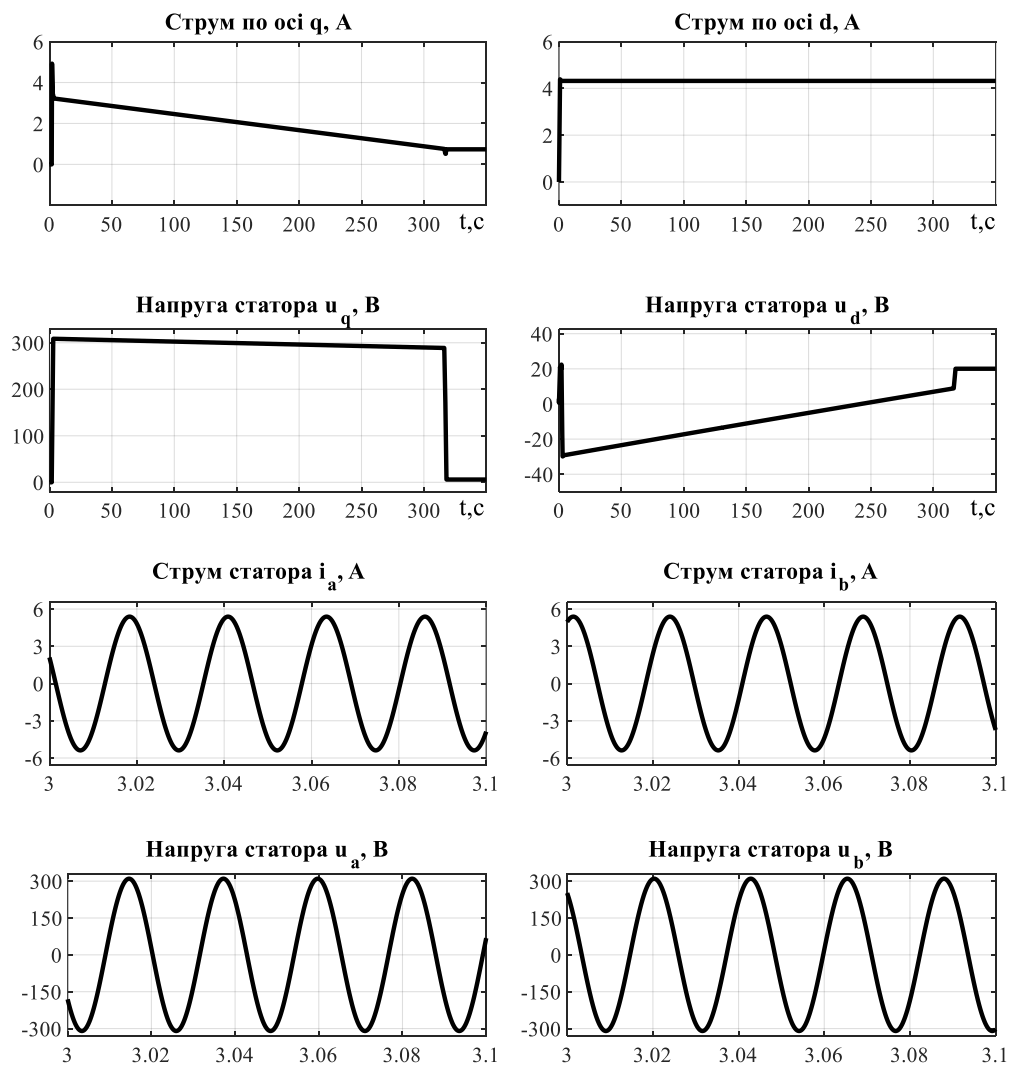


Рисунок 5.4 – Струми та напруги статора в координатах a-b та d-q

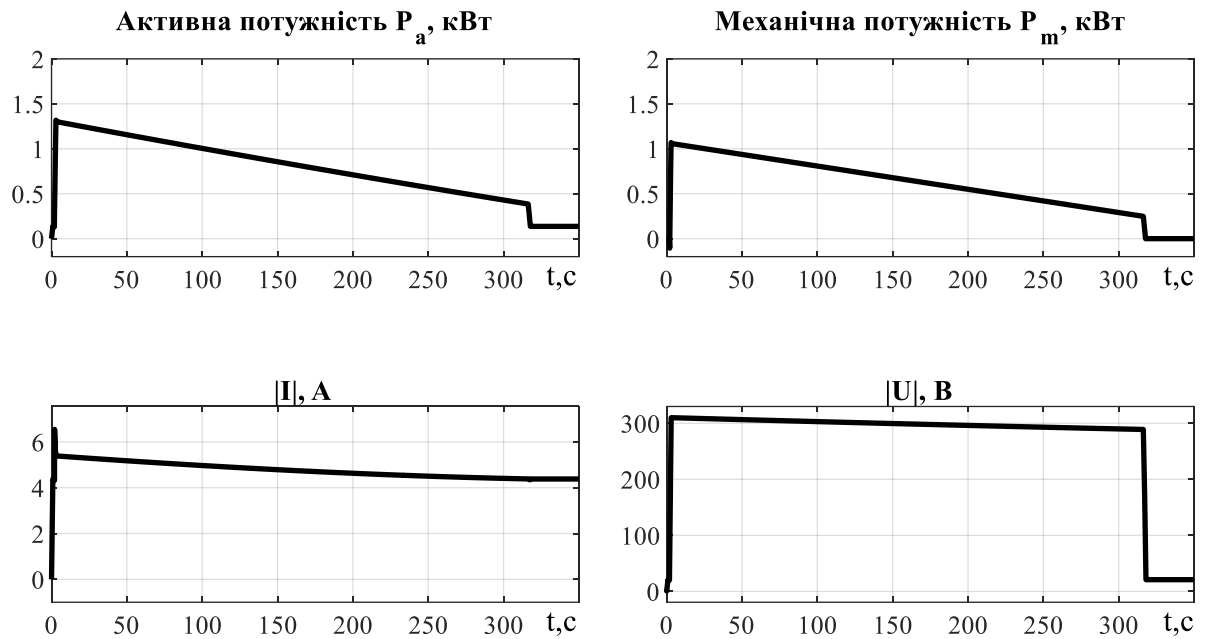


Рисунок 5.5 –Графіки зміни активної та механічної потужностей

Висновки до розділу 5

1. В результаті математичного моделювання, було визначено, що синтезований алгоритм асимптотично відпрацьовує задані траєкторії кутового положення та потокозчеплення ротора. Працездатність синтезованого алгоритму досліджено за допомогою пакету програм Matlab Simulink.

ВИСНОВКИ

1. В даному дипломному проекті була здійснена автоматизація регулювання тиску у вузлі редукування газорозподільної станції, шляхом встановлення електроприводу на запірно-регулювальну арматуру газопроводу.

2. На основі літературного огляду та бази сучасних технічних рішень в якості запірно-регулювальної арматури була обрана засувка типу 30с976нж під електропривод.

3. На основі розрахунків потужності і зусиль, необхідних для обертання шпинделю засувки, який в свою чергу перекриває потік робочого середовища в газопроводі і формує необхідне значення тиску на виході, було обрано загальнопромисловий асинхронний двигун серії 4A100L8У3. Також був здійснений розрахунок необхідної кількості обертів шпинделю і відповідно кутового положення валу двигуна, що для встановлення клину засувки у потрібне положення, що відповідає необхідному вихідного тиску.

4. Для керування кутовим положення засувки синтезовано алгоритм прямого векторного керування кутовим положенням та поткозчепленням зі спостерігачем пониженого порядку.

5. Методом математичного моделювання в середовищі Simulink було перевірено працездатність алгоритму, результати моделювання показали, що система асимптотично відпрацьовує траєкторію третього порядку за кутовим положенням та траєкторію другого порядку за потокозчепленням при типовому для такого класу систем навантаженні.

6. Для керування електроприводом був обраний перетворювач частоти типу Altivar 71. В якості комутаційного приладу був обраний автоматичний вимикач EZ9F34306. Для включення або виключення електричних ланцюгів були обрані контактори типу Schneider electric LC1K0610M7, реле DILER-31 та модулі допоміжних контактів 40DILE. Також були обрані редуктори типу CM130 та енкодери Kuebler 9081. В якості місцевих датчиків тиску були обрані манометри типу ТМ-10 та дифманометри типу ДСП-160-М1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Газпром. Редукування газу. URL: <http://stavropol-tr.gazprom.ru/press/news/2019/02/801/> (дата звернення: 22.05.2019).
2. Єврогазмонтаж. Газорозподільні станції. URL: <http://eurogas.kiev.ua/services/design/the-reduction-nodes-adjusting-and-timing/gds-gas-distribution-station/> (дата звернення: 12.05.2019).
3. ОАО «ГАЗПРОМ»/Номенклатурный перечень газораспределительных станций магистральных газопроводов/ВРД 39–1.8–022–2001. URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293799/4293799373.htm> (дата звернення: 22.05.2019).
4. Вузол редукування газу. URL: https://studbooks.net/2332422/tehnika/uzel_redutsirovaniya_gaza (дата звернення: 22.05.2019).
5. Привід арматури. https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрический_привод_арматуры (дата звернення: 22.05.2019).
6. Гуревич Д.Ф. Расчёт и конструирование трубопроводной арматуры: расчёт трубопроводной арматуры. М.: ЛКИ, 2008. 480 с.: ил. – ISBN 978–5–382–00666–6.
7. Електропривод трубопровідної арматури. <http://bankpatentov.ru/node/431329> (дата звернення: 22.05.2019).
8. Електроприводи трубопровідної арматури. URL: http://elprivod.nmu.org.ua/ua/science/ED_pipe_fittings.php (дата звернення: 22.05.2019).
9. Вузол редукування газу. URL: zakupki.gov.ru/223/purchase/public/download/download.html?id=43810162 (дата звернення: 22.05.2019).
10. Офіційний постачальник трубопровідної арматури. URL: <https://promarmateh.com.ua/zadvizhki-pod-elektroprivod/zadvizhka-30s976nzh-pod-elektroprivod> (дата звернення: 22.05.2019).
11. Плотников П. Н., Недошивина Т. А.. Запорная задвижка с приводной головкой. Расчет и конструирование: учебно–методическое пособие Екатеринбург : 2015. 136 с. ISBN: 978–5–7996–1392–1

12. Матеріали основних деталей засувки. URL: <http://reductor.su/zadvizhka-30s976nzh-dn-50-200-pn-63.html> (дата звернення: 22.05.2019).
13. Параметри арматури. URL: <https://dn.ru/storage/certificates/saz/saz-teh-info-zadvijki-stal.pdf> (дата звернення: 22.05.2019).
14. Технічні характеристики засувки 30с976нж. URL: <https://2211.com.ua/p34819458-zadvizhka-stalnaya-30s976nzh.html> (дата звернення: 22.05.2019).
15. Технічні характеристики засувки. URL: <http://www.mztpa.ru/catalog/products/1/39/77> (дата звернення: 22.05.2019).
16. Трубопроводная арматура. Методичні вказівки до лабораторних і практичних занять. URL: [http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/z/ZGR/study/Трубопроводная %20арматура.pdf](http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/z/ZGR/study/Трубопроводная%20арматура.pdf) (дата звернення: 22.05.2019).
17. Регулююча арматура. URL: <http://krantruba.ru/30s976nzh-zadvizhka-klinovalaya-pod-e> (дата звернення: 22.05.2019).
18. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И., Соболенская Е. А. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1982. 504с.
19. СВ Альтера. URL: <http://www.svaltera.ua/catalog/996/1274.php> (дата звернення: 02.06.2019).
20. Каталог двигунів серії 4А. URL: <https://slemz.com.ua/news/gabaritno-prisoedinitelnye-razmery-elektrovdigateley-4am-massy-tablica> (дата звернення: 02.06.2019).
21. Каталог перетворювачів частоти Altivar 71. URL: https://chastotnik.com.ua/media/manuals/Преобразователи%20частоты/Schneider_Electric/Altivar_71/ATV71_catalogue2011_rus.pdf (дата звернення: 02.06.2019).
22. Перетворювач частоти Altivar 71. URL: <https://chastotnik.com.ua/Schneider+Electric-r-ATV71HU22N4> (дата звернення: 02.06.2019).
23. Дроселі Shneider electric. URL: <https://www.se.com/ru/ru/product/VW3A4552/сетевой-дроссель-4mh-10a/> (дата звернення: 02.06.2019).

24. Автоматичні вимикачі Shneider electric. URL: https://axiomplus.com.ua/avtomaticheskie-vyklyuchateli/?naprjazhenie=2028&nominal_nyj_tok=1604&proizvoditel=1845/ (дата звернення: 02.06.2019).
25. Контактори. URL: <https://axiomplus.com.ua/kontaktery/> (дата звернення: 02.06.2019).
26. Контактори. URL: <https://electrica-shop.com.ua/files/Contaltors-Ea ton-Moeller.pdf> (дата звернення: 02.06.2019).
27. Каталог енкодерів. URL: http://www.kuebler.com.ua/?inc=products/01_encoders/03_absolut_multi (дата звернення: 02.06.2019).
28. Каталог манометрів. URL: <https://rosma.spb.ru/manometers/> (дата звернення: 02.06.2019).
29. Каталог дифманометрів. URL: http://pp-66.ru/katalog/perepad_raznost_davleniy/difmanometry/pokazyvayuschie_1/dsp-160-m1/dsp-160-m1-perepadomer/ (дата звернення: 02.06.2019).
30. Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives. New York: Oxford University Press Inc, 2000.
31. Пересада С. М. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко. м. Київ, 2016.
32. Пересада С. М., Ковбаса С. Н. Прямое векторное управление асинхронным двигателем со свойством глобальной экспоненциальной устойчивости // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". 2002. Ч. 2

**ДОДАТОК А. Matlab файл для розрахунку параметрів
двигуна**

```
clear all;  
clc;  
P2n=15e3;  
U1ln=380;  
pn=2;  
Jd=0.1;  
kkd=0.885;  
cos=0.88;  
lam=2.3;  
Sn=0.023;  
Sk=0.16;  
f=50;  
x1vo=0.085;  
r1vo=0.047;  
x2vo=0.13;  
r2vo=0.025;  
xmvo=4;  
k0=100;  
k1=60;  
k2=30;  
k3=10;  
k4=150;  
k5=200;  
%%  
w0=2*pi*f;  
wxx=w0/pn;  
wn=wxx*(1-Sn);
```

```

Mn=P2n/wn;
Mk=Mn*lam;
U1nf=220;
I1nf=P2n/(3*U1nf*kkd*cos);
Psixx=sqrt(2)*U1nf/w0;
C1=(xmvo+sqrt(xmvo^2+4*x1vo*xmvo))/(2*xmvo);
X1v=x1vo/C1;
R1v=r1vo/C1;
X2v=x2vo/C1^2;
R2v=r2vo/C1^2;
X1=X1v*U1nf/I1nf;
X2=X2v*U1nf/I1nf;
R1=R1v*U1nf/I1nf;
R2=R2v*U1nf/I1nf;
Xm=xmvo*U1nf/I1nf;
L1sg=X1/w0;
L2sg=X2/w0;
Lm=Xm/w0;
L1=L1sg+Lm;
L2=L2sg+Lm;
%%
alf=R2/L2;
alf1=R1/L1;
sgm=L1*(1-Lm^2/(L1*L2));
sgm1=L2*(1-Lm^2/(L1*L2));
bet=Lm/(L2*sgm);
bet1=Lm/(L1*sgm1);
gam=R1/sgm+alf*Lm*bet;
gam1=R2/sgm1+alf1*Lm*bet1;

```