

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

**Аналіз сучасних та перспективних напрямків та методів керування
синхронними двигунами з постійними магнітами**

Виконав: студент групи ЕЕМ-20

Ростислав ЗАСУНЬКО

Керівник випускної роботи _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Нормо контролер _____

к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК

Декан ЕТФ _____

к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____

к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗАСУНЬКО Ростислав Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз сучасних та перспективних напрямків та методів
керування синхронними двигунами з постійними магнітами

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка сучасних та перспективних напрямків та методів керування синхронними двигунами з постійними магнітами
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз тягових електроприводів з синхронним двигуном з постійними магнітами; II. Система імпульсного керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами; III. Моделювання роботи тягового електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Синхронні двигуни з постійними магнітами; II Система з імпульсним регулюванням СДПМ із АІН на базі ШПП; III. Структурна схема системи регулювання; IV. Структурна схема замкненої системи з імпульсним регулятором; VI. Перехідних процесів у СДПМ з замкненою імпульсною САР.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор СІНЧУК		
II	Ігор СІНЧУК		
III	Ігор СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Застосування тягових електроприводів з синхронним двигуном	10.05.24
2	Системи керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном	17.05.24
3	Імпульсне керування тяговим електроприводом	24.05.24
4	Система ШП – СДПМ	26.05.24
5	Математична модель системи електроприводу з синхронним двигуном	28.05.24
6	Математична модель системи електроприводу з керуванням у функції моменту	04.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Ростислав ЗАСУНЬКО
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Аналіз сучасних та перспективних напрямків та методів керування синхронними двигунами з постійними магнітами»

Об'єкт розробки – тяговий електропривод з синхронним двигуном з постійними магнітами.

У першому розділі проаналізовано електричні схеми синхронного електроприводу, виділено такі режими роботи як гальмування, показано основні напрями підвищення енергетичної ефективності синхронного електропривода за рахунок використання сучасних систем керування.

У другому розділі була розроблена математична модель системи керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами та проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах синхронного електроприводу.

У третьому розділі було проведено вибір комп'ютерної моделі для дослідження роботи електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами, обрана й обґрунтована її структура, проведено аналіз електромагнітних процесів при роботі синхронного електроприводу в режимах пуску та гальмування.

СИНХРОННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД, ІМПУЛЬСНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПОСТІЙНІ МАГНІТИ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз тягових електроприводів з синхронним двигуном з постійними магнітами.....	8
1.1. Застосування тягових електроприводів з синхронним двигуном.....	8
1.2. Системи керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном	12
Розділ 2. Система імпульсного керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами	21
2.1. Імпульсне керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном.....	21
2.2. Система ШП – СДПМ	28
Розділ 3. Моделювання роботи тягового електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами.....	35
3.1. Математична модель системи електроприводу з синхронним двигуном	35
3.2. Математична модель системи електроприводу з синхронним двигуном та керуванням у функції моменту	43
Висновки	52

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Сучасні системи електричного приводу мають задовольняти усім вимогам що висуваються до можливості їх ефективного функціонування у складі технологічної установки.

Не останньою вимогою при цьому виступає відповідність їх складових елементів за масо-габаритними параметрами технологічного устаткування.

Доволі високий рівень відтворення щільності крутного моменту у відношенні до масо-габаритних показників системи електроприводу мають синхронні двигуни.

Синхронні електричні машини можна представити в залежності від реалізації структури їх збудження.

Висновок щодо відповідності той чи іншої структури можна зробити розглянувши режими їх роботи.

З аналізу електричних схем синхронного електроприводу можна виділити режими пуску та гальмування.

Завдяки поліпшенню функціонування систем електричного приводу у цих режимах можливе поліпшення функціонування електроприводу й у цілому.

Поліпшення функціонування електроприводу у цих режимах можливе завдяки розробки системи ефективного керування.

Для дослідження ефективності функціонування системи керування синхронним електроприводом слід скласти математичну модель для дослідження режимів її роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки математичному моделюванню можна зробити висновок про ефективність роботи системи керування.

Про цей процес можуть свідчити отримані графіки струмів та напруги у режимах пуску та гальмування.

З графіків частоти обертання можна зробити висновок про фактичну відсутність коливального процесу у контурі частоти обертання синхронної машини.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Аналіз тягових електроприводів з синхронним двигуном з постійними магнітами

1.1. Застосування тягових електроприводів з синхронним двигуном

Синхронні машини дуже широко застосовуються у якості тягових привідних двигунів.

Подібне застосування висуває певні умови щодо конструкції та функціональних можливостей.

Використовуються для реалізації таких структур вентильні схеми електричних машин.

Широке застосування вентильних електричних двигунів у структурах електроприводу обумовлено:

- простотою реалізації їх конструкції;
- надійністю експлуатаційних показників;
- низьким рівнем витрат на їх обслуговування;
- високими енергетичними показниками.

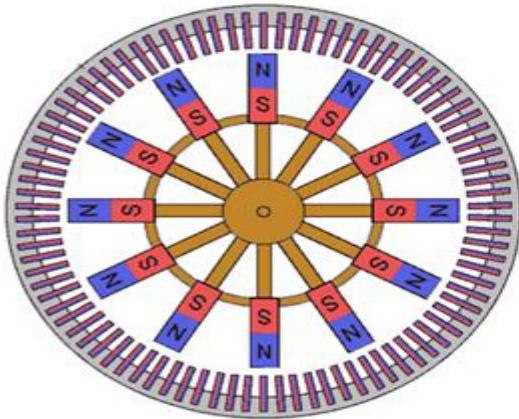
Слід зазначити що подібні структури відрізняються високими вимогами щодо їх виконання.

Також слід додати що такі структури мають забезпечувати високу перевантажувальну здатність при пуску.

Також додатковим моментом буде зазначити про необхідність використання датчиків для забезпечення їх функціонування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05				
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>	
<i>Розробив</i>		Засвнсько Р.А.						8	13
<i>Перевішив</i>		Сінчук І.О.							
<i>Реценз.</i>									
<i>Н. Контр.</i>		Сінчук І.О.							
<i>Затвердив</i>		Пересунько І.І.							
						КНУ ЕЕМ-20			

Представимо структуру синхронної машини.



Переваги:

- ❑ Простота конструкції
- ❑ Надійність в експлуатації
- ❑ Низькі витрати на обслуговування
- ❑ Високі енергетичні показники (ККД, $\cos\phi$)

Недоліки:

- ❑ Висока собівартість
- ❑ Велика кратність пускового струму

Рис 1.1 Конструкція СДПМ

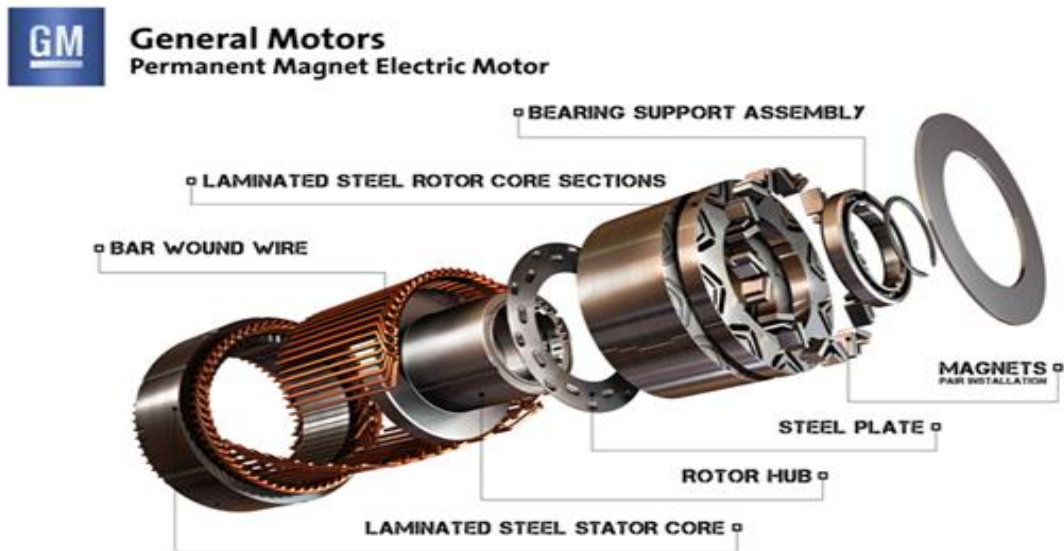


Рис 1.2 Конструкція ротора СДПМ

Основні параметри подібних структур наведені у таблицях.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Таблиця 1.

Оператор, країна	Рухомий склад	Випускає
NTV (Італія)	25 високошвидкісних поїздів AGV	Alston
SBB (Швейцарія)	59 двоповерхових електропоїздів Twindexx	Bombardier
SNCF (Франція)	31 трамвай - поїзд Citadis Dualis	Alston
SNCF (Франція)	Електропоїзда Regiolis (рамковий варіант)	Alston
SNCF (Франція)	Електропоїзда Omneo (рамковий варіант)	Bombardier
Прага (Чехія)	Низькопільні трамвайні вагони 15T	Skoda
Метрополітен Токіо (Японія)	Електропоїзда серії 16000	Kawasaki
JR East	Приміські електропоїзди серії E331 для Токіо	Toshiba
Метрополітен Мюнхена (Німеччина)	Електропоїзд типу 319 з візками типу Syngera	Siemens
Китай	Прототип елемента на паливних елементах	CNR Yongji
Швеція	Електропоїзд Grona Taget	Bombardier
Туреччина	Низькопільний трамвай Citadis X04	Alston
Японія	Поїзд зі змінюваною шириною колії	RTRI

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05

Арк.

10

Таблиця 2.

Найменування	Технічні характеристики синхронних машин			
	Тип	TBB-450- 20YC	TBB-450- 20YC	TBB-450L- 20YC
Потужність	45kw	60kw	80kw	160kw
Напруга живлення	660V	660V	660V	660V
Номинальний струм	46A	56A	82A	180A
Момент на валу	5968Nm	7958Nm	10610Nm	17128Nm
ККД двигуна	93%	93%	93%	94%
Cos f	0.96	0.96	0.96	0.97
Ступінь захисту від н.ср.	IP54	IP54	IP54	IP54
Тип вибухозахисту	Exdi	Exdi	Exdi	Exdi
Вага	2000KG	2300KG	2800KG	5000KG
Довжина	950 mm	1100 mm	1250 mm	1270mm
Висота	450 mm	450 mm	450 mm	560mm

1.2. Системи керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном

Представимо векторну структуру системи керування електроприводом.

Синхронні машини у такій структурі виступають у ролі безколекторних машин постійного струму.

Керування такими системами виконується у функції положення ротора синхронної машини.

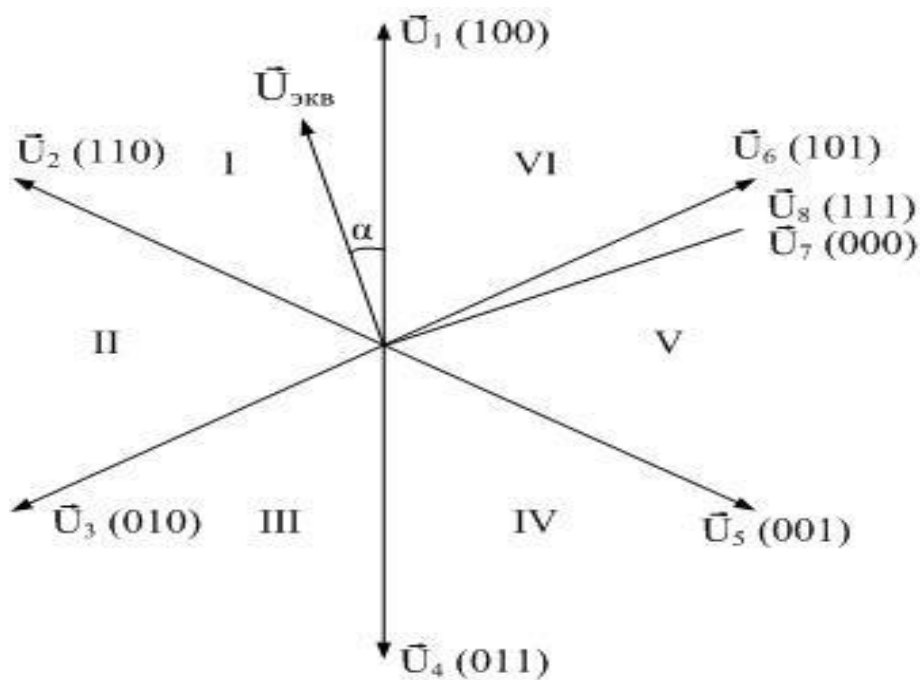


Рис. 1.3 Векторна діаграма напруги

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

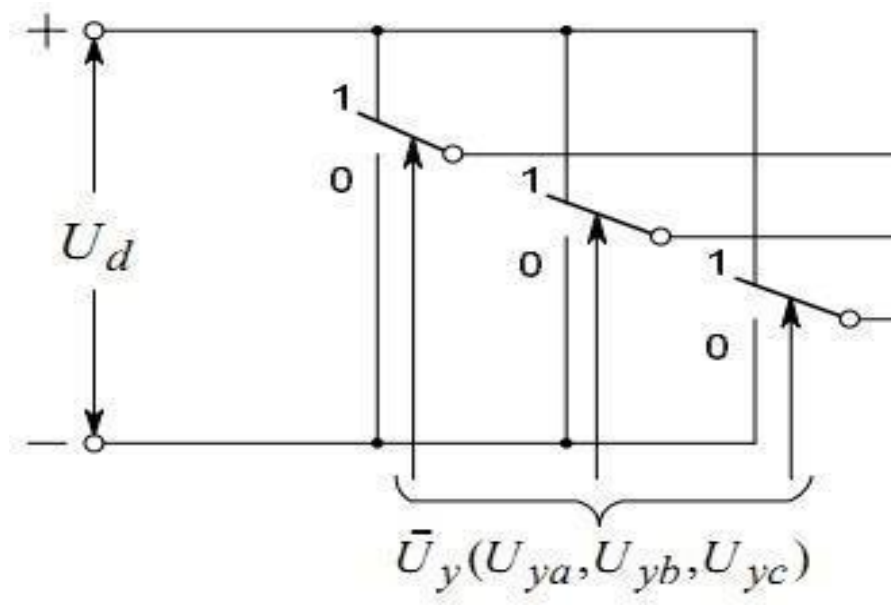


Рис.1.4 Схема заміщення

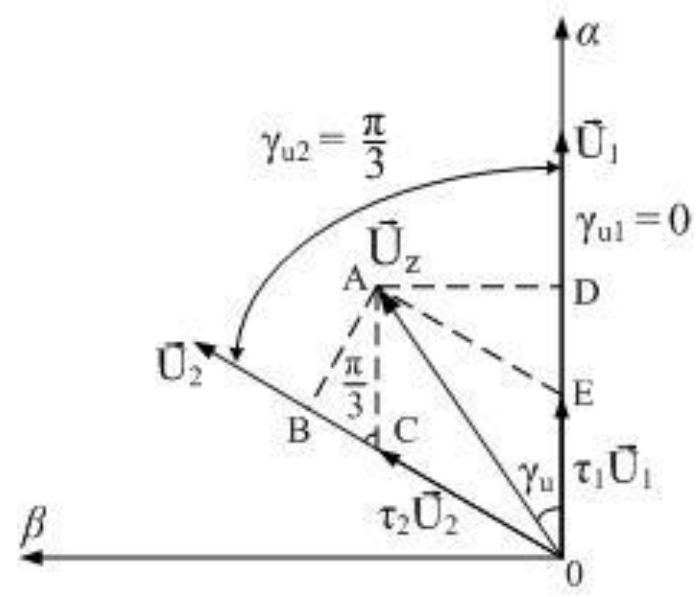


Рис. 1.5 Положення вектору

Вирішення системи рівнянь:

$$\begin{aligned}\vec{U}_z &= \tau_1 \vec{U}_1 + \tau_2 \vec{U}_2 + \tau_3 \vec{U}_8; \\ \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 &= 1\end{aligned}\tag{1.1}$$

За умови:

$$0 \leq \tau_1 \leq 1; 0 \leq \tau_2 \leq 1; 0 \leq \tau_3 \leq 1\tag{1.2}$$

де: τ_1, τ_2, τ_3 – тривалість включення векторів

Представимо задачу лінійного програмування:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} U_{z\alpha} \\ U_{z\beta} \end{bmatrix} &= \tau_1 \begin{bmatrix} U_{1\alpha} \\ U_{1\beta} \end{bmatrix} + \tau_2 \begin{bmatrix} U_{2\alpha} \\ U_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \cos(\gamma_{u1}) & U \cos(\gamma_{u2}) \\ U \sin(\gamma_{u1}) & U \sin(\gamma_{u2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \\ &= U \begin{bmatrix} \cos(\gamma_{u1}) & \cos(\gamma_{u2}) \\ \sin(\gamma_{u1}) & \sin(\gamma_{u2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix},\end{aligned}\tag{1.3}$$

де: $U = \frac{2}{3} U_d$ – модуль вектору напруги;

γ_{u1} і γ_{u2} – кути повороту відносно осі α .

Після перетворення:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \frac{U_z}{U} \frac{\sin(\gamma_{u2} - \gamma_u)}{\sin(\gamma_{u2} - \gamma_{u1})}; \\ \tau_2 &= \frac{U_z}{U} \frac{\sin(\gamma_u - \gamma_{u1})}{\sin(\gamma_{u2} - \gamma_{u1})}; \\ \tau_3 &= 1 - (\tau_1 + \tau_2).\end{aligned}\tag{1.4}$$

Підставимо:

$$\begin{aligned}t_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{U_z}{U} T_u \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma_u\right); \\ t_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{U_z}{U} T_u \sin \gamma_u; \\ t_3 &= T_u - (t_1 + t_2).\end{aligned}\tag{1.5}$$

З геометричних співвідношень:

$$\begin{aligned}|\tau_1 \vec{U}_1| = |AC| &= \frac{|AB|}{\sin \frac{\pi}{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_z \sin\left(\frac{\pi}{3} - \gamma_u\right); \\ |\tau_2 \vec{U}_2| = |AE| &= \frac{|AD|}{\sin \frac{\pi}{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_z \sin \gamma_u.\end{aligned}\tag{1.6}$$

Тоді часові діаграми:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

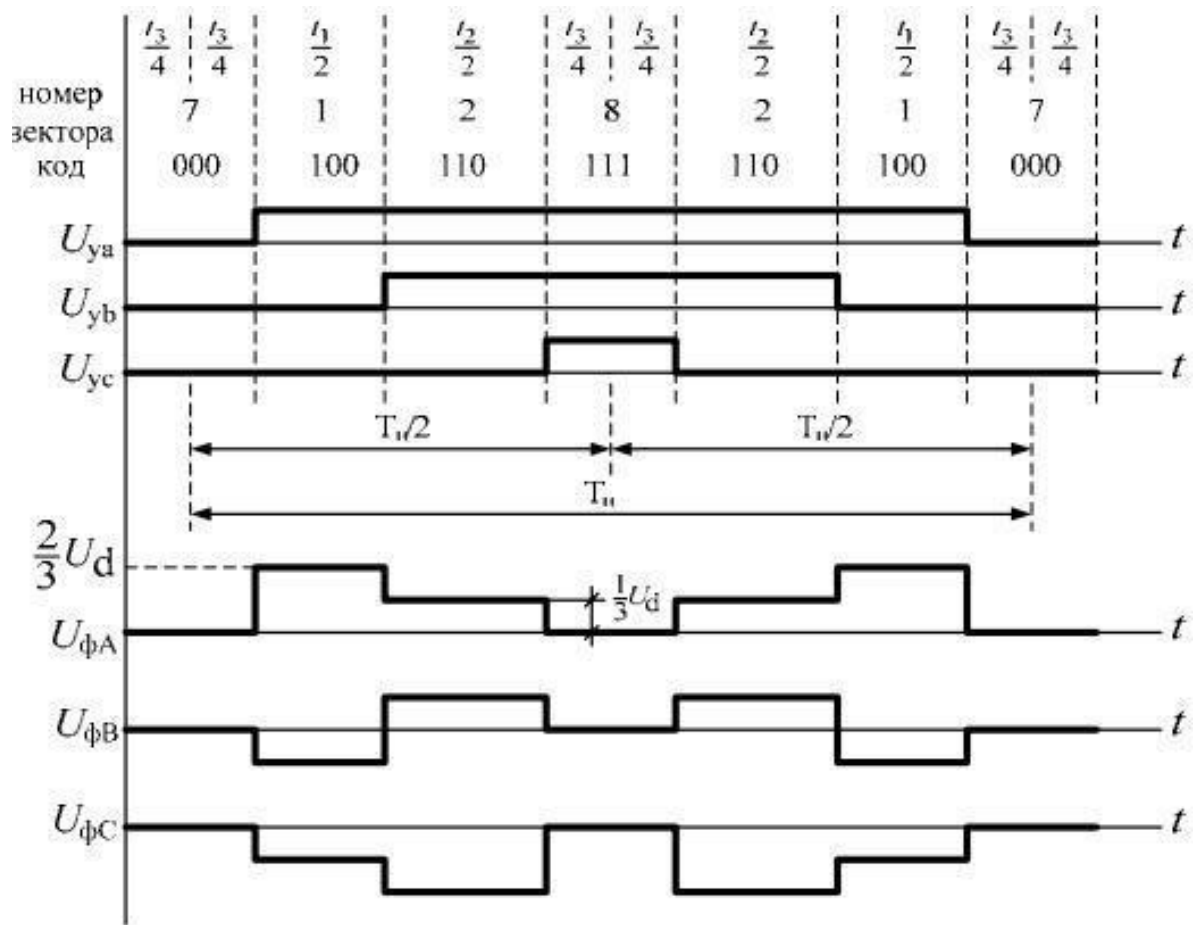


Рис. 1.6 Часові діаграми імпульсних сигналів

Розглянемо систему керування за датчиками положення ротора синхронної машини.

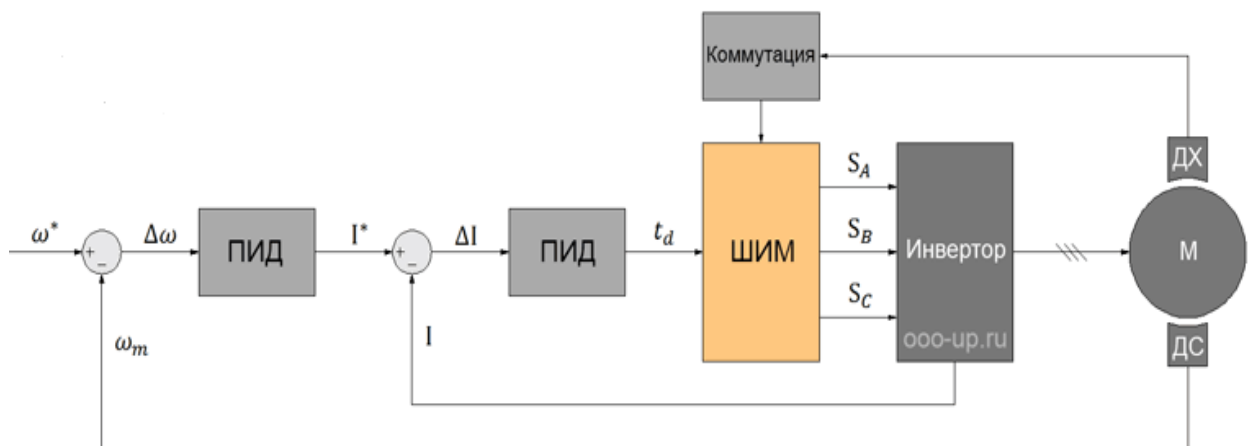


Рис. 1.7 Керування по датчикам

Регулювання швидкості виконується:

1. Залежне регулювання

$$U_n/f_m = \text{const} \quad (1.7)$$

де n і m показники ступеня.

2. Регулювання частоти.
3. Незалежне регулювання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

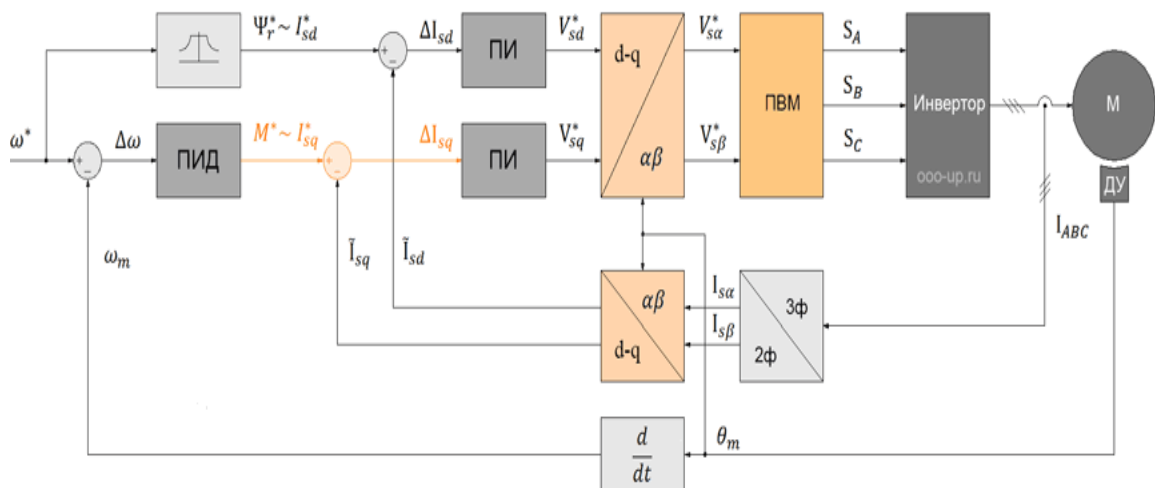


Рис. 1.8 Керування СДПМ за датчиком положення

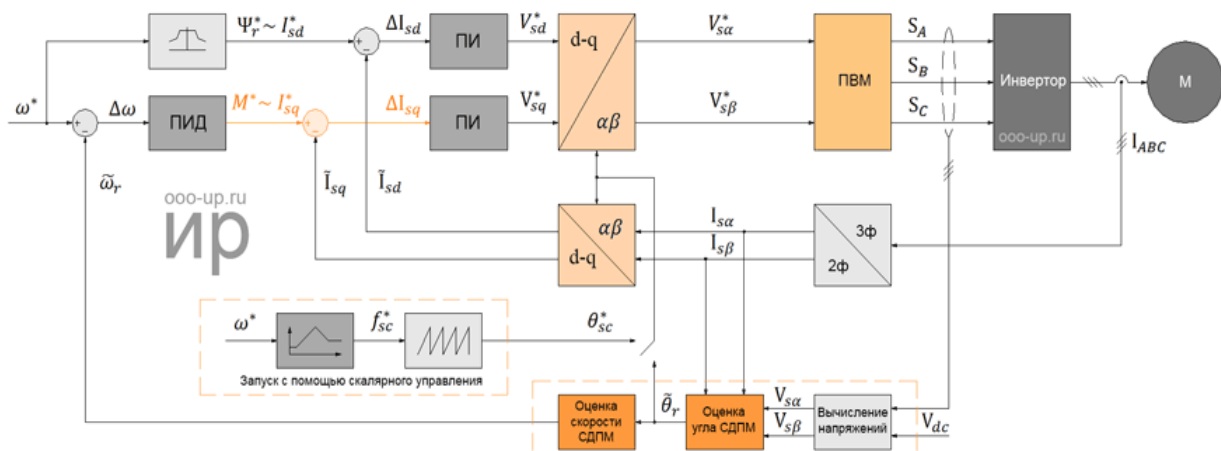


Рис. 1.9 Керування СДПМ без датчика положення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Представимо еквівалентну схему заміщення ротора синхронної машини.

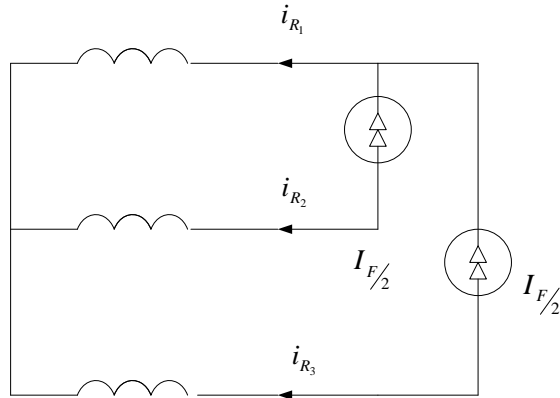


Рис. 1.10 Еквівалентна схема ротора, підключеного до двом джерелам струму

Введемо означення струму [24]:

$$\begin{cases} T_R \frac{di_{mR}}{dt} + i_{mR} = i_{sd} + (1 + \delta_R) i_F \cos(\rho - \varepsilon) \\ \frac{d(\rho - \varepsilon)}{dt} = \omega_{mR} - \omega = \frac{1}{T_R i_{mR}} \left[i_{sq} - (1 + \delta_R) I_F \sin(\rho - \varepsilon) \right] \end{cases} \quad (1.8)$$

де T_R - постійна часу контуру струму намагнічування;

δ_R - коефіцієнт розсіювання;

$\rho - \varepsilon$ характеризує положення вектора потоку (рис.1.11) щодо ротора.

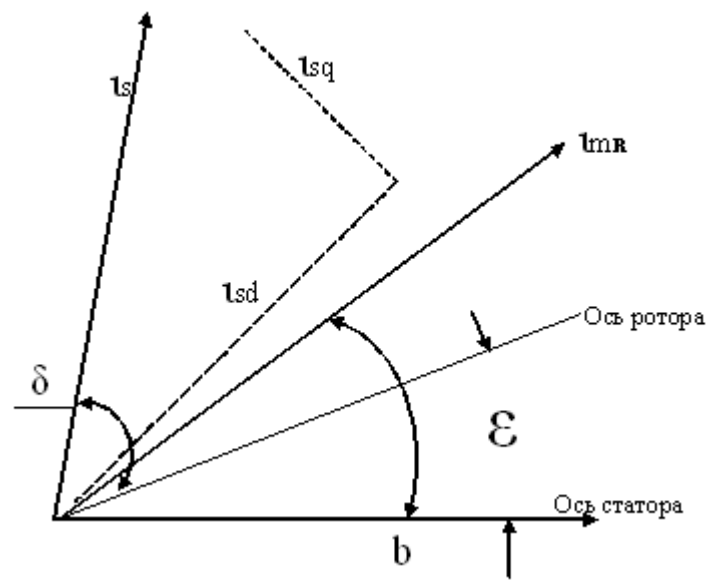
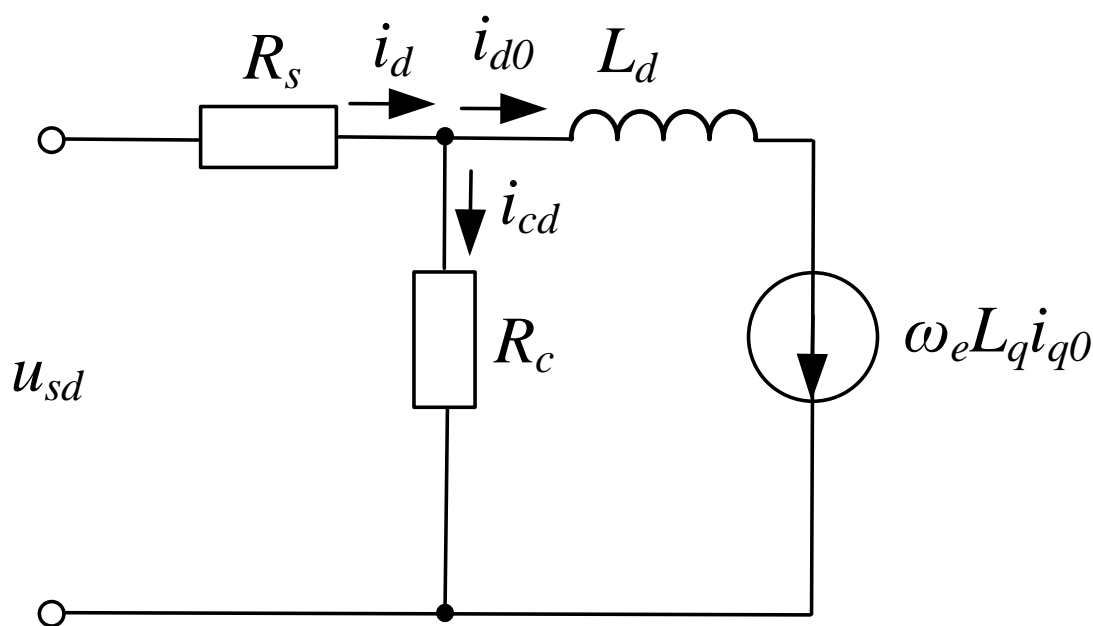


Рис. 1.11 Векторна діаграма струмів

Розділ 2. Система імпульсного керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами

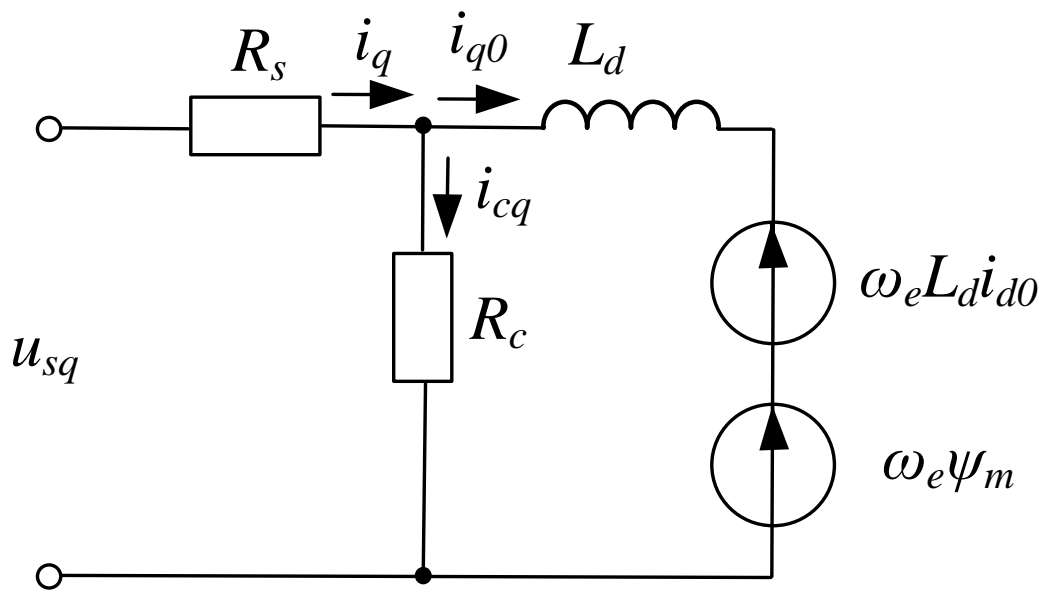
2.1. Імпульсне керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном

Система імпульсного керування синхронним двигуном базується на вирішені системи рівнянь що складено на основі схеми заміщення синхронної машини [25].



а) вісь d

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05					
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2					
Розробив	Засвнсько Р.А.							Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук І.О.							21	14	
Реценз.								КНУ		
Н. Контр.	Сінчук І.О.							ЕЕМ-20		
Затвердив	Пересунько І.І.									



б) вісь q

Рис. 2.1 – Схема заміщення СДПМ

Вираз для обертаючого моменту:

$$m_d = MI_F \cdot i_s e^{-j\varepsilon} = \phi_F i_s \sin \delta = \phi_F \cdot i_q, \quad (2.1)$$

де $\delta = \xi - \varepsilon$ – кут навантаження.

Інша модель в осях d-q [29]:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_s \frac{di_{sd}}{dt} + i_{sd} = \frac{U_{sd}}{R_s} + \omega T_s i_{sq} \\ T_s \frac{di_{sq}}{dt} + i_{sq} = \frac{U_{sq}}{R_s} - \omega T_s i_{sd} - \frac{k}{R_s} \omega \\ \Theta \frac{d\omega}{dt} = \frac{2}{3} k i_{sq} - m \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = \omega \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де Θ - момент інерції, ε – кут повороту, ω – частота обертання, T_s - постійна часу фази статора, R_s – активний опір фази статора.

Розглянемо систему регулювання.

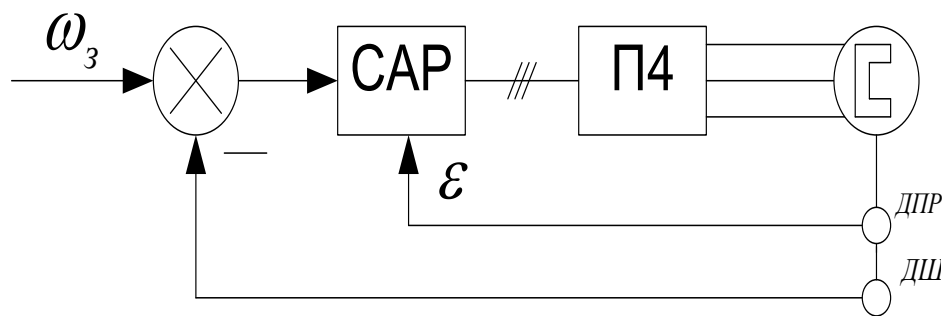


Рис. 2.2 Функціональна схема САР зі СДПМ

Сучасні САР змінного струму представлені наступною схемою.

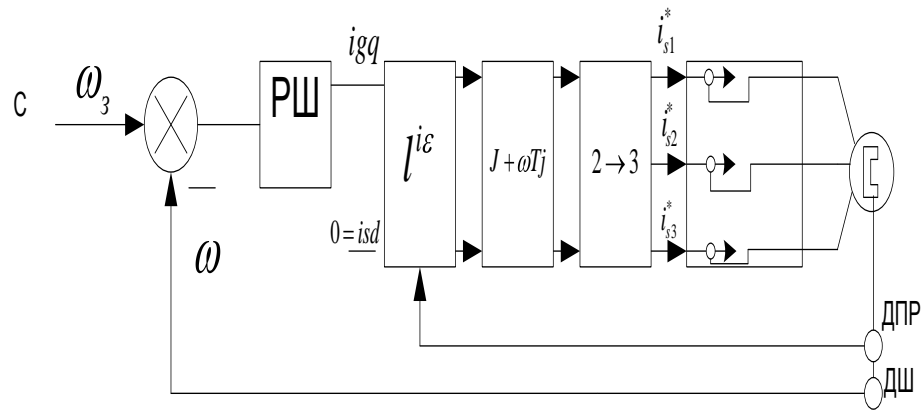


Рис. 2.3 САР СДПМ із векторними перетворювачами.

Контур регулювання фазних струмів:

$$\begin{aligned}
 & i_{sa} = i_{sd} \cos \varepsilon - i_{sq} \sin \varepsilon \\
 \text{"} e^{j\varepsilon} \text{"} & i_{sb} = i_{sd} \cos \varepsilon - i_{sq} \sin \varepsilon
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\text{"} 2 \rightarrow 3 \text{"} \quad i_{s1} = i_{sa}; \quad i_{s2} = -\frac{1}{2}i_{sa} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb}; \quad i_{s3} = -\frac{1}{2}i_{sa} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{sb} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
 & i_{sq} = i_{sb} \cos \varepsilon - i_{sa} \sin \varepsilon \\
 \text{"} e^{-j\varepsilon} \text{"} & i_{sd} = i_{sa} \cos \varepsilon - i_{sb} \sin \varepsilon
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\text{"} 3 \rightarrow 2 \text{"} \quad i_{s1} = i_{sa}; \quad i_{sb} = \frac{i_{s1}}{\sqrt{3} + \sqrt{3}} - \frac{2}{\sqrt{3} + \sqrt{3}}i_{s2} \tag{2.6}$$

Структурна схема цифрового регулювання:

$$\varepsilon' = \varepsilon + \omega \Delta T \tag{2.7}$$

і амплітуду по формулі:

$$I_m = k_1(\omega_3 - \omega) + k_2 \sum_{i=1}^k (\omega_3 - \omega) \quad (2.8)$$

$$i_a = I_m \sin \varepsilon, \quad i_b = I_m \sin(\varepsilon' + 2\pi/3), \quad i_c = -i_a - i_b \quad (2.9)$$

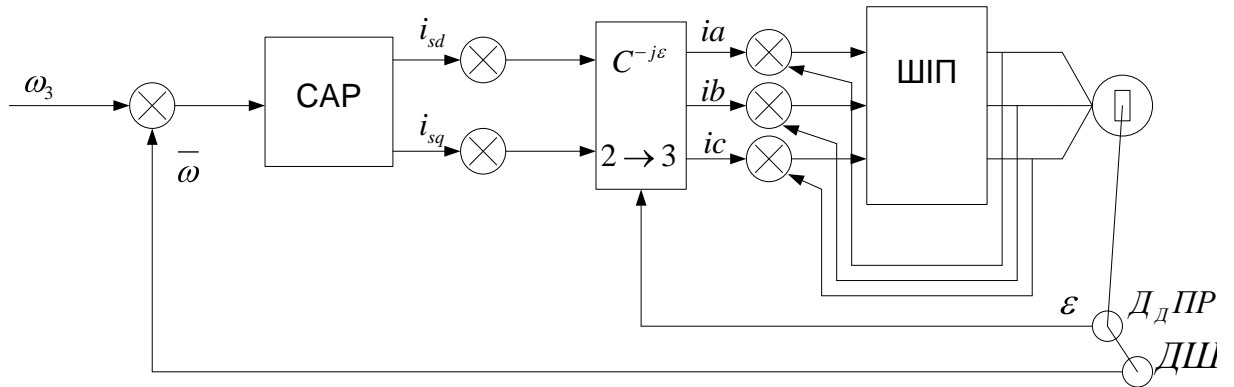


Рис. 2.4 САР СДПМ зі зворотним зв'язком по швидкості

Представимо структуру з автономним інвертором напруги у складі електроприводу.

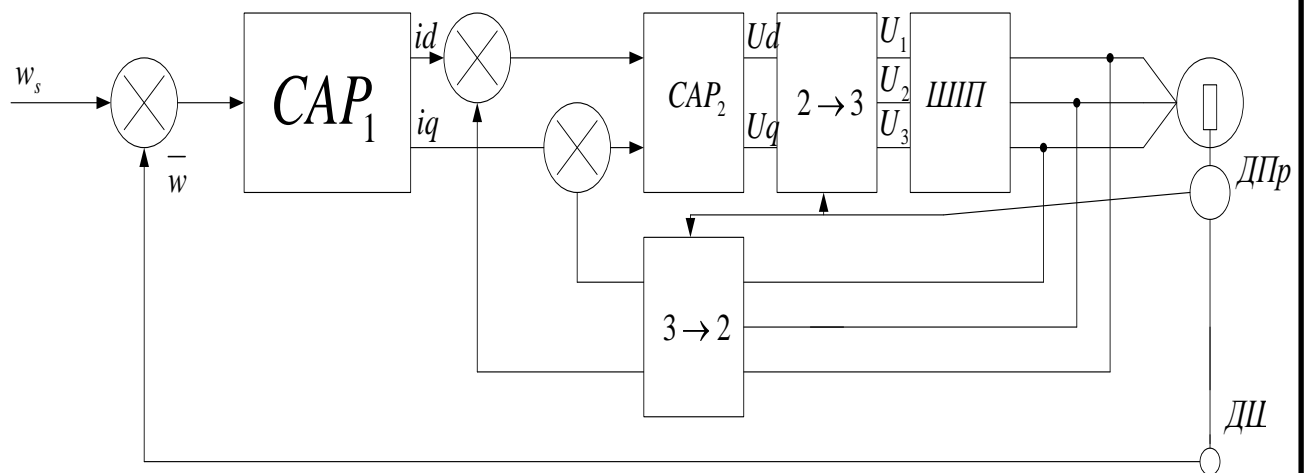


Рис. 2.5 Системи підлеглого регулювання з векторним керуванням СДПМ із АІН на базі ШПП

Представимо загальну структуру системи керування.

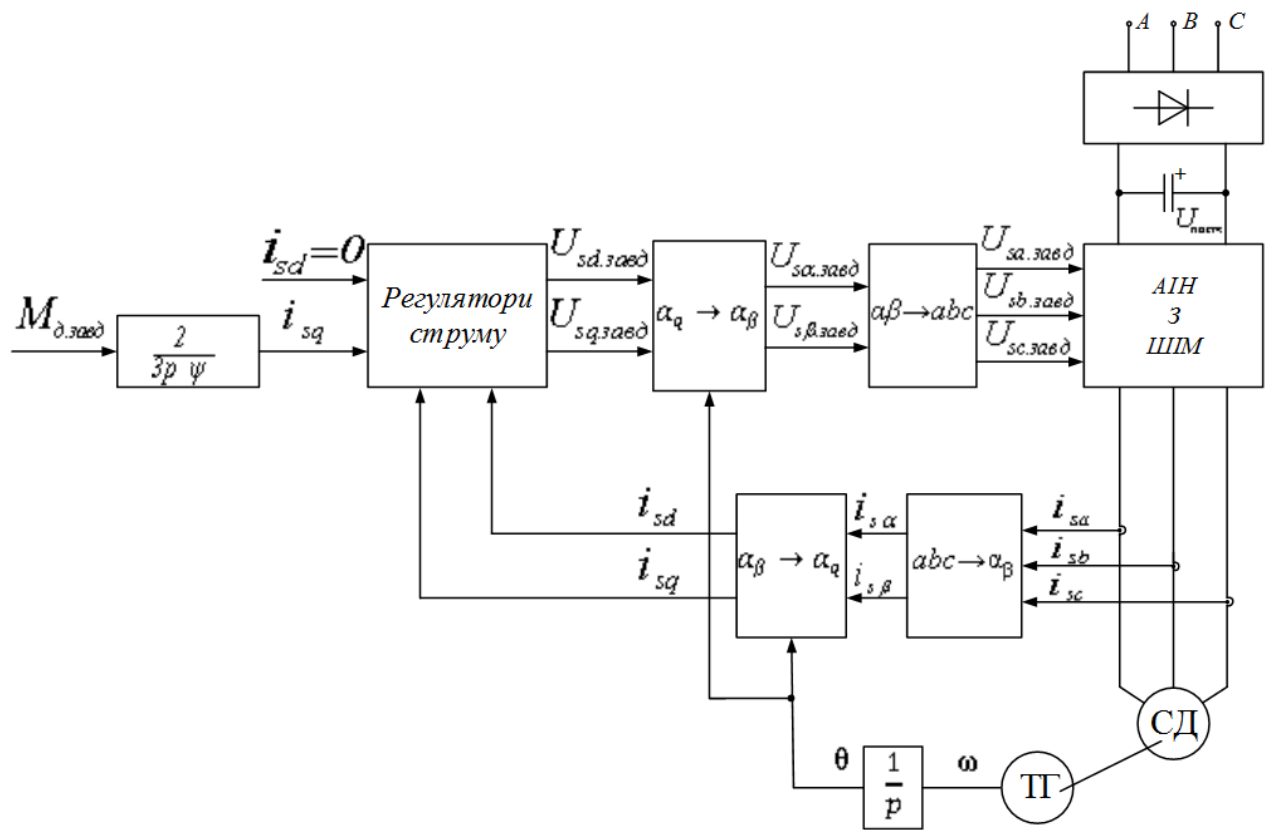


Рис. 2.6 Система керування СДПМ

2.2. Система ШП – СДПМ

Запишемо рівняння:

$$\begin{cases} U_1 = n_1(r_s + L_d p) + n_2 M_{dD} p \\ 0 = n_1 M_D p + n_2(L_D p + r_D) \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1 p = U_1 L_d^{-1} - n_1 r_s L_d^{-1} - n_2 p M_{dD} L_d^{-1} \\ n_2 p = -n_1 p M_D L_D^{-1} - n_2 r_D L_D^{-1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1 p = U_1 L_d^{-1} - n_1 r_s L_d^{-1} - M_{dD} L_d^{-1} (-n_1 p M_D L_D^{-1} - n_2 r_D L_D^{-1}) \\ n_2 p = -M_D L_D^{-1} (U_1 L_d^{-1} - n_1 r_s L_d^{-1} - n_2 p M_{dD} L_D^{-1}) - n_2 r_D L_D^{-1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_1 p (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1}) = -n_1 r_s L_d^{-1} + n_2 r_D L_d^{-1} M_{dD} L_d^{-1} + U_1 L_d^{-1} \\ n_2 p (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1}) = n_1 r_s L_d^{-1} M_D L_D^{-1} - n_2 r_D L_D^{-1} - U_1 M_D L_D^{-1} L_d^{-1} \end{cases}$$

Векторне неоднорідне рівняння:

$$\frac{dn}{dt}(t) = An(t) + BU_1(t)$$

де

$$A = \begin{vmatrix} -r_s L_d^{-1} (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} & r_D L_D^{-1} M_{dD} L_d^{-1} (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} \\ r_s L_d^{-1} L_D^{-1} (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} & -r_D L_D^{-1} (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix};$$

$$B = \begin{vmatrix} L_d^{-1} (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} \\ -L_d^{-1} L_D^{-1} M_D (1 - M_{dD} M_D L_d^{-1} L_D^{-1})^{-1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}.$$

При малому періоді дискретності:

$$n(t) = n_0 \ell^{At} + \int_0^t \ell^{A(t-\tau)} B U_1 d\tau = n_0 \ell^{At} + \ell^{At} \cdot B \cdot U_1 \cdot \int_0^t \ell^{-A\tau} d\tau$$

Перехідна матриця:

$$\ell^{At} = I + A \cdot t = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} t = \begin{vmatrix} 1 + a_{11}t & a_{12}t \\ a_{21}t & 1 + a_{22}t \end{vmatrix}$$

тоді

$$\ell^{-A\tau} = \begin{vmatrix} 1 - a_{11}\tau & -a_{12}\tau \\ -a_{21}\tau & 1 - a_{22}\tau \end{vmatrix}$$

$$\int_0^T \ell^{-A\tau} d\tau = \int_0^T \begin{vmatrix} 1 - a_{11}\tau & -a_{12}\tau \\ -a_{21}\tau & 1 - a_{22}\tau \end{vmatrix} d\tau = \begin{vmatrix} T - a_{11} \frac{T^2}{2} & -a_{12} \frac{T^2}{2} \\ -a_{21} \frac{T^2}{2} & T - a_{22} \frac{T^2}{2} \end{vmatrix} = A''$$

$$n \begin{vmatrix} z+1 \\ \bar{z} \end{vmatrix} = n \begin{vmatrix} z \\ \bar{z} \end{vmatrix} x \ell^{AT} + U \cdot B';$$

$$\ell^{AT} = A' = \begin{vmatrix} 1 + a_{11}T & a_{12}T \\ a_{21}T & 1 + a_{22}T \end{vmatrix}$$

де

$$\begin{aligned} B' &= \ell^{AT} \cdot B \cdot \begin{vmatrix} T - a_{11} \frac{T^2}{2} & -a_{12} \frac{T^2}{2} \\ -a_{21} \frac{T^2}{2} & T - a_{22} \frac{T^2}{2} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} 1 + a_{11}T & a_{12}T \\ a_{21}T & 1 + a_{22}T \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{11}'' & a_{12}'' \\ a_{21}'' & a_{22}'' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11}' & a_{12}' \\ a_{21}' & a_{22}' \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{11}'' & a_{12}'' \\ a_{21}'' & a_{22}'' \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} ba_{11}' & ba_{12}' \\ ba_{21}' & ba_{22}' \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{11}'' & a_{12}'' \\ a_{21}'' & a_{22}'' \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} a_{11}'' (ba_{11}' + ba_{12}') + a_{12}'' (ba_{21}' + ba_{22}') \\ a_{21}'' (ba_{11}' + ba_{12}') + a_{22}'' (ba_{21}' + ba_{22}') \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} b_1' \\ b_2' \end{vmatrix} \end{aligned}$$

У такий спосіб

$$n \begin{vmatrix} z+1 \\ \bar{z} \end{vmatrix} = n \begin{vmatrix} z \\ \bar{z} \end{vmatrix} \cdot A' + U_1 \cdot B';$$

Проінтегруємо:

$$n \int_{-1}^{+1} \bar{z} \bar{z} \bar{z} = \bar{n}_{cp} \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times A + B \times \bar{U}_1 \int_{-1}^{+1} \bar{z};$$

середнє значення:

$$n \int_{-1}^{+1} \bar{z} \bar{z} \times A' = \bar{U}_1 \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times B'$$

$$n \int_{-1}^{+1} \bar{z} \bar{z} = \bar{n}_{cp} \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times A + B \times U_1 \int_{-1}^{+1} \bar{z}$$

В Z формі:

$$n \int_{-1}^{+1} (Z - A') \bar{z} = U_1 \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times B'$$

$$n \int_{-1}^{+1} (Z - I) \bar{z} = \bar{n}_{cp} \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times A + U_1 \int_{-1}^{+1} \bar{z} \times B$$

або

$$|n| \times \begin{vmatrix} Z - a_{11}' & -a_{12}' \\ -a_{21}' & Z - a_{22}' \end{vmatrix} = U_1 \begin{vmatrix} b_1' \\ b_2' \end{vmatrix} Z$$

$$|n| \times \begin{vmatrix} Z - 1 & 0 \\ 0 & Z - 1 \end{vmatrix} = |\bar{n}_{cp}| \times \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} Z + U_1 \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} Z$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк. 31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z \times \bar{n}_{cp} \times \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = U_1 Z \begin{vmatrix} b_1' \\ b_2' \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Z - a_{11}' & -a_{12}' \\ -a_{21}' & Z - a_{22}' \end{vmatrix}^{-1} \begin{vmatrix} Z - 1 & 0 \\ 0 & Z - 1 \end{vmatrix} - U_1 Z \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} n_{1cp} \\ n_{2cp} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = U_1 \left\{ \begin{vmatrix} b_1' \\ b_2' \end{vmatrix} \times \frac{1}{(Z - a_{11}') (Z - a_{22}') - a_{12}' a_{21}'} \times \begin{vmatrix} Z - a_{22}' & a_{21}' \\ a_{12}' & Z - a_{11}' \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Z - 1 & 0 \\ 0 & Z - 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \right\}$$

$$\begin{vmatrix} n_{1cp} \\ n_{2cp} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 \end{vmatrix} = U_1 \left\{ \frac{\begin{vmatrix} b_1' (Z - a_{22}') + b_2' a_{21}' \\ b_1' a_{12}' + b_2' (Z - a_{11}') \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} Z - 1 & 0 \\ 0 & Z - 1 \end{vmatrix}}{Z^2 - Z(a_{11}' + a_{22}') + a_{11}' a_{12}' - a_{12}' a_{21}'} - \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \right\} =$$

$$= U_1 \frac{\left\{ \begin{vmatrix} (Z - 1) \times \begin{bmatrix} b_1' (Z - a_{22}') + b_2' a_{21}' \\ b_1' a_{12}' + b_2' (Z - a_{11}') \end{bmatrix} \\ b_1 \begin{bmatrix} Z^2 - Z(a_{11}' + a_{22}') + a_{11}' a_{12}' - a_{12}' a_{21}' \end{bmatrix} \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} Z^2 - Z(a_{11}' + a_{22}') + a_{11}' a_{12}' - a_{12}' a_{21}' \end{bmatrix} \right\}}{Z^2 - Z(a_{11}' + a_{21}') + a_{11}' a_{22}' - a_{12}' a_{21}'}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$\begin{aligned}
& \begin{vmatrix} n_{1cp} \\ n_{2cp} \end{vmatrix} \times (Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{12} - a'_{12}a'_{21}) = \\
& = U_1 \begin{vmatrix} (Z-1) \times [b'_1(Z - a'_{22}) + b'_2 a'_{21}] - b_1 [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] \\ (Z-1) \times [b'_1 a'_{12} + b'_2(Z - a'_{11})] - b_1 [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] \end{vmatrix} \times \\
& \quad \times \frac{\begin{vmatrix} a_{22} & -a_{21} \\ -a_{12} & a_{11} \end{vmatrix}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \\
& \begin{vmatrix} n_{1cp} \\ n_{2cp} \end{vmatrix} \times \left[Z^2 - Z'(a'_{11} + a'_{22}) + Z^0(a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}) \right] (a_{11}a_{12} - a_{12}a_{21}) = \\
& = U_1 \begin{vmatrix} (Z-1)a_{22} [b'_1(Z - a'_{22}) + b'_2 a'_{21}] - b_1 a_{22} [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] - \\ - a_{12}(Z-1) \cdot [b'_1 a'_{12} + b'_2(Z - a'_{11})] + b_2 a_{12} [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] \\ (Z-1)(-a_{21}) \cdot [b'_1(Z - a'_{22}) + b'_2 a'_{21}] + b_1 a_{21} [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] + \\ + a_{11}(Z-1) \cdot [b'_1 a'_{12} + b'_2(Z - a'_{11})] + b_2 a_{12} [Z^2 - Z(a'_{11} + a'_{22}) + a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}] \end{vmatrix} = \\
& = U_1 \begin{vmatrix} a_{22}b'_1 Z^2 - Z(a'_{22} + 1)a_{22}b'_1 + a_{22}b'_1 a'_{22} + Za_{22}a'_{21}b'_2 - a_{22}b'_2 a'_{21} - b_1 a_{22}Z^2 + \\ + Zb_1 a_{22}(a'_{11} + a'_{22}) - b_1 a_{22}(a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}) - a_{12}b'_1 a'_{12} Z + a_{12}b'_1 a'_{12} - \\ - Z^2 a_{12}b_2 + Za_{12}b'_2(1 + a'_{11}) - a_{12}b'_2 a'_{11} + Z^2 a_{12}b_2 - Zb_2 a_{12}(a'_{11} + a'_{22}) + \\ + b_2 a_{12}(a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}) \\ - a_{21}b'_1 Z^2 + a_{21}b'_1 Z(1 + a'_{22}) - a_{21}b'_1 a'_{22} - Za_{21}b'_2 a'_{21} + a_{21}b'_2 a'_{21} + \\ + Z^2 b_2 a_{12} - Zb_2 a_{12}(a'_{11} + a'_{22}) + b_2 a_{12}(a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}) + Za_{11}b'_1 a'_{12} - \\ - a_{11}b'_1 a'_{12} + a_{11}b'_2 Z^2 - a_{11}b'_2 Z(1 + a'_{11}) + a_{11}b'_2 a'_{11} - Z^2 b_2 a_{11} + Zb_2 a_{11}(a'_{11} + a'_{22}) - \\ - b_2 a_{11}(a'_{11}a'_{22} - a'_{12}a'_{21}) \end{vmatrix}
\end{aligned}$$

Введемо позначення:

$$P_{10} = (a_{22}b_1' - a_{22}b_1 - a_{12}b_2' + a_{12}b_2)(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

$$P_{11} = [-a_{22}b_1'(a_{22}' + 1) + a_{22}b_2'a_{21}' + b_1a_{22}(a_{11}' + a_{22}') - a_{12}b_1'a_{12}' + a_{12}b_2'(1 + a_{11}') - b_2a_{12}(a_{11}' + a_{22}')] \times (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

$$P_{12} = [a_{22}b_1'a_{22}' - a_{22}b_2'a_{21}' - b_1a_{22}(a_{11}'a_{22}' - a_{12}'a_{21}') + a_{12}b_1'a_{12}' - a_{12}b_2'a_{11}' + b_2a_{12}(a_{11}'a_{22}' - a_{12}'a_{21}')] \times (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

$$q_1 = (a_{11}' + a_{22}')$$

$$q_2 = a_{11}'a_{22}' - a_{12}'a_{21}'$$

$$P_{20} = (-a_{21}b_1' + b_2a_{12} + a_{11}b_2' - b_2a_{11})(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

$$P_{21} = [a_{21}b_1'(1 + a_{22}') - a_{21}b_2'a_{21}' - b_2a_{12}(a_{11}' + a_{22}') + a_{11}b_1'a_{12}' - a_{11}b_2'(1 + a_{11}') + b_2a_{11}(a_{11}' + a_{22}')] \times (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

$$P_{22} = [-a_{21}b_1'a_{22}' + a_{21}b_2'a_{21}' + b_2a_{21}(a_{11}'a_{22}' - a_{12}'a_{21}') - a_{11}b_1'a_{12}' + a_{11}b_2'a_{11}' - b_2a_{11}(a_{11}'a_{22}' - a_{12}'a_{21}')] \times (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^{-1}$$

Остаточню:

$$\dot{i}_{dcp} = n_{1cp} = U_1 \cdot \frac{P_{10} + P_{11}Z^{-1} + P_{12}Z^{-2}}{(1 + q_1Z^{-1} + q_2Z^{-2})}$$

$$\dot{i}_{Dcp} = n_{2cp} = U_1 \cdot \frac{P_{20} + P_{22}Z^{-1} + P_{22}Z^{-2}}{(1 + q_1Z^{-1} + q_2Z^{-2})}$$

Розділ 3. Моделювання роботи тягового електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами

3.1. Математична модель системи електроприводу з синхронним двигуном

Розглянемо систему керування синхронним двигуном у функції потокозачеплення.

Вектор потокозачеплення розкладається по вісях відповідно до його проєкцій.

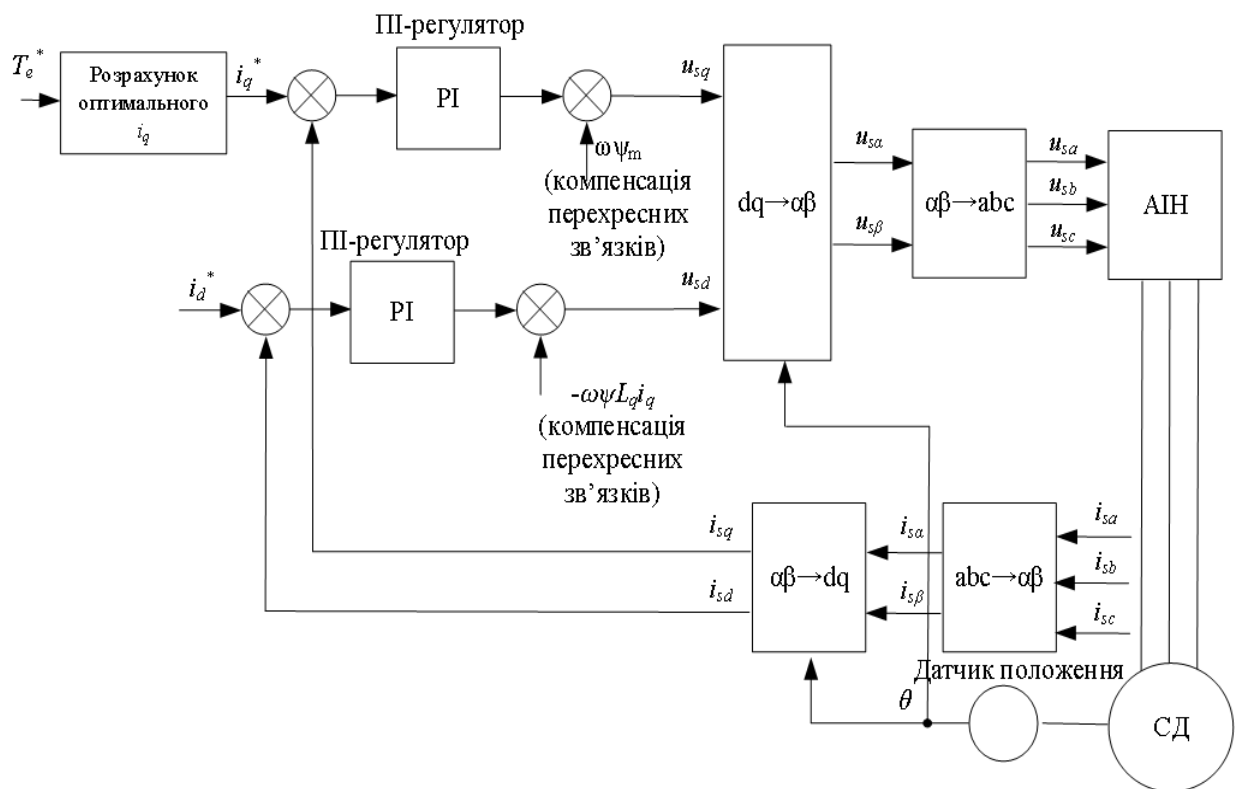


Рис. 3.1 Система керування синхронним двигуном

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05				
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат
Розробив	Засвнцько Р.А.			
Перевірів	Сінчук І.О.			
Реценз.				
Н. Контр.	Сінчук І.О.			
Затвердив	Пересунько І.І.			
Розділ 3				
Літ.		Лист		Листів
		35		17
КНУ ЕЕМ-20				

Представимо реалізацію контуру керування напругою електричної машини.

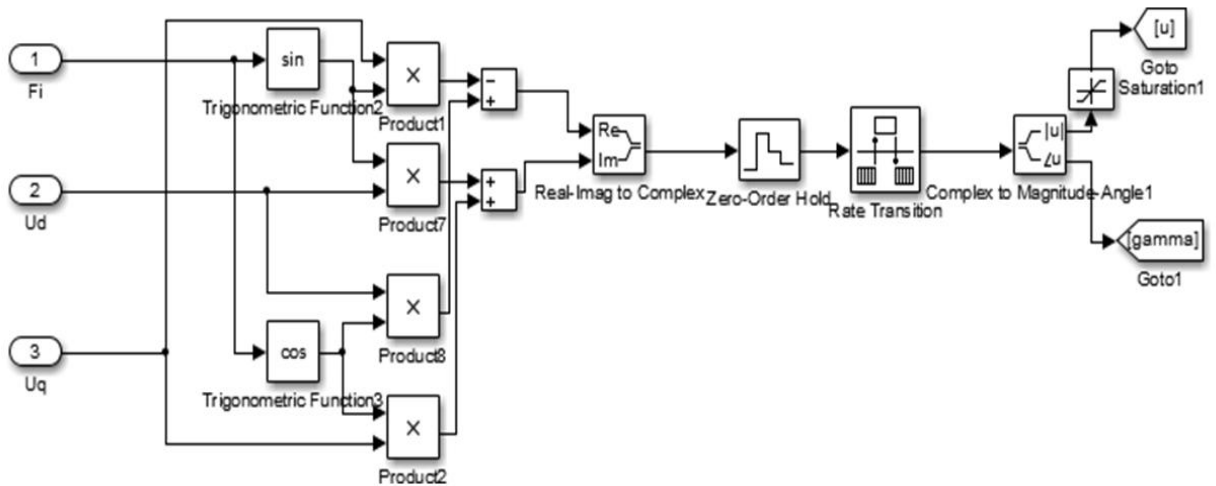


Рис. 3.2 Визначення параметрів напруги

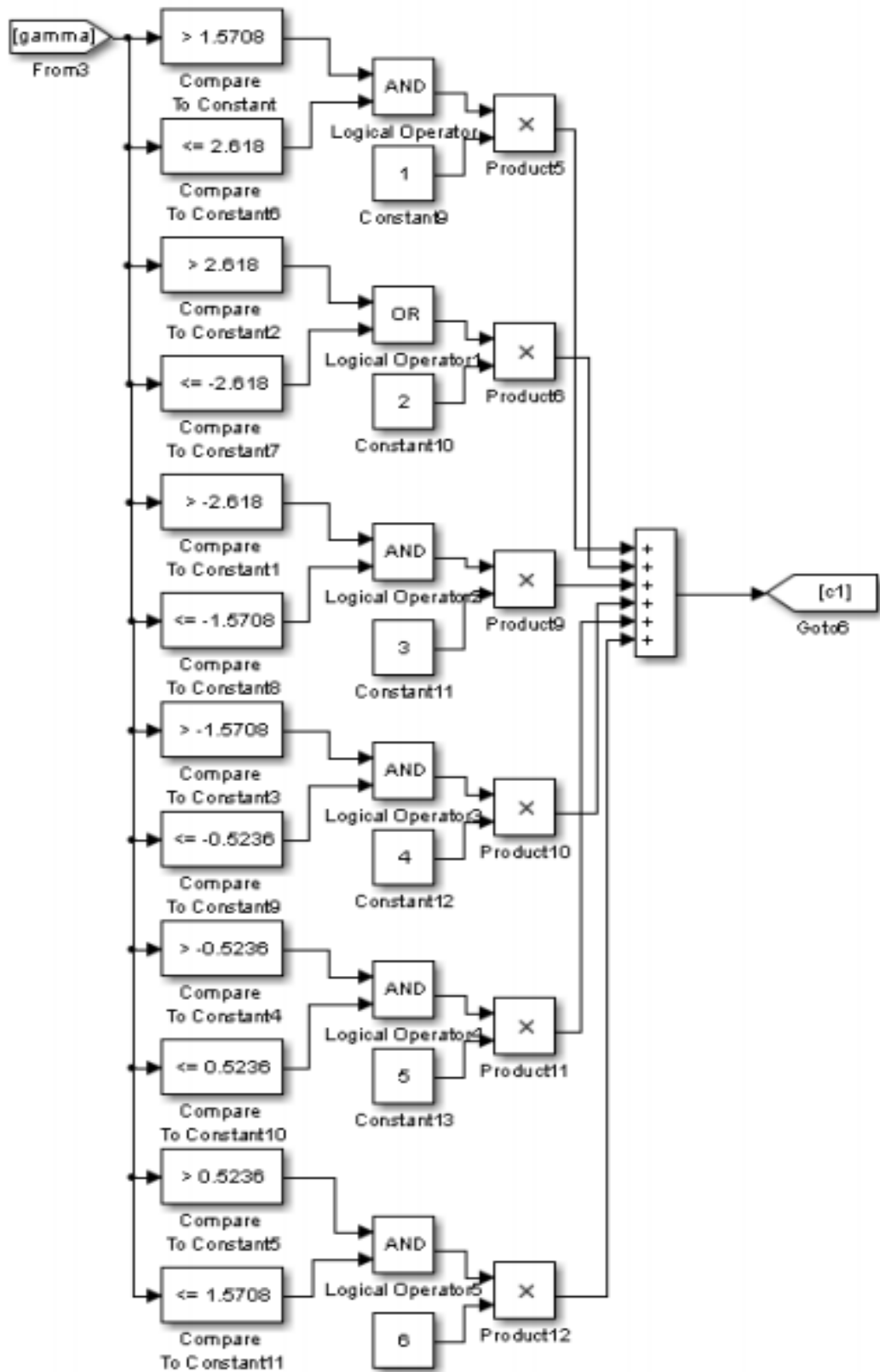


Рис. 3.3 Вибір вектору

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

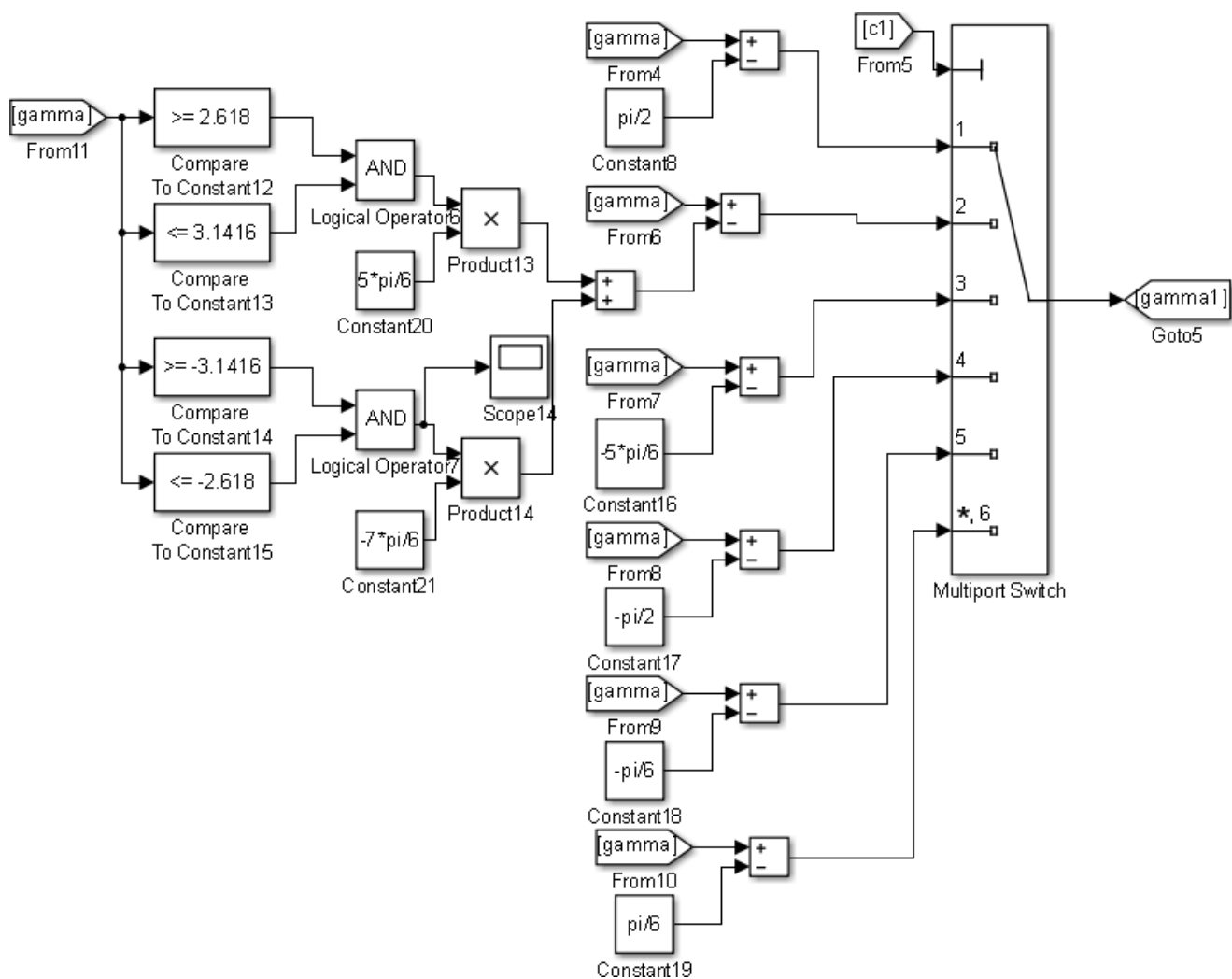


Рис. 3.4 Визначення кута повороту

Розглянемо цифровий адаптивний регулятор [32].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

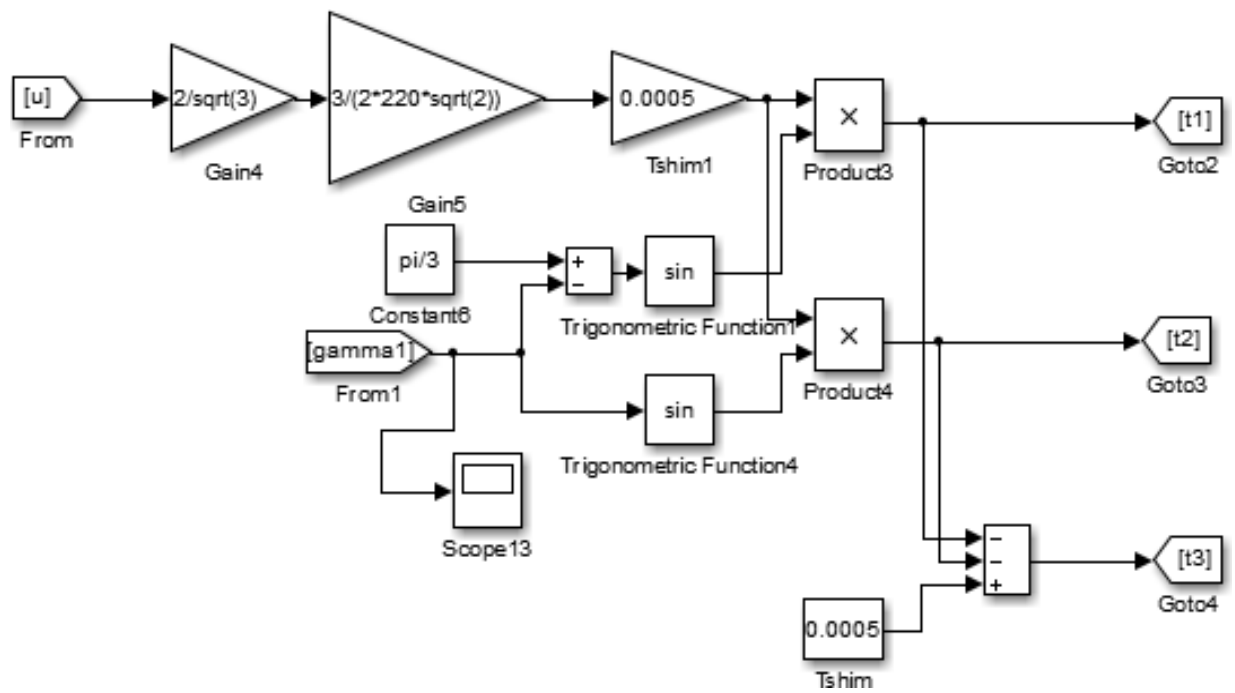


Рис. 3.5 Розрахунок включення векторів

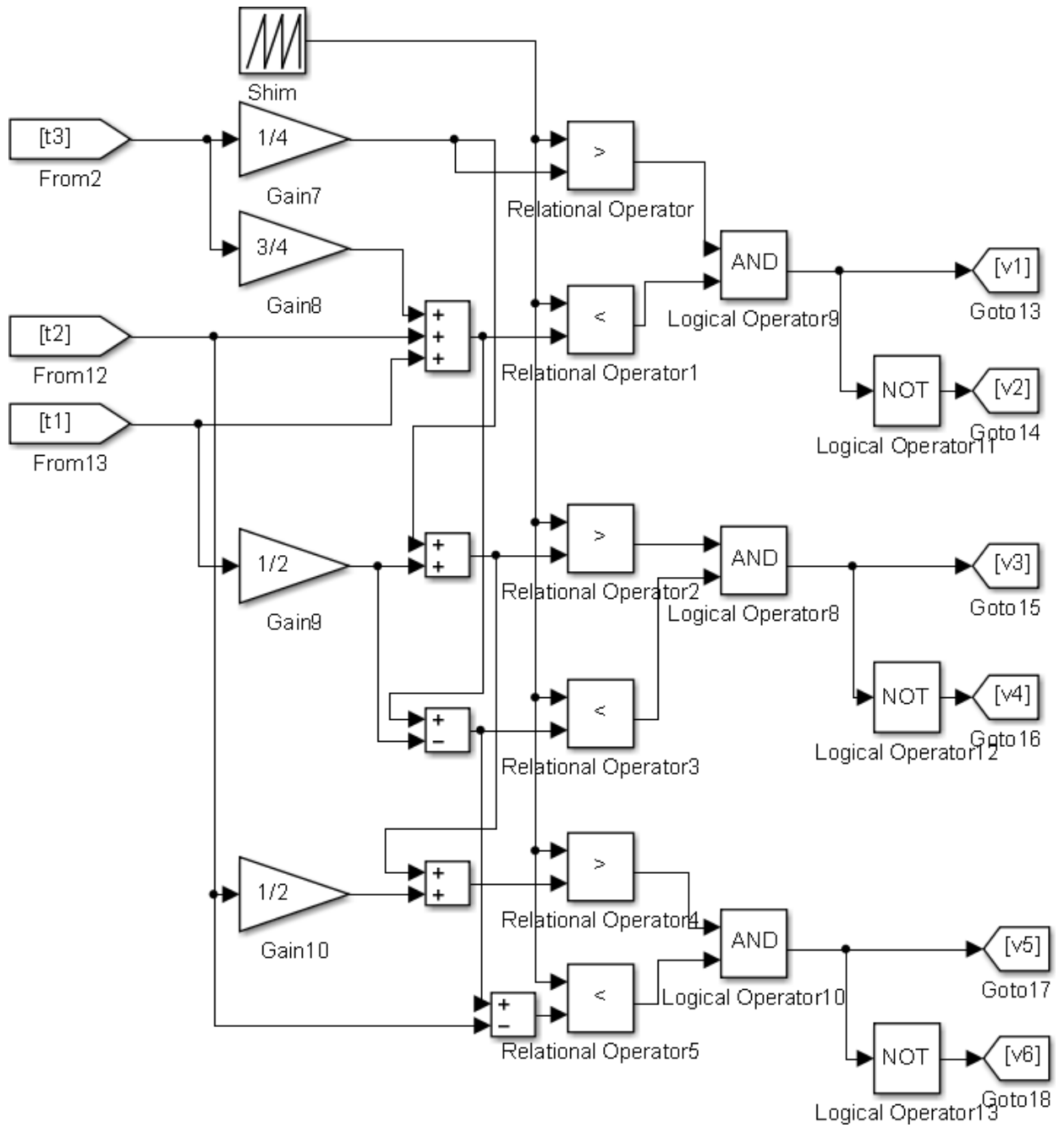


Рис. 3.6 Імпульсні сигнали керування

Зробимо моделювання вектора напруги:

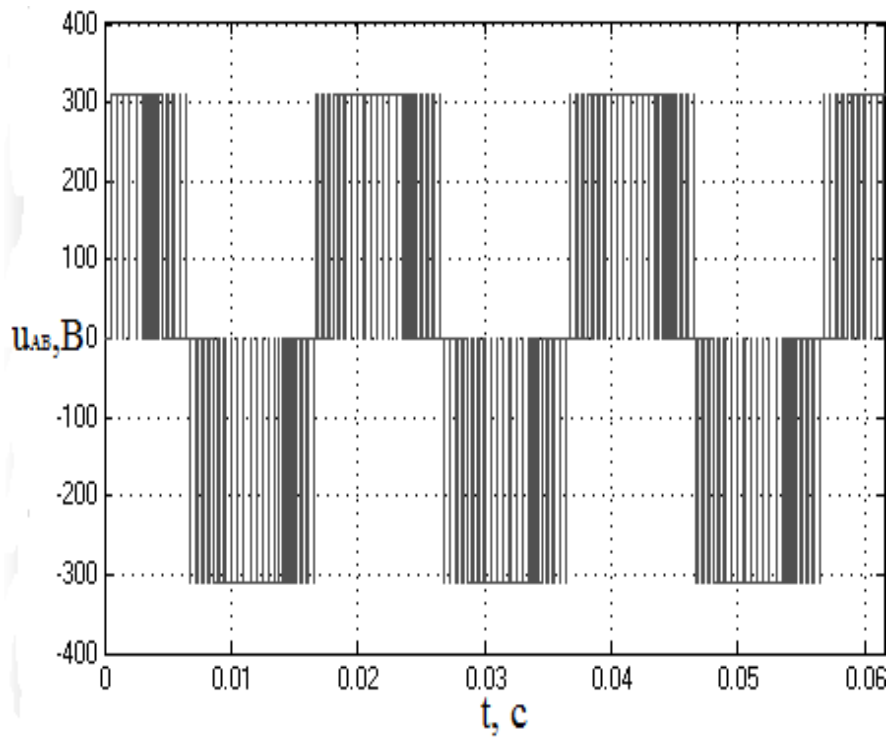
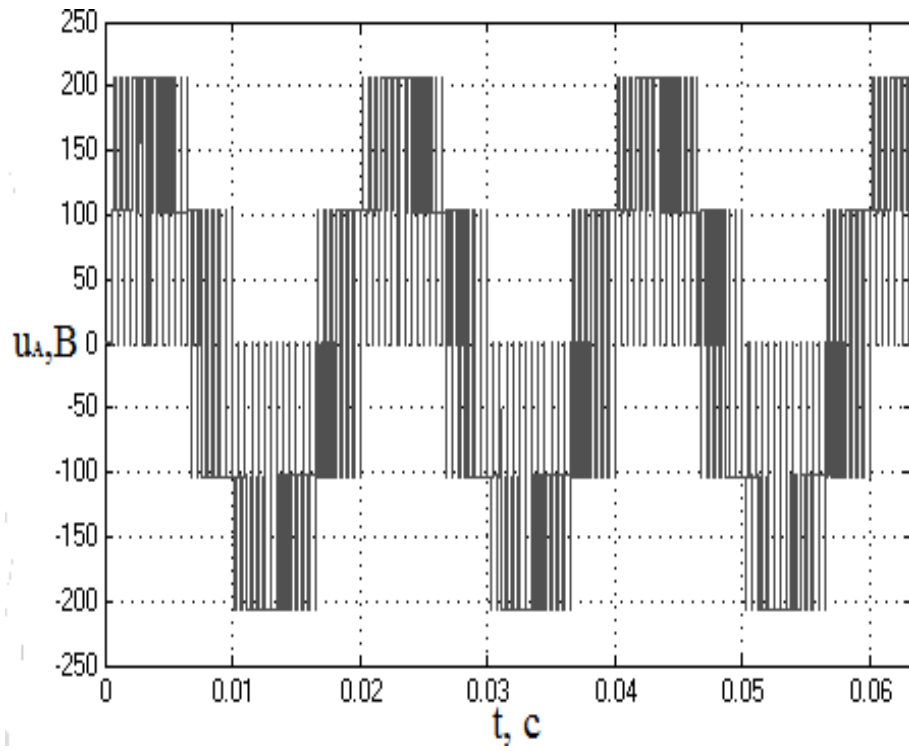


Рис. 3.7 Графіки вихідної напруги АІН

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05

Арк.

41

Таким чином була розроблена система векторного керування синхронним двигуном.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						42
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3.2. Математична модель системи електроприводу з синхронним двигуном та керуванням у функції моменту

Представимо модель системи векторного керування з автономним інвертором напруги.

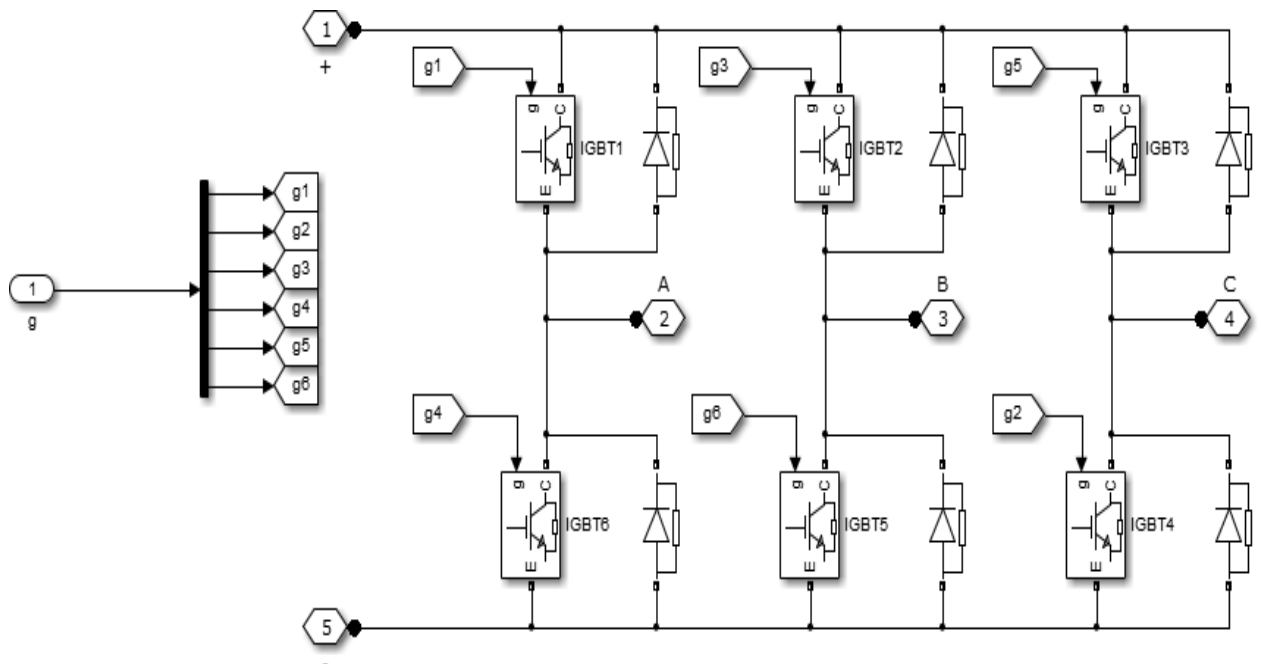


Рис. 3.8 Модель АІН

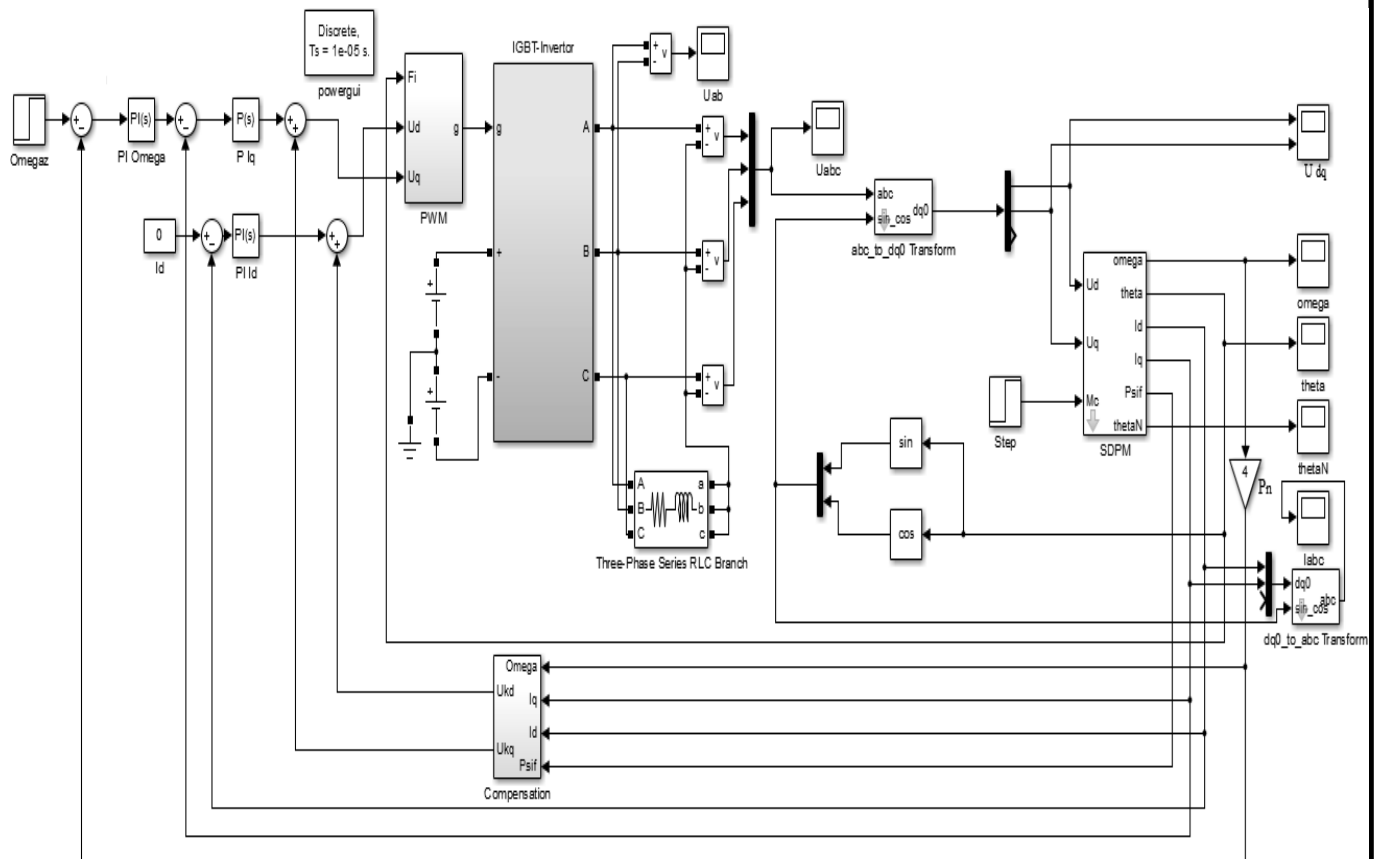


Рис. 3.9 Система векторного керування

Результати моделювання:

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

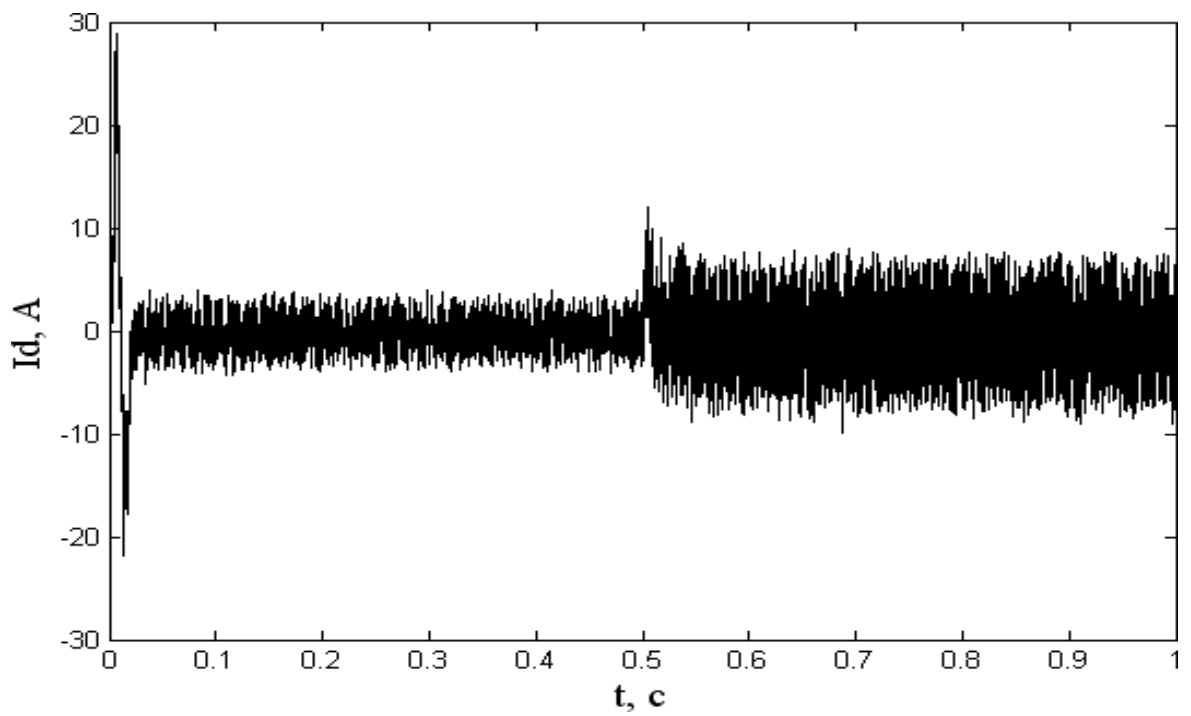


Рис. 3.10 Графік струму статора I_{sd}

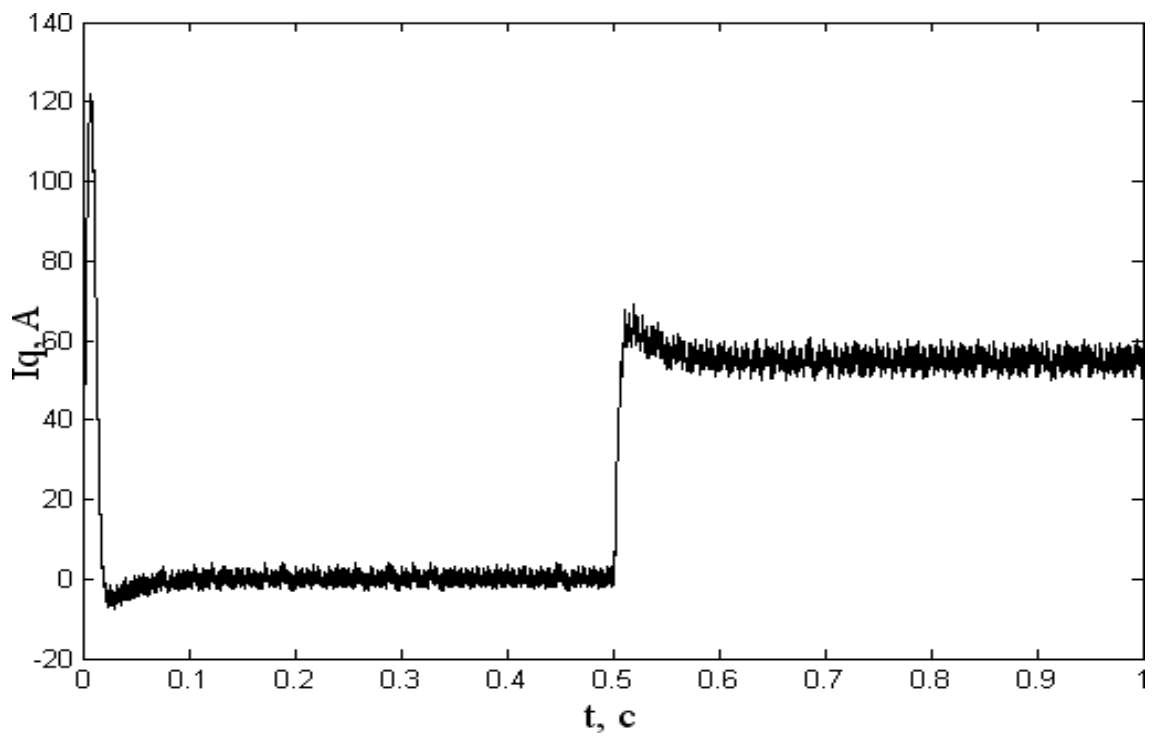


Рис. 3.11 Графік поперечного струму статора I_{sq}

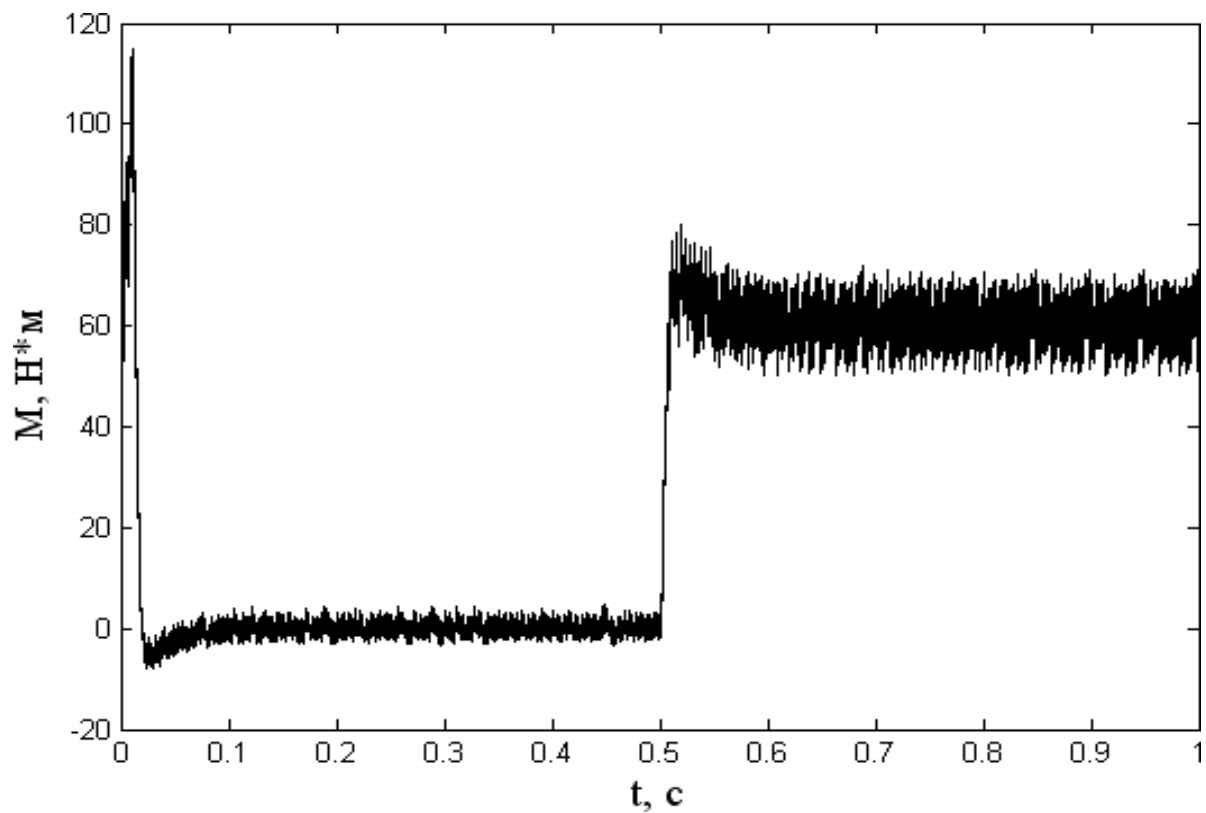


Рис. 3.12 Графік моменту

Структура системи керування:

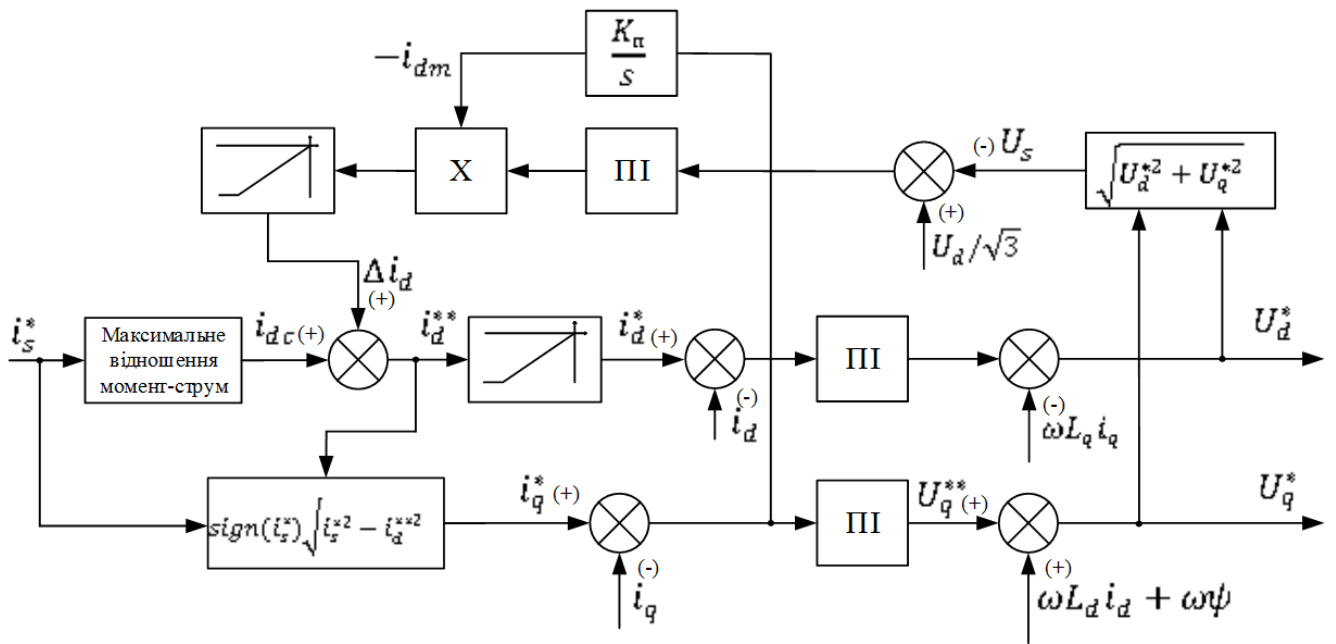


Рис. 3.13 Структура системи керування

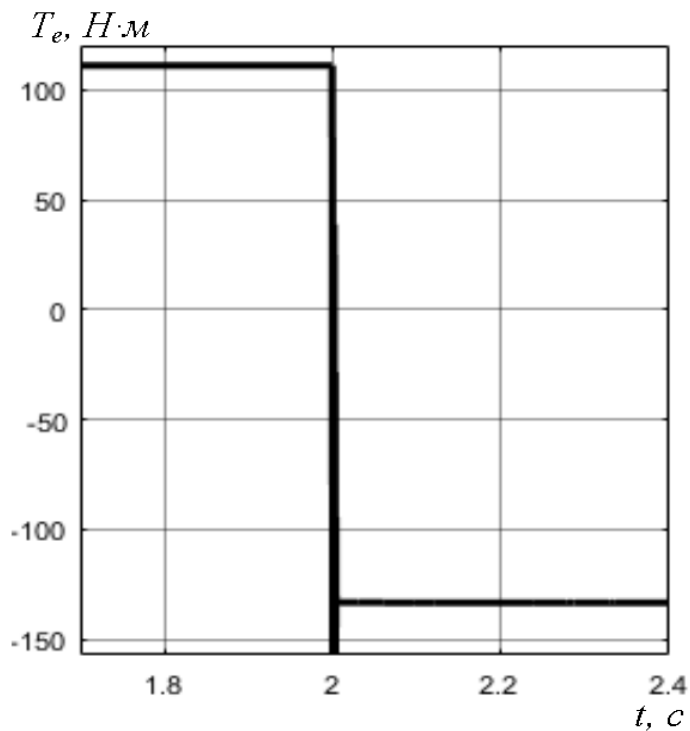


Рис. 3.14 Графіка моменту у тяговій системі з синхронним двигуном

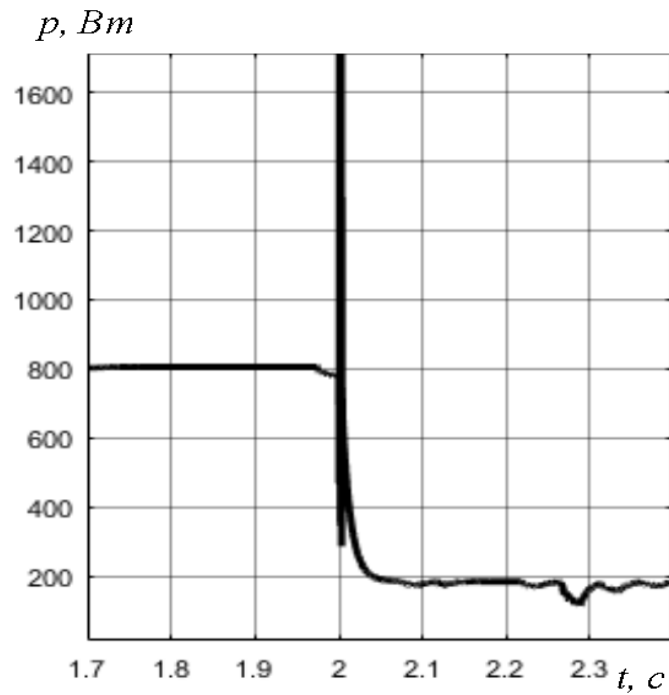


Рис. 3.15 Графік потужності у тяговій системі з синхронним двигуном

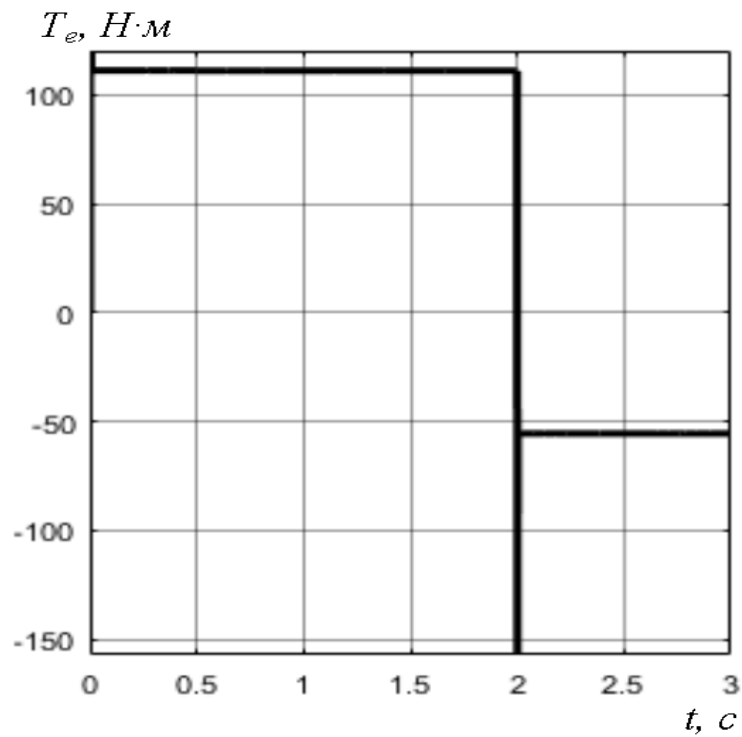


Рис. 3.16 Графік моменту у тяговій системі з синхронним двигуном

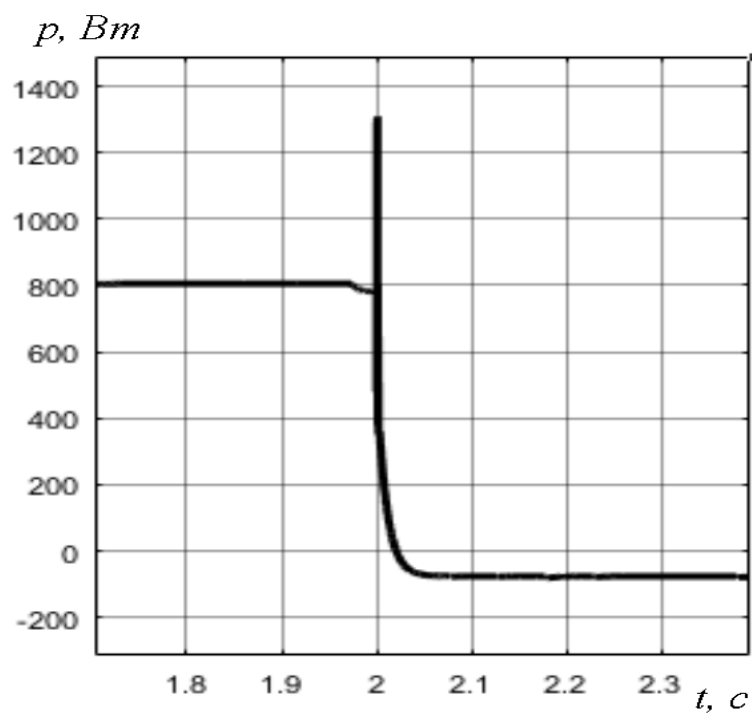


Рис. 3.17 Графік потужності у тяговій системі з синхронним двигуном

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05

Арк.

49

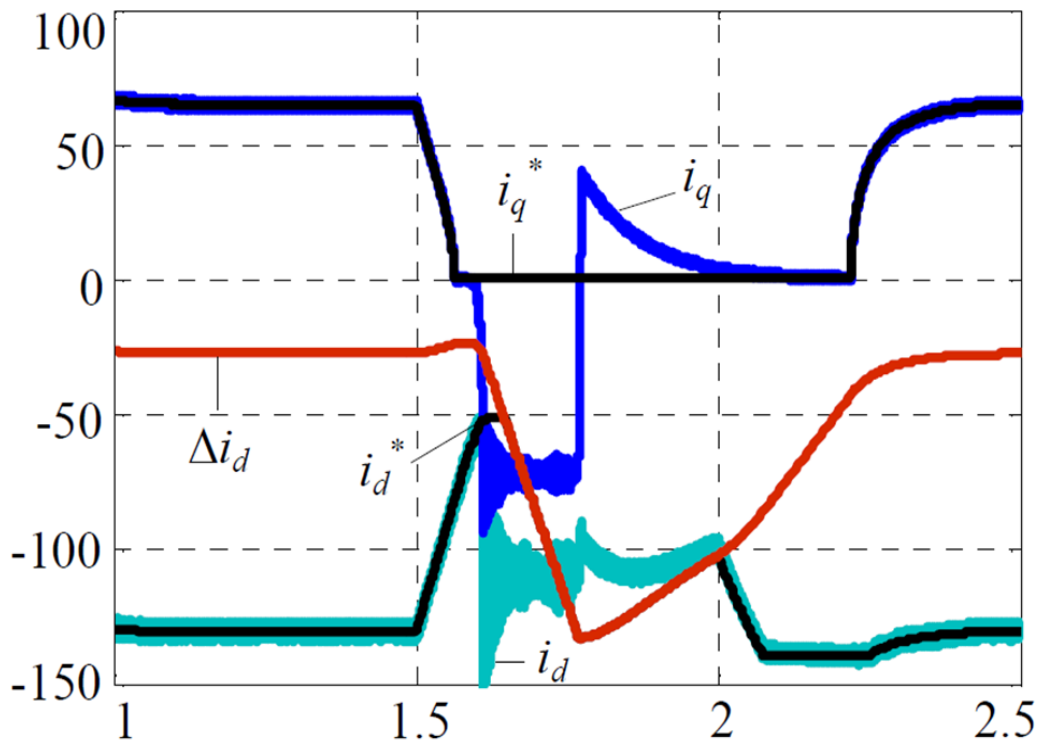


Рис. 3.18 Робота синхронного двигуна (векторне керування)

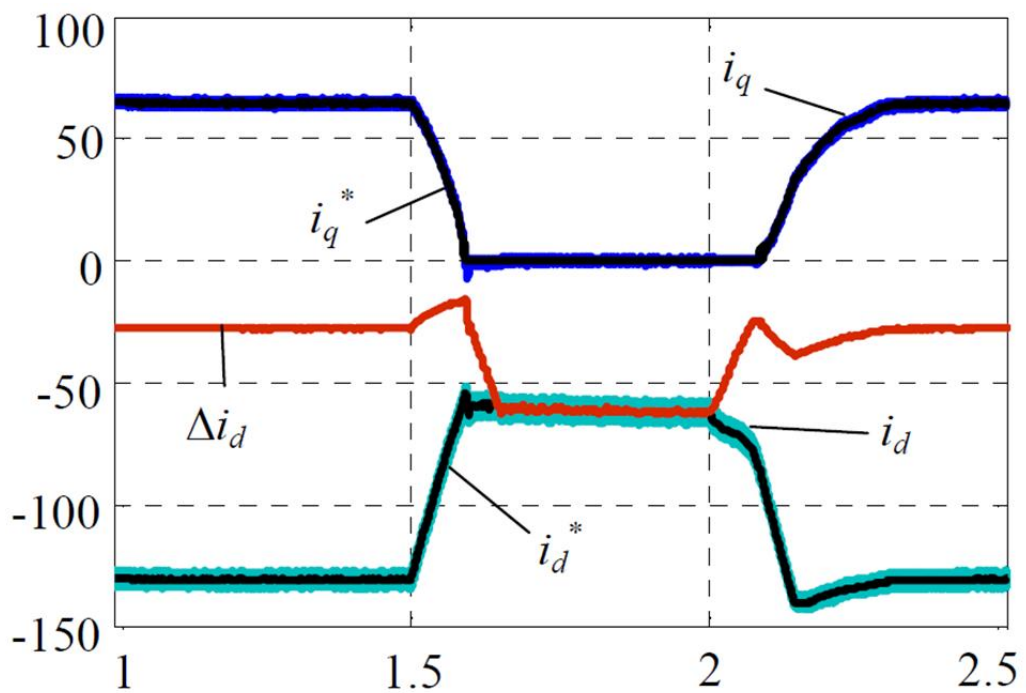


Рис. 3.19 Робота синхронного двигуна (імпульсне керування)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Отже у розділі було досліджено модель системи векторного керування синхронним двигуном з автономним інвертором напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Висновки

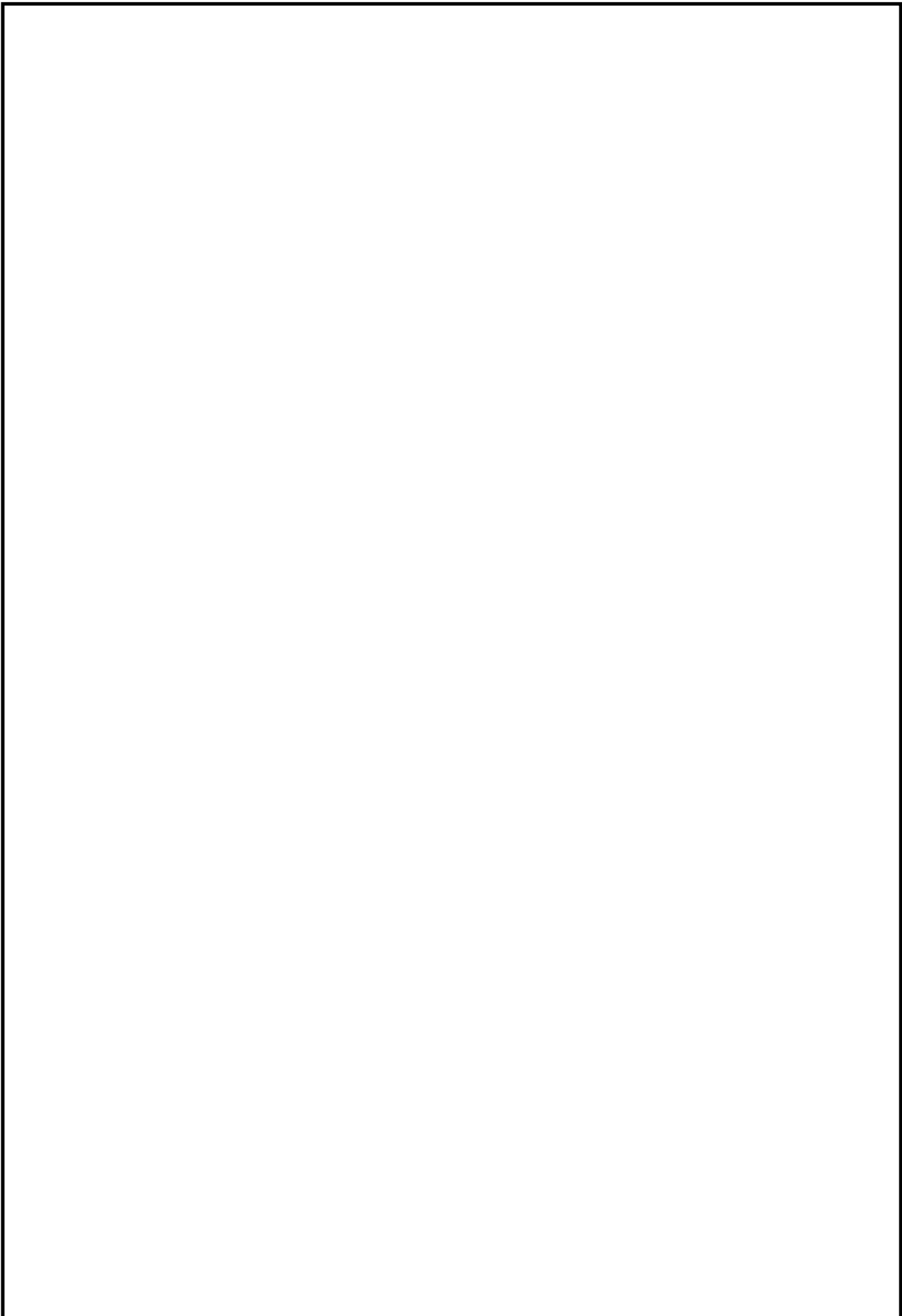
У роботі розглянуто тяговий електропривод з синхронним двигуном з постійними магнітами.

У першому розділі проаналізовано електричні схеми синхронного електроприводу, виділено такі режими роботи як гальмування, показано основні напрями підвищення енергетичної ефективності синхронного електропривода за рахунок використання сучасних систем керування.

У другому розділі була розроблена математична модель системи керування тяговим електроприводом з синхронним двигуном з постійними магнітами та проведено дослідження електромагнітних процесів в електричних колах синхронного електроприводу.

У третьому розділі було проведено вибір комп'ютерної моделі для дослідження роботи електроприводу з синхронним двигуном з постійними магнітами, обрана й обґрунтована її структура, проведено аналіз електромагнітних процесів при роботі синхронного електроприводу в режимах пуску та гальмування.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-05	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		