





### 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технічної літератури		
2. Розробка пристрою плавного пуску АД		
3. Розрахунки системи керування регулятора напруги (РН)-ШІМ-АД		
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу		

Студент \_\_\_\_\_

Керівник роботи \_\_\_\_\_

Підпис \_\_\_\_\_

Підпис \_\_\_\_\_

О.М. Москалюк

Ініціали, прізвище

Г.М. Драпак

Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові Москалюк Олександр Михайлович

2. Тема бакалаврської роботи Розробка пристрою плавного пуску асинхронного двигуна

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 4 арк., сторінок записки 61

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки: 1 Огляд та аналіз технічної літератури з тематики бакалаврської роботи. 2. Розробка пристрою плавного пуску АД. 3. Розрахунки системи керування регулятора напруги (РН) – ШІМ – АД.

Підпис студента 

"26" 06 2023 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 11 від "27" 06 2023 р.

Оцінка проекту ЕК добре 3,75/С

Рекомендації ЕК у виробництво

Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар 

"27" 06 2023 р.



Висновки .....	59
Перелік джерел посилань .....	60

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

## ВСТУП

Сучасні машини і механізми в різних галузях техніки повинні відрізнятися великою продуктивністю при необхідній точності обробки, високим рівнем автоматизації, що полегшують обслуговування, а також мати порівняно невисоку первинну вартість і невеликі експлуатаційні витрати, бути надійними і довговічними.

Виконанню цих вимог сприяє автоматизований електропривод, за допомогою якого можна здійснити плавне і широке регулювання швидкості виконавчого механізму, тобто забезпечити оптимальні технологічні режими. У той же час використання широкорегульованого електропривода дозволяє наблизити електродвигун до робочого органа механізму, отже, спростити кінематичні зв'язки, тобто зробити механізми в цілому більш точними. При використанні електропривода і відповідної системи керування легко автоматизує технологічний процес, а безперебійна робота електропривода підвищує надійність експлуатованих машин і механізмів. Тому дослідження і створення ефективних керованих електроприводів є важливим завданням теорії і практики сучасного автоматизованого електропривода.

У цей час уже не доводиться сумніватися в перевазі плавного пуску електродвигунів перед прямим пуском або різними видами псевдом'якого пуску, такими як перемикання із зірки на трикутник, використання автотрансформатора, і ін.

Велике поширення в усьому світі одержують тиристорні пускові пристрої (ТПП), або, як їх ще називають, пристрою плавного пуску (ППП), призначені для керування пусковими режимами і режимами зупинки трифазних низьковольтних асинхронних двигунів (АД) з короткозамкненим ротором.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6



напруги на двигун за експонентним законом. При цьому пусковий момент може знижуватися приблизно в 10 раз у порівнянні із прямим пуском. Під керованим пуском розуміються також складний пуск (затягнутий пуск), коли час пуску регулюється в межах 0,2 – 60 с, і пуск із відсіченням струму, при цьому пускові струми за час пуску не перевищують заданого струму відсічення. У режимі пуску з відсіченням струму, значення пускових струмів (струмів відсічення) можна встановлювати в межах  $I_{\text{пуск}} = I_{\text{н}} \div 6I_{\text{ном}}$ , де  $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм двигуна [2].

Загальним підсумком застосування ППП є підвищення надійності роботи електропривода і установки.

Застосування керованого пуску дозволяє суттєво зменшити шкідливі динамічні впливи на двигун і приводний механізм а, отже, збільшити термін служби електропривода. Якщо не потрібно регулювати частоту обертання приводного механізму, то застосування ТПП дозволяє з мінімальними витратами розв'язати всі проблеми, пов'язані із забезпеченням плавного пуску і зупинки двигуна[1].

Основна задача, розв'язувана при пуску – одержання плавного наростання струму, моменту і частоти обертання двигуна. При використанні ТПП він забезпечується плавним наростанням напруги на двигуні, що змінюються за обраним законом.

Незважаючи на велику різноманітність пристроїв, розглянутого класу, можна констатувати, що на сьогоднішній день переважна більшість пристроїв потужністю від 1 до 400 кВт на напругу до 660 В будуються по одній і тій же схемі силової частини, відомій з кінця 20-х років минулого століття, і мають деякий стандартний набір функцій. Ця схема являє собою тиристорний регулятор напруги з фазовим керуванням[3].

Порівняння виконуваних функцій пристроїв різних виробників дозволяє сказати, що переважна більшість пристроїв реалізує наступні основні функції[1]:

					<i><b>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</b></i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- керування пусковим режимом;
- керування режимом зупинки;
- керування робочим режимом;
- захисні функції;
- допоміжні функції;
- інтерфейс між пристроєм і оператором;
- інтерфейс між пристроєм і керуючим елементом верхнього рівня.

Додатково до функцій керування пусковими режимами і режимами зупинки, ТПП забезпечуються функціями захисту АД і захисту ТПП від аварійних режимів. До стандартних функцій відносяться[2]:

- захист від короткого замикання на виході ТПП;
- захист від заклинювання вала двигуна при пуску;
- захист від перевантаження по струму в робочому режимі;
- захист від неприпустимого зниження напруги на вході ТПП;
- захист від неприпустимого підвищення напруги на вході ТПП;
- захист від обриву фаз;
- захист від невключення шунтуючого контактора (при наявності);
- захист від несиметрії вхідної напруги;
- захист від зворотного чергування фаз на вході;
- тепловий захист двигуна;
- захист від пробією силового тиристора;
- захист при втраті керованості тиристора.

## 1.2 Області застосування ППП

Практично неможливо визначити галузь промисловості, у якій би не знайшли застосування ППП. Розглянемо деякі з них[4]:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



5) При застосуванні ППП у приводі ліфтів можна підвищити комфортабельність їзди.

6) У деревообробному виробництві ППП знаходять застосування як на приводах конвеєрів для виключення динамічних ударів транспортуючого елемента, так і в пресовому виробництві, де відбувається часте включення насоса, що створює тиск (цикл пресування 5-7 хв.).

7) У мішалках, на початку процесу перемішування грузлих або твердих матеріалів момент навантаження швидко зростає при збільшенні швидкості, створюючи перевантаження в силових передачах і кріпленнях. Цю проблему можна розв'язати за допомогою ППП.

8) При прямому пуску або східчастому пуску (зупинці) насосних установок можуть виникати гідроудари у трубопроводах. У цьому випадку рекомендується як плавний пуск, так і плавна зупинка привода.

Проаналізуємо ППП електродвигунів насосів – SMC-P. Тиристорні пристрої з аналоговою схемою управління типу SMC-P призначені для плавного пуску трифазних АД насосів з напругою живлення 220, 380 і 440В 50Гц.

Особливості[3]:

- Плавний пуск і зупинка двигуна забезпечує максимально сприятливий режим двигуна електронасоса: - обмеження пускового струму і прискорення частин, пов'язаних з валом двигуна, відсутність гідравлічних ударів у трубопроводі, зменшення акустичного шуму. У результаті – збільшення строку безаварійної експлуатації двигуна, насоса і трубопроводу.

- Можливість регулювання моменту двигуна при пуску, часу пуску і зупинки, а також режимів пуску дозволяє адаптувати пристрій до широкого кола завдань.

- Пристрій має режим виявлення недовантаження двигуна.

- Відсутність силових механічних контактів сприяє великому ресурсу пристрою без проведення ремонту.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		







Інформація про струм використовується також для організації різних захистів, наприклад, від перевантаження, дисбалансу фаз, електронного теплового реле і т.д.

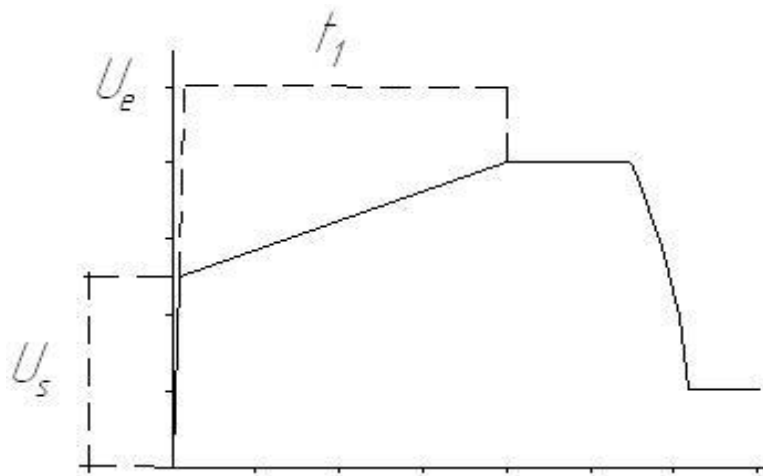


Рисунок 1.1 - Діаграма напруги

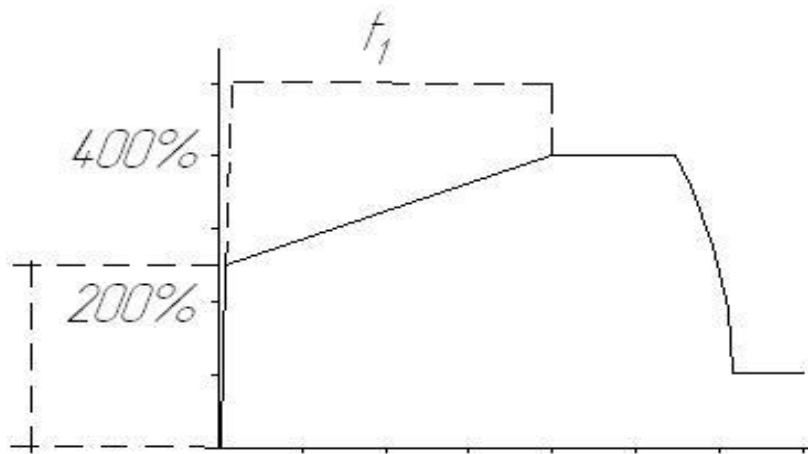


Рисунок 1.2 - Діаграма струму

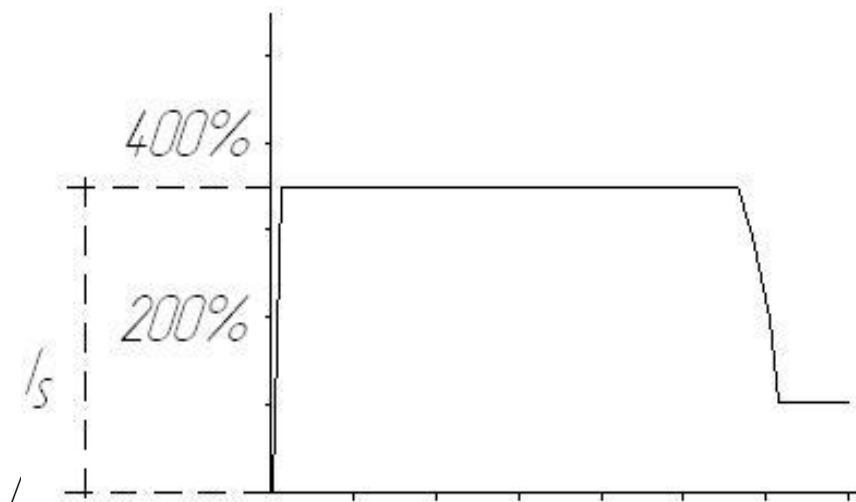


Рисунок 1.3 - Обмеження струму





двигуна. Цей пристрій виконує захисні і керуючі функції, що полегшує монтаж і знижує експлуатаційні витрати.

При запуску двигуна звичайними способами виникають кидки струму, величина якого в шість – дев'ять раз перевищує значення номінального струму двигуна. Також виникають вібрації, дисбаланс напруг, перегони тиску, зазори й механічні удари. CT-START легко настроїти так, щоб точно обмежити струм під час запуску для виконання всіх характеристик нагрівання двигуна. Електроніка сконструйована таким чином, що пристрій може бути використаний для точної настройки пускового моменту і точного відпрацьовування моменту навантаження[6].

Включення, захист і автоматизація систем вимагає установки великої кількості обладнання, що означає збільшення складності і габаритів шаф керування. CT-START має декілька додаткових функцій, які знижують кількість додаткового обладнання, що зменшує витрати на монтаж і експлуатацію системи. Спрощення монтажу також збільшує надійність керування двигуном.

#### Висновки до першого розділу

Проведено огляд та аналіз пристроїв плавного пуску і їх основного завдання.

Розглянуто функції пристроїв плавного пуску, а саме функцій керування пусковими режимами і режимами зупинки.

Визначено основні області застосування пристроїв плавного пуску, а також розглянуто технології плавного пуску, застосовувані в сучасних електронних пристроях пуску

					<i><b>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</b></i>	<i>Арк.</i>
						18
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



$$M_H = \frac{P}{\omega_H} = \frac{7500}{101,5} = 73,9 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.5)$$

$$\omega_H = \frac{n_H}{60} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{970}{60} \cdot 2 \cdot 3,14 = 101,5 \text{ рад/с} \quad (2.6)$$

де  $P=7500$  Вт – потужність двигуна;

$\omega_H$  – номінальна швидкість обертання двигуна.

$$J = J_{ДВ} + J_{МИ} = 0,0916 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \quad (2.7)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції.

$$S_H = \frac{n_s - n_H}{n_s} = \frac{1000 - 970}{1000} = 0,03 \% \quad (2.8)$$

де  $S_H$  – номінальне ковзання;

$n_H = 970$  об/хв – номінальна швидкість обертання двигуна,

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв}, \quad (2.9)$$

де  $n_s$  – синхронна швидкість (швидкість обертання магнітного поля);

$p = 3$  – число пар полюсів.

$$S_K = (m_K + \sqrt{m_K^2 - 1}) \cdot S_n = (2 + \sqrt{2^2 - 1}) \cdot 0,03 = 0,112 \% \quad (2.10)$$

де  $S_K$  – критичне ковзання;

					<b>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</b>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## 2.2 Тиристорний перетворювач напруги, як керований перетворювач змінної напруги

Регулювання напруги в тиристорному перетворювачі напруги (ТПН) здійснюється за допомогою тиристорних комутуючих однофазних елементів (ТКЕ) з різними схемами включення тиристорів і діодів. Найбільше поширення одержали ТКЕ з використанням двох тиристорів VS1 і VS2, включених за зустрічно-паралельною схемою (рис. 2.2, а) з подачею керуючих імпульсів на той тиристор, до анода якого в цей момент часу прикладена позитивна напруга. Такі ТКЕ дозволяють здійснити безконтактну комутацію ланцюгів обмоток статора і ротора АД та регулювати напругу, що підводиться до їх обмоток. Найбільше розповсюдження в ТПН одержали ТКЕ, укладені в кожен фазу напруги живлення в схемах з нульовим виводом (рис. 2.2, б) і без нульового виводу при з'єднанні обмоток статора двигуна в зірку (рис. 2.2, в) і в трикутник (рис. 2.2, г). У реверсивному електроприводі ТКЕ включаються аналогічно контактним пускачам, як показано на рис. 2.3, а. У такій схемі при умовному напрямку обертання вала двигуна «Вперед» включається ТКЕ з тиристорами VS5 – VS6, а при напрямку «Назад» - ТКЕ з тиристорами VS7 – VS10. Застосовувані ТКЕ в електроприводі використовуються також для створення схем динамічного гальмування, дві з яких показані на рис. 2.3, б (з однопівперіодним випрямленням струму у двох обмотках статора двигуна) і рис. 2.3, в (у трьох обмотках із двухпівперіодним випрямленням струму)[9].

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$$\phi = \arctg \frac{x_E}{R_E} \quad (2.16)$$

де  $R_E, x_E$  – еквівалентні активне і індуктивне опори навантаження (рис. 2.4, а), обумовлені схемою заміщення фази АД (рис. 2.4, б).

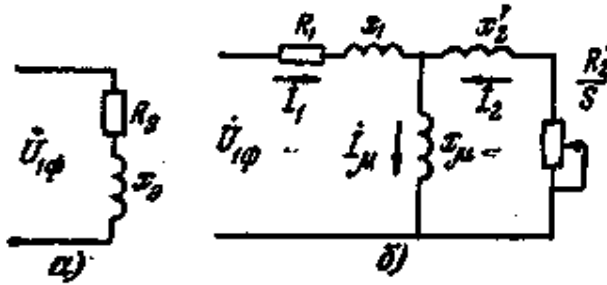


Рисунок 2.4 - Еквівалентна схема АД:  
а – навантаження; б – схема заміщення фази АД

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{э}} &= \frac{R_1}{x_{\mu}^2} \left( \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \frac{R_2'}{s} + c_2^2 R_1 \\ x_{\text{э}} &= \frac{(R_2'/s)^2}{x_{\mu}} c_1 + c_2 (x_2' + c_2 x_1) \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

де  $R_1, x_1$  – активний і індуктивний опору статора;

$R_2', x_2'$  - наведений активний і індуктивний опору ротора, знаходимо:

$$R_1 \approx \frac{1,5(U_H / \sqrt{3})^2 (1 - S_H) \eta}{(1 + 1/S_K) M_K P_H} = \frac{1,5 \cdot (380 / \sqrt{3})^2 \cdot (1 - 0,03) \cdot 0,87}{(1 + 1/0,112) \cdot 147,8 \cdot 7500} = 0,05, \text{ Ом} \quad (2.18)$$

де  $\eta = 0,87$  – ККД.

Розрахунки при нерухливому роторі  $S = 1$ .

$$R_2 \approx \frac{0,33 \cdot P_H}{(1 - S_H) \cdot I_R^2 \eta} = \frac{0,33 \cdot 7500}{(1 - 0,03) \cdot 96^2 \cdot 0,87} = 0,32, \text{ Ом} \quad (2.19)$$

де  $I_K$ - струм КЗ, знайдемо:

$$\frac{I_K}{I_H} = 6, \quad (2.20)$$

$$I_K = 6 \cdot I_H = 6 \cdot 16 = 96 \text{ А}, \quad (2.21)$$

$$R_2' = R_2 \cdot k_u \cdot k_i = 0,32 \cdot 10 \cdot 0,5 = 1,6 \text{ Ом}, \quad (2.22)$$

де  $k_i = 0,5$  – коефіцієнт приведення струму ротора;

$k_u = 10$  – коефіцієнт трансформації напруги в асинхронній машині при нерухливому роторі ( $S=1$ ).

$$\begin{aligned} x_1 = x_2 = x_\mu &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{U_H / \sqrt{3}}{I_H \cdot (\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \cos \varphi \cdot S_H / S_K)} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} \cdot \frac{380 / \sqrt{3}}{16 \cdot \left( \sqrt{1 - (0,80)^2} - 0,80 \cdot \frac{0,03}{0,112} \right)} = 0,113 \text{ Ом}, \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$x_2' = x_2 \cdot k_u \cdot k_i = 0,113 \cdot 10 \cdot 0,5 = 0,565 \text{ Ом}, \quad (2.24)$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_\mu} = 1 + \frac{0,113}{0,113} = 2, \quad (2.25)$$

$$c_2 = 1 + \frac{x_2'}{x_\mu} = 1 + \frac{0,565}{0,113} = 6, \quad (2.26)$$

Тоді



одержати сімейство вихідних характеристик ТПН при різних кутах навантаження (рис. 2.6, б). Як видно, ТПН має характеристики з різними змінними коефіцієнтами підсилення  $k_n(\varphi)$  залежно від кута навантаження.

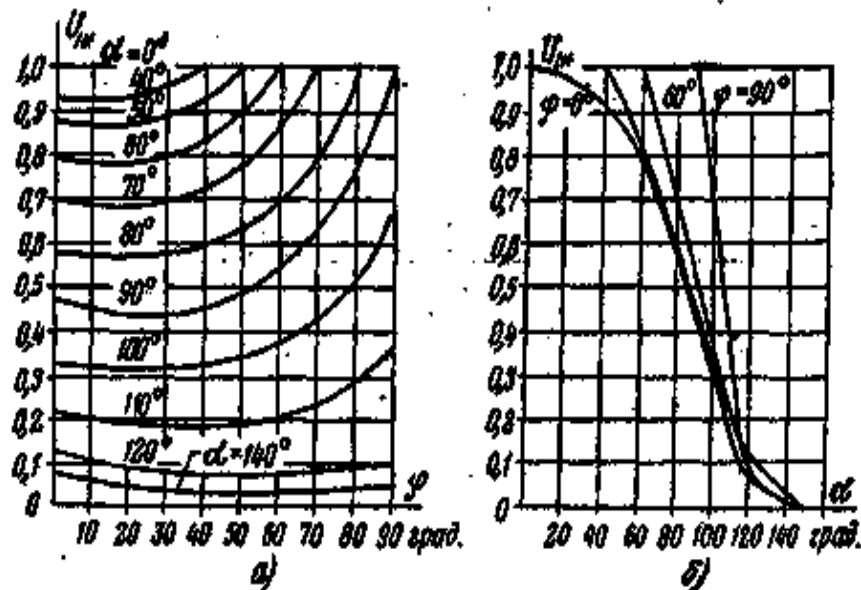


Рисунок 2.6 - Характеристики ТПН:

а – регулювальна; б – вихідні

2.3 Система керування асинхронного електропривода ТПН – АД з підсумовуючим підсилювачем

Для розімкнутої системи керування електропривода, включеного за схемою рис. 2.3, а, механічні характеристики при регулюванні кута  $\alpha$  показані на рис. 2.7, а. Такий електропривод по суті не забезпечує регулювання швидкості. Для одержання твердих механічних характеристик і регулювання швидкості використовується замкнена система керування переважно зі зворотним зв'язком по швидкості двигуна, сигнал якої забезпечується датчиком швидкості (тахогенератором). Можливе використання зворотних зв'язків і по напрузі або струмі статора або ротора (для двигунів з фазним ротором), як в електроприводах постійного струму. Розрахунки параметрів таких зв'язків у системах керування із ТПН викликає

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------







З (2.32) перебуває рівняння швидкості в замкненій системі ТПН

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega = \frac{U_3}{k_C} - \frac{\alpha_{IP} - \alpha}{k_C k_Y k_K} = \frac{10}{0,098} - \frac{150 - \alpha}{0,098 \cdot 10 \cdot 15} = 102 - \frac{150 - \alpha}{14,7} \quad (2.33)$$

Це рівняння дозволяє побудувати механічні і електромеханічні характеристики в замкненій системі ТПН – АД при певних кутах  $\alpha$  по побудованих характеристиках розімкнутої системи  $\omega = f(M, \alpha)$ , при тих же значеннях  $\alpha$  з урахуванням кута навантаження  $\varphi$ .

$$0^\circ < \varphi < 150^\circ$$

Таблиця 2.1 - Механічні і електромеханічні характеристики в замкненій системі ТПН – АД

$\alpha, ^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70
$\alpha_{np} - \alpha, ^\circ$	150	140	130	120	110	100	90	80
$\omega, \text{рад/с}$	91,8	92,5	93,16	93,84	94,5	95,2	95,9	96,6

Продовження таблиці 2.1

$\alpha, ^\circ$	80	90	100	110	120	130	140	150
$\alpha_{np} - \alpha, ^\circ$	70	60	50	40	30	20	10	0
$\omega, \text{рад/с}$	97,2	97,9	98,5	99,3	100	100,6	101,3	102

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

БРМА 23.00.00.000 ПЗ

Арк.

31



$$M_{\omega_{cp}} = \frac{3U_{ном}^2}{\omega_0 s} \cdot \frac{R_2'}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}, \quad (2.35)$$

де  $M_{\omega_{cp}}$  – момент АД, який можна визначити при номінальній напрузі  $U_{ном}$ , тобто при повністю відкритому ТПН, для середньої швидкості  $\omega_{cp}$  у заданому діапазоні регулювання швидкості;

$x_k$  – індуктивний опір розсіювання.

$$x_k = x_1 + x_2' = 0,113 + 0,565 = 0,678 \text{ Ом}, \quad (2.36)$$

$$\omega_0 = \frac{U_3}{k_c} = \frac{10}{0,098} = 102 \text{ рад/с} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{3U_{\phi}^2}{\omega_0 s} \cdot \frac{R_2'}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + x_k^2} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{102 \cdot 0,03} \cdot \frac{1,6}{\left(0,05 + \frac{1,6}{0,03}\right)^2 + 0,7} = \\ &= 0,00055 \cdot U_{\phi}^2 \text{ Н·м} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Таблиця 2.2 - Механічної характеристики моменту АД

$U_{\phi}, \text{ В}$	30	60	90	120	150	180	210
$M, \text{ Н·м}$	0,49	1,98	4,45	7,9	12,35	17,8	24,2

Продовження таблиці 2.2

$U_{\phi}, \text{ В}$	240	270	300	330	360	380
$M, \text{ Н·м}$	31,6	40	49,4	59,79	71,2	79,3



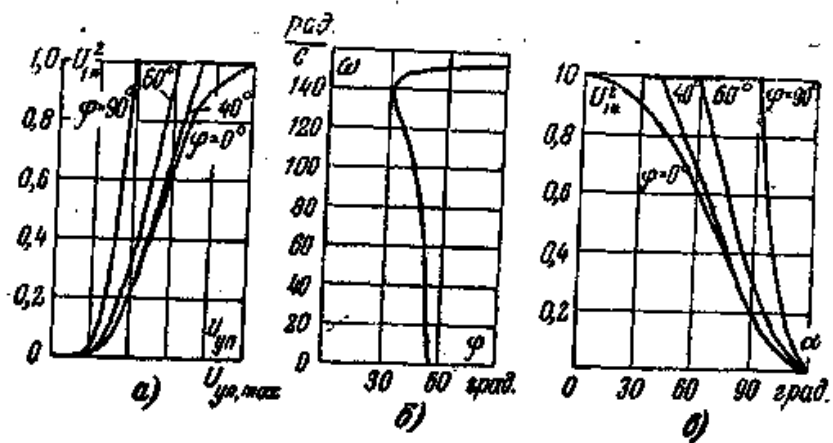


Рисунок 2.11 - Розрахункові характеристики трифазного ТПН:

а – залежність квадрата напруги  $U^{21}$  \* від напруги керування  $U_K$  при зміні кута навантаження  $\varphi$ ; б- залежність швидкості АД від кута навантаження  $\varphi$ ; в- залежність  $U^{21}$  \* від кута керування  $\alpha$  при зміні  $\varphi$

Враховуючи, що в замкненій системі ТПН – АД швидкість двигуна в режимах, що встановилися, роботи змінюється в невеликих межах, то при цьому кут навантаження  $\varphi$  можна прийняти приблизно постійним. Це впливає і з рис. 2.11,б, де наведена залежність швидкості АД від його кута навантаження, що розраховується по (2.16) для конкретного двигуна.

Пуск двигуна в розглянутій системі електропривода до заданої швидкості  $\omega_{вст}$  проводиться стрибком напруги, що задає. При цьому в перший момент часу  $u_c = 0$  і на вхід підсилувача подається  $U_3$ . Вхідна напруга підсилувача обмежується стабілітроном V2 і підсилувач забезпечує напруга управління перетворювача  $U_{K, max}$ , що задає кут керування  $\alpha_{min}$ , а ТПН – максимальна напруга живлення двигуна, якому відповідає механічна характеристика при  $\alpha_5$  (рис. 2.7,б). Швидкість двигуна росте згідно із цією характеристикою до швидкості  $\omega_5$ , після чого відкривається діод V1, система замикається і вихідна напруга підсилувача зменшується ( $u_K < U_{K, min}$ ), що збільшує кут регулювання  $\alpha$  до  $\alpha_{вст}$ . Швидкість двигуна при цьому від швидкості  $\omega_5$  підвищується до  $\omega_{вст}$  по характеристиці замкненої системи[9].

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата





$$e^{-\gamma_1 \Omega_0 t} \gg e^{-\gamma_2 \Omega_0 t} \quad ; \quad \frac{1 + \gamma_1 \gamma_2}{\gamma_2 - \gamma_1} \approx \frac{1}{\gamma_2}, \quad (2.44)$$

або

$$e^{-t/T_1} \gg e^{-t/T_2}, \quad (2.45)$$

тому що постійні часу згасання вільних складових моменту рівні

$$T_1 = \frac{1}{\gamma_1 \Omega_0} = \frac{1}{0,0056 \cdot 314} = 0,57 \text{ с}, \quad (2.46)$$

$$T_2 = \frac{1}{\gamma_2 \Omega_0} = \frac{1}{0,224 \cdot 314} = 0,0142 \text{ с} \quad (2.47)$$

Тоді диференціальне рівняння (2.40) з обліком (2.42) і (2.43) одержить вид

$$M(t) = M_{\Pi} \left( 1 + e^{-t/T_2} - e^{-t/T_1} \left( \cos \Omega_0 t + \frac{1}{\gamma_2} \sin \Omega_0 t \right) \right) \quad (2.48)$$

Як видно з (2.46), момент двигуна в перехідному процесі складається із трьох складових: 1) що встановився  $M_{вст} = M_n$ ; 2) аперіодичний  $M_a = M_{\Pi} e^{-t/T_2}$ , яка швидко згасає, тому що постійна часу  $T_2$  має малі значення; 3) періодичною, тобто коливальної згасаючої [13]

$$M_{КОЛ} = M_{\Pi} e^{-t/T_1} \left( \cos \Omega_0 t + \frac{1}{\gamma_2} \sin \Omega_0 t \right),$$

з малим демпфіруванням ( $e^{-t/T_1}$ ), тому що постійна часу  $T_1$  має більші









врахувати постійну часу фільтра, то за  $T_{\mu}$  приймається наступне значення:

$$T_{\mu} = T_2 + \tau_n + 2\zeta T_{\phi} = 0,0142 + 0,0033 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,0012 = 0,019, \text{ с} \quad (2.57)$$

Тоді з обліком (2.54) без обліку фільтра через його малий вплив виходить передавальна функція оптимізованого контуру моменту

$$W_{o,км}(p) = \frac{1}{[2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1) + 1] \cdot k_{om}} =$$

$$= \frac{1}{[2 \cdot 0,019 p (0,019 p + 1) + 1] \cdot 0,5} = \frac{1}{0,36 \cdot 10^{-3} p^2 + 0,19 \cdot 10^{-1} p + 0,5} \quad (2.58)$$

Експериментальні графіки перехідного процесу моменту двигуна, зняті в системі ТПН – АД з АД типу АН180-6, приведені на рис. 2.15,а. Графіки зняті при двох значеннях напруги, що задає, контуру моменту  $U_{зм,1}$  і  $U_{зм,2}$  і при трьох значеннях ковзання  $s_1=1$  (суцільні лінії),  $s_2=0,5$  (штрихові лінії) і  $s_3=0,1$  (штрихпунктирні лінії). Графіки показують, що оптимізація контуру моменту на технічний оптимум дуже близька до класичної теорії систем з залежним регулюванням координат електроприводів постійного струму. Перехідний процес моменту сформований з невеликим перерегулюванням, що лежать у межах припустимих значень. Час наростання моменту до моменту входження в область  $\pm 5\%$  коливань становить приблизно  $(2,5-5)T_{\mu}$ , що лежить у межах теоретичних положень [14].

При оптимізації контуру швидкості записується передавальна функція регулятора швидкості

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{2^2 T_{\mu} p} \cdot \frac{Jp}{1} \cdot \frac{k_{OM}}{k_C} = \frac{Jk_{OM}}{4T_{\mu} k_C} = \frac{0,0916 \cdot 0,5}{4 \cdot 0,019 \cdot 0,098} = 6,15 \quad (2.59)$$



спрощень опису процесів із системи ТПН – АД. Однак перехідні процеси швидкості і моменту сформовані, і характер кривих  $M$  і  $\omega$  задовольняє поставленим вимогам при оптимізації системи ТПН – АД. Видно, що виключені коливання моменту двигуна при пуску[15].

Використання на вході системи ТПН – АД задатчика інтенсивності дозволяє одержати необхідне прискорення при пуску двигуна (рис. 2.15,б, де показані експериментальні перехідні процеси пуску двигуна, зняті із задатчиком інтенсивності (штрихові лінії)).

В асинхронному електроприводі виникають певні труднощі виміру моменту. Одним зі способів реалізації датчика моменту є використання обчислювального пристрою, який дозволяє визначити момент по відомій з теорії перехідних процесів АД по формулі

$$M = \frac{\sqrt{3}}{2} p_{II} \left\{ (i_B - i_C) \int_0^t (u_A - i_A R_1) dt - i_A \int_0^t [u_B - u_C - (i_B - i_C) R_1] dt \right\} \quad (2.61)$$

де  $p_{II}$  – число пар полюсів АД, за допомогою виміру напруг  $u_a$ ,  $u_b$ ,  $u_c$  і струмів  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  за допомогою датчиків напруг UV і струмів UA (див. рис. 2.12).

Через труднощі виміру моменту АД подібні системи електропривода роблять одноконтурними з контуром швидкості, структурна схема якої приведена на рис. 2,16,а. У цьому випадку при оптимізації системи по впливу, що задає, необхідно компенсувати дію перетворювача і двигуна, тобто об'єкта регулювання контуру швидкості з передавальною функцією

$$W_{об,кск}(p) = \frac{k_{II} k_M}{(T_{\mu} p + 1)(T_0^2 p^2 + 1) J p} = \frac{40 \cdot 0,19}{(0,019 p + 1)(0,003^2 p^2 + 1) \cdot 0,0916 p} = \frac{7,6}{0,015 \cdot 10^{-6} p^4 + 0,824 \cdot 10^{-6} p^3 + 0,17 \cdot 10^{-2} p^2 + 0,0916 p} \quad (2.62)$$





## Висновки до другого розділу

Визначено параметрів АД, керованого зміною напруги на статорі. Далі зроблено розрахунок ТПН, як керованого перетворювача змінної напруги, системи керування асинхронного електроприводу ТПН-АД з підсумовуючим підсилювачем та системи керування асинхронного електроприводу ТПН-АД з залежним регулюванням координат.

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 3 РОЗРАХУНКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ (РН) – ШІМ – АД

### 3.1 Регулятор струму

Передаточна функція регулятора струму (РС) знаходиться по формулі

$$F_{PT} \frac{K_x}{T_x p + 1} \frac{1}{T_\Delta p + 1} K_T = \frac{1}{2T_x p (T_x p + 1)}, \quad (3.1)$$

$$T_\Delta = \frac{1}{\omega_o \cdot s_K} = \frac{1}{102 \cdot 0,112} = 0,0875 \text{ с}, \quad (3.2)$$

$$T_x = \tau_n = 1/6f = 1/300 = 0,003 \text{ с}, \quad (3.3)$$

де  $\tau_n$  – постійна запізнювання.

$$K_x = K_n = U_{IH}/10 = 380/10 = 38, \quad (3.4)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт підсилення регулятора напруги.

Вибір тахогенератора:

Тип – ПТ-32/1В;

$n = 1000$  об/хв – частота обертання;

$U = 230 \text{ В}$  - напруга;

$I_\Delta = 0,5 \text{ А}$  – струм якоря;

$I_\phi = 0,52 \text{ А}$  – струм збудження;

$R_{\text{я.к.}} = 11,59 \text{ Ом}$  – опір якорного кола;

$R_{\text{оз}} = 94 \text{ Ом}$  – опір обмотки збудження.

$$K_T = \frac{U_{\text{зТmax}}}{R_\phi I_{\phi \text{max}}} = \frac{10}{0,37 \cdot 96} = 0,28 \quad (3.5)$$

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49









Таблиця 3.2 – Значення струму

$\tau$	0	1	2	3	4	5	6	7
$t, c$	0	1,35	0,7	1,05	1,4	1,75	2,1	2,45
$e^{-\tau}$	1	0,37	0,137	0,0508	0,0188	0,007	0,0026	0,0009
$\cos\tau$	1	0,999	0,999	0,998	0,997	0,996	0,994	0,993
$\sin\tau$	0	0,017	0,03	0,0523	0,07	0,087	0,10	0,122
$i(\tau)$	0	1,55	2,13	2,35	2,43	2,46	2,47	2,48

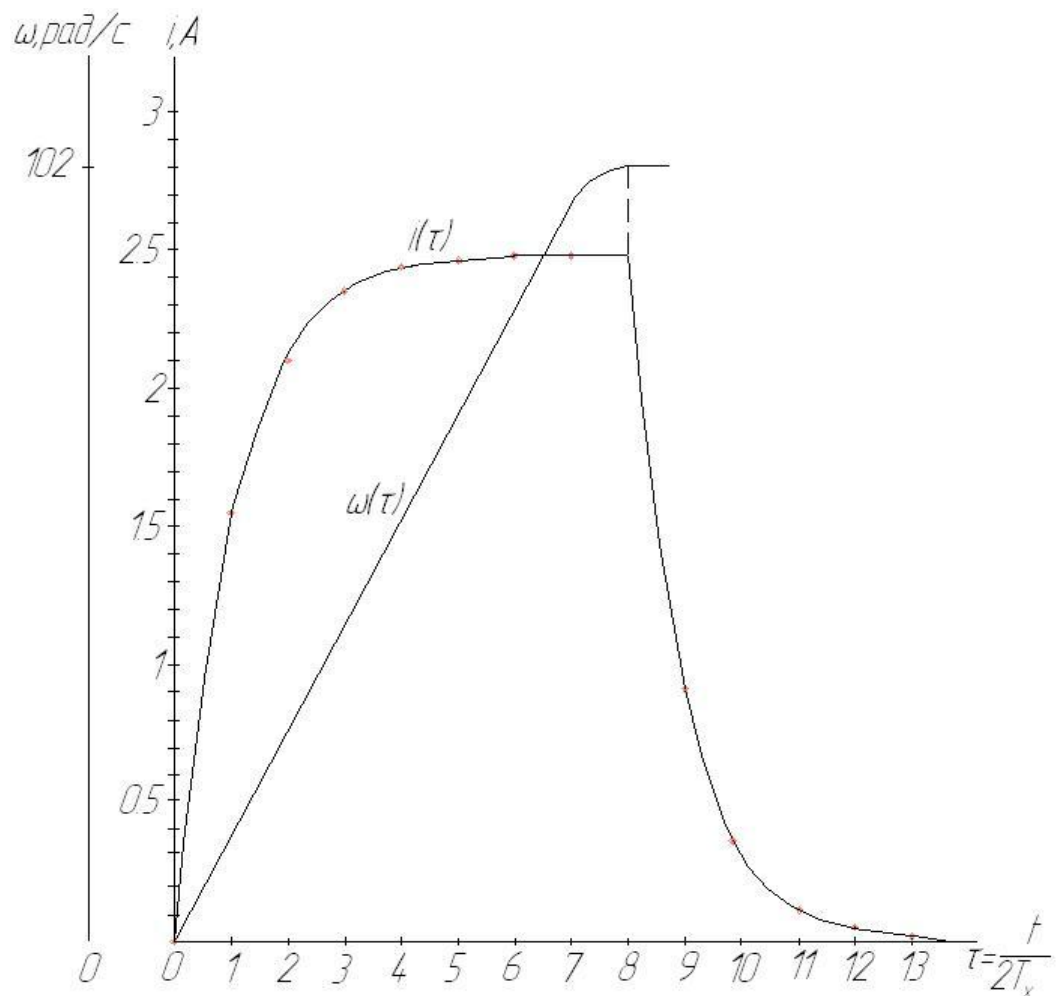


Рисунок 3.1 - Перехідні процеси при керуючому впливі в режимі струмообмеження

Вихідне рівняння системи з урахуванням дії сигналу керування  $U_{зс}$  і сигналу навантаження  $I_c R_y$  має вигляд

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

$$\left[ (U_{zc} - \omega K_c) F_{pc} F_T - I_c R_{я} \right] \frac{1}{T_m C_p} = \omega, \quad (3.26)$$

де  $F = 1 / [2T_x p (T_x p + 1) + 1] K_m$  – передаточна функція замкненого контуру струму;

$$F_{pc} = \frac{1 + 4T_T p}{4T_T p} \frac{T_m c K_T}{2K_c T_T} - \text{передаточна функція РШ.}$$

Для визначення впливу на систему тільки навантаження в цьому рівнянні слід покласти  $U_{zc} = 0$ . Позначивши зміну швидкості двигуна, пов'язане із впливом навантаження, через  $\Delta\omega$ , одержимо

$$\frac{\Delta\omega}{I_c R_{я}} C(p) = \frac{1}{K_c F_{pc} F_T + T_m C_p} \quad (3.27)$$

Після відповідних перетворень виходить:

$$\frac{\Delta\omega}{I_c R_{я}} C(p) = \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_c} = \frac{-8T_x}{T_m} \frac{4T_x p [2T_x p (T_x p + 1) + 1]}{8T_x p \{4T_x p [2T_x p (T_x p + 1) + 1] + 1\}} \quad (3.28)$$

Оригінал рівняння (2.99) відповідає перехідній функції:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_c}(\tau) = \frac{8T_x}{T_m} e^{-2\tau} [(1,5\tau) \sin 2\tau - 2\tau \cos 2\tau] \quad (3.29)$$

$$\text{де } \tau = \frac{t}{8T_x}, \quad \Delta\omega_c = \frac{I_c R_{я}}{C}.$$

Враховуючи, що  $iR_E = IR_E + T_m C_p \Delta\omega$ , і крім  $\Delta\omega$  з рівняння (3.23), одержують:

					БРМА 23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





## Висновки до третього розділу

Було розроблено ППП на основі ШІМ – контролера та здійснено розрахунок його параметрів, до якого відноситься розрахунок керуючої мікросхеми та драйвера. Розраховано параметри двох систем, визначено коригувальні ланки, розраховано перехідні процеси.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		58

## ВИСНОВКИ

В результаті роботи над бакалаврською роботою було проведено огляд та аналіз пристроїв плавного пуску і їх основного завдання.

Розглянуто функції пристроїв плавного пуску, а саме функцій керування пусковими режимами і режимами зупинки.

Визначено основні області застосування пристроїв плавного пуску, а також розглянуто технології плавного пуску, застосовувані в сучасних електронних пристроях пуску

Розраховано основні параметри АД, керованого зміною напруги на статорі. Далі зроблено розрахунок ТПН, як керованого перетворювача змінної напруги, системи керування асинхронного електроприводу ТПН-АД з підсумовуючим підсилювачем та системи керування асинхронного електроприводу ТПН-АД з залежним регулюванням координат.

Було розроблено ППП на основі ШІМ – контролера та здійснено розрахунок його параметрів, до якого відноситься розрахунок керуючої мікросхеми та драйвера. Розраховано параметри двох систем, визначено коригувальні ланки, розраховано перехідні процеси.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка і енергетика". - 2011. - Вип. 10 (333). - С. 87-92.

11. Тимченко О.А., Шевчук В.О. "Дослідження плавного пуску асинхронних двигунів з використанням методу моделювання підсилення на старті" // Проблеми керування і інформатизації. - 2013. - Вип. 3 (77). - С. 180-186.

12. Коваленко В.І., Горошко В.В. "Визначення оптимальних параметрів плавного пуску асинхронних двигунів з використанням методу імітаційної оптимізації" // Енергетика та електротехніка. - 2011. - № 3. - С. 55-61.

13. Шевченко Ю.О., Шевчук В.О. "Розробка апаратно-програмного комплексу для контролю плавного пуску асинхронних двигунів" // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - 2015. - Вип. 43. - С. 105-110.

14. Іваненко О.П., Шевчук В.О. "Використання методу множинних критеріїв при оптимізації системи плавного пуску асинхронних двигунів" // Електротехніка і електромеханіка. - 2012. - № 1. - С. 58-63.

15. Мельник І.О., Горошко В.В. "Розробка апаратно-програмного комплексу для аналізу процесів плавного пуску асинхронних двигунів" // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2018. - № 4 (100). - С. 34-39.

					<i>БРМА 23.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арк.
					62

БРМА 23.00.00.000 ПЗ