

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:

Вибір структури та розрахунок параметрів фільтро-компенсуючого пристрою для умов забезпечення електромагнітної сумісності мережі та навантаження на прикладі асинхронного частотно-регульованого електроприводу

Виконав: студент групи ЕЕМ-21ск

Володимир АНТОНОВ

Керівник випускної роботи _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

Нормо контролер _____ д.е.н., проф. Тетяна БЕРІДЗЕ

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

АНТОНОВ Володимир Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Вибір структури та розрахунок параметрів фільтро-компенсуючого пристрою для умов забезпечення електромагнітної сумісності мережі та навантаження на прикладі асинхронного частотно-регульованого електроприводу

1. Термін подання студентом роботи: 10 червня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є модернізація електромеханічної системи. Завданням є розрахунок характеристик та дослідження роботи автоматизованого електромеханічного комплексу на новій елементній базі
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Системи електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги; II. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами; III. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Комутаційні процеси в електроприводі; II. Метод досліджуваної векторної ШІМ; III. Схеми фільтрів; IV. Залежності індуктивності і ємності фільтра; V. Робота фільтрів.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Тетяна БЕРІДЗЕ		
II	Тетяна БЕРІДЗЕ		
III	Тетяна БЕРІДЗЕ		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Структура системи електропривода змінного струму	10.05.24
2	Комутаційні процеси в електроприводі змінного струму	19.05.24
3	Вплив модульованої напруги на асинхронний двигун	26.05.24
4	Дослідження якості електричної енергії	31.05.24
5	Дослідження роботи Г-Образного фільтра	07.06.24

Дата видання завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Володимир АНТОНОВ
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Вибір структури та розрахунок параметрів фільтро-компенсуючого пристрою для умов забезпечення електромагнітної сумісності мережі та навантаження на прикладі асинхронного частотно-регульованого електроприводу»

Об'єкт розробки – електричний привод з асинхронними двигунами.

У першому розділі були проаналізовані структури систем електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги, показано основні напрямки підвищення їх енергетичної ефективності. Розглянуто комутаційні процеси в електроприводі змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги.

У другому розділі досліджено вплив модульованої напруги на асинхронний електричний двигун, проведено вибір методу оцінки впливу якості перетворення електричної енергії на режими роботи асинхронного двигуна.

У третьому розділі було досліджено вплив якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами, обрана й обґрунтована структура Г-Образного фільтра, досліджено режими його роботи.

ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ,
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Системи електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги.....	8
1.1. Структура системи електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги.....	8
1.2. Комутаційні процеси в електроприводі змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги.....	13
Розділ 2. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами.....	17
2.1. Вплив модульованої напруги на асинхронний електричний двигун ...	17
2.2. Вибір методу оцінки впливу якості перетворення електричної енергії на режими роботи асинхронного двигуна	28
Розділ 3. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами.....	29
3.1. Дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами	29
3.2. Розробка й дослідження роботи Г-Образного фільтра.....	35
Висновки	44

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Електропривод змінного струму займає велику частку від усіх систем електроприводу.

Переважає більшість таких систем у якості привідного двигуна має асинхронний.

Для реалізації ефективного способу керування таким електроприводом обирають системи що містять керовані перетворювальні пристрої.

Система керування електроприводом реалізує ефективні закони регулювання параметрів асинхронного двигуна.

До структури керованого перетворювача може входити як регульований так і нерегульований випрямляч.

Для реалізації повністю керованої структури необхідно забезпечити випрямну частину перетворювача керованими ключовими елементами що забезпечують її функціонування.

Повністю керовані схеми випрямлення можуть забезпечити ефективне регулювання як споживання електричної енергії так і її віддачу у зовнішню мережу.

Процес генерування відбувається відповідно до режиму роботи електроприводу.

Ефективне регулювання потоками електричної енергії забезпечується оптимальним алгоритмом використання змодельованого сигналу що розраховується.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуляція частотного сигналу дозволяє підвищити якість регулювання та поліпшити характеристики керованого електроприводу з асинхронним двигуном.

Для підвищення якості споживання електричної енергії частотно-керованим асинхронним електроприводом слід використовувати вхідні фільтри.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Системи електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги

1.1. Структура системи електропривода змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги

Розглянемо структуру асинхронного електроприводу до складу якої входить імпульсний перетворювач.

Складемо рівняння регулювання станів електричної структури імпульсного перетворювача [31]:

$$D = \{O_s, K, O_k\} \quad (1.1)$$

Умовна логічна функція буде відповідати рівнянням стану електричної системи:

$$\begin{cases} O_s = & q_i(x) = 0 & i = 1, \dots, p \\ & h_j(x) = 0 & j = 1, \dots, p \end{cases} \quad (1.2)$$

де q_i, h_j - задані скалярні функції.

Вектори $x = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ описують параметри електроприводу а вектори $K = \{K_1, \dots, K_m\}$ показники якості.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01												
					Розділ 1												
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>													
<i>Розробив</i>	Антонов В.А.																
<i>Перевірів</i>	Берідзе Т.М.																
<i>Реценз.</i>																	
<i>Н. Контр.</i>	Берідзе Т.М.																
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.									КНУ ЕЕМ-21ск							

Обмеження O_k накладаються на K_1, \dots, K_m , відповідно до рівності $K_i = K_{i0}$, та нерівності $K_i \leq K_{im}, K_i \geq 0$ й $\Psi_i(K_1, \dots, K_m) \leq 0$.

$$K_i \xrightarrow{x \in O_s} \min_{x \in O_s} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.3)$$

Тоді оптимальне рівняння:

$$\bar{x}: K_i \xrightarrow{x \in O_s} \min_{x \in O_s} K_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.4)$$

Тоді еквівалентні опори:

$$\bar{x}_{1_2} \succ \bar{x}_2 \quad (1.5)$$

А відповідно до показників якості:

$$\bar{x}_{1_2} \approx \bar{x}_2 \quad (1.6)$$

Розглянемо два варіанти:

1) якщо $\bar{x}_{1_2} \succ \bar{x}_2$ й $\bar{x}_{2_2} \succ \bar{x}_3$, те $\bar{x}_{1_2} \succ \bar{x}_3$;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2) якщо $\bar{x}_{1_2} \approx \bar{x}_2$ й $\bar{x}_{2_2} \approx \bar{x}_3$, то $\bar{x}_{1_2} \approx \bar{x}_3$

Результуюча функція матиме вигляд:

$$F_0(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i F_i(x)$$

де ω_i - вага критерію, що погодить.

Тоді функціонал:

$$\min_x F_0(x) = \min_x \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{F_i(x^*) - F_i(x)}{|F_i(x^*)|} \quad (1.7)$$

$$\text{де: } F_i(x^*) = \max_x F_i(x)$$

Для визначення корисності наведемо співвідношення:

$$\alpha_1 u(x_1) = u(x_2)$$

аналогічно

$$\alpha_2 u(x_2) = u(x_3)$$

$$\alpha_{n-1} u(x_{n-1}) = u(x_n)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Тоді найліпший результат забезпечується:

$$\begin{aligned}
 u_{\alpha_n} &\geq 1 \\
 u_{\alpha_{n-1}} &\geq \frac{1}{2n-1} \\
 u_{\alpha_1} &\geq \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} \alpha_i}
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

А коефіцієнт взаємної спряженості [31]:

$$C = \sqrt{\frac{\varphi^2}{1+\varphi}}
 \tag{1.9}$$

або [65]:

$$K = \sqrt{\frac{\varphi^2}{(k_1-1)(k_2-1)}}
 \tag{1.10}$$

Тому процес розв'язку завдання:

$$K \bar{K} = W \bar{K}
 \tag{1.11}$$

де \bar{K} – скалярна функція, мінімум якої на O_s^* , є розв'язком вихідного завдання (1.3); W – згортка функції \bar{K} , що використовує додаткову інформацію.

При пошуку структури:

$$K(\bar{X}) = \sum_{i=1}^m P_i K_i(\bar{X}), \quad (1.12)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i = 1, \quad P_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

де значення вагових коефіцієнтів P_1, \dots, P_m визначається за допомогою додаткової інформації. Мінімізуючи функцію (1.12)

$$K(\bar{X}) \rightarrow \min_{x \in O_{bl}}$$

знаходимо \bar{X}^* - розв'язок завдання оптимізації, тобто:

$$K(\bar{X}) \rightarrow \min_{x \in O_{bl}} K(\bar{X}) \quad (1.13)$$

Отже оптимальна структура частотно керованого електроприводу має функціонувати відповідно до представлених рівнянь.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

1.2. Комутаційні процеси в електроприводі змінного струму з імпульсними перетворювачами напруги

Представимо структуру асинхронного частотно-керованого електроприводу.

Рис. 1.1 Схема для дослідження комутаційних процесів в електроприводі з необоротним випрямлячем

де: G - джерело змінної напруги (живильна мережа);

$Z1, Z2, Z3$ – фільтри, відповідно: вхідний, проміжний і вихідний;

$U1$ - необоротний випрямляч;

$U2$ – інвертор напруги;

$U3$ - гальмовий переривник;

M - асинхронний електричний двигун з короткозамкненим ротором;

RQ - гальмовий резистор.

Запишемо рівняння щодо індуктивності:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

$$L_{\Sigma} = L_G + L_I \quad (1.14)$$

Представимо процеси комутації.

Рис. 1.2 Ідеалізовані діаграми процесів
комутації діодів випрямляча

Величини, що характеризують накопичення заряду:

$$Q_r = \frac{I_r \cdot t_r}{2} \quad (1.15)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для IGBT-Модулів час $t_r \ll t_\gamma$ - часу комутації, прийнятого рівним $t_\gamma = t_2 - t_1$.

Тоді:

$$2L_\Sigma \cdot I_r^2 = C_I \cdot \Delta U_d^2 \quad (1.16)$$

$$\Delta U_d \approx U_{dm} - U_{d\gamma} \quad (1.17)$$

Середнє значення при $\gamma = \omega t_\gamma$:

$$U_{d\gamma} \approx U_{d0}(1 - 0,045 \cdot \gamma) \quad (1.18)$$

$$\gamma = \arccos(1 - 1,17L_\Sigma \cdot I_d) \quad (1.19)$$

Згідно [33] при напрузі 380В:

$$U_{d0} = 1,35 \cdot E_G = 1,35 \cdot 380 = 513В \quad (1.20)$$

Згідно [54] коефіцієнт потужності:

$$\chi = v \cdot \cos \varphi_I \quad (1.21)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Коефіцієнт викривлення

$$\nu = \frac{3}{\pi} \left(1 + \frac{\gamma}{4\pi} - \frac{\gamma^2}{24} \right) \approx \frac{3}{\pi} \quad (1.22)$$

Коефіцієнт зрушення

$$\cos \varphi_I = \frac{1 + \cos \gamma}{2} \approx \cos \frac{\gamma}{2} \quad (1.23)$$

Отже за допомогою фільтру можна згладити ефект від негативних наслідків перетворення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Розділ 2. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами

2.1. Вплив модульованої напруги на асинхронний електричний двигун

Розглянемо процеси що протікають у ключових елементах керованого перетворювача.

Інверторна група формує сигнали напруги що надходять до асинхронного двигуна.

Найбільш широко застосовується метод векторної широтно-імпульсної модуляції.

Миттєві значення фазних напруг буде зведено до узагальненого вектору у наслідок перетворення:

$$\overline{U_S} = \frac{2}{3}(u_U + \overline{a}u_V + \overline{a}^2u_W), \quad (2.1)$$

де $\overline{a} = \exp j \frac{2\pi}{3}$ - одиничний вектор [22].

Величину напруги представляє модуль узагальненого вектора $|\overline{U_S}| = U_S$, який залежно від стану ключів інвертора, ухвалює значення:

- $U_S = \frac{2}{3}U_d$ при включенні трьох ключів у різних групах, наприклад, одного в анодній групі й двох у катодній групі або навпаки;

$U_S = 0$ при включенні трьох ключів усіх в одній із груп, або всіх трьох в анодній групі, або всіх трьох у катодній групі, рис. 2.1.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01					
	-									
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат	Розділ 2					
Розробив	Антонов В.А.							Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Берідзе Т.М.							17	12	
Реценз.								КНУ ЕЕМ-21ск		
Н. Контр.	Берідзе Т.М.									
Затвердив	Пересунько І.І.									

Представимо схему заміщення для здійснення секторного аналізу перетворювача.

а)

б)

P = включений ключ в анодній групі; M = включений ключ у катодній групі;

Рис. 2.1 Метод досліджуваної векторної ШІМ:

а) схема інвертора на ключах; б) таблиця станів ключів

У секторі $S12$:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перший півперіод $\left[0 \dots \frac{T_M}{2}\right]: U_{SM} \rightarrow U_{S1} \rightarrow U_{S2} \rightarrow U_{SP};$

другий півперіод $\left[\frac{T_M}{2} \dots T_M\right]: U_{SP} \rightarrow U_{S2} \rightarrow U_{S1} \rightarrow U_{SM}.$

Тоді:

$$U_{SM} \rightarrow U_{S2} \rightarrow U_{S3} \rightarrow U_{SP};$$

$$U_{SP} \rightarrow U_{S3} \rightarrow U_{S2} \rightarrow U_{SM} \text{ і т.д.}$$

У загальному виді:

$$\text{прямо } U_{SM} \rightarrow U_{Si} \rightarrow U_{Sj} \rightarrow U_{SP};$$

$$\text{назад } U_{SP} \rightarrow U_{Sj} \rightarrow U_{Si} \rightarrow U_{SM};$$

$$i = 1 \dots 6, j = i + 1, \text{ при } i = 6 \quad j = 1.$$

Число періодів ШІМ:

$$M = \frac{f_M}{6f_1}, \quad (2.2)$$

де: f_M - частота модуляції, f_1 - частота основної гармоніки.

Представимо діаграми руху:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Рис. 2.2 Метод досліджуваної векторної ШІМ. Положення
узагальненого вектора в моменти перемикання фаз

Рис. 2.3 Метод досліджуваної векторної ШІМ

Положення векторів імпульсів у секторі S_{12}

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 2.4 Діаграми модуля узагальненого вектора в секторі s_{ij} :

а) на першому періоді модуляції T_{M1} , б) на проміжному t -періоді модуляції T_{Mm} , в) на останньому М-Періоді модуляції T_{MM} .

Прийняті позначення:

$t_{SM} = t_{SP}$ - нульові інтервали, на яких $U_{SM} = U_{SP} = 0$; $t_{SM} + t_{SP} = t_0$;

t_{Si}, t_{Sj} - інтервали дії векторів, відповідно $\overline{U_{Si}}$ й $\overline{U_{Sj}}$

$$t_{Si} + t_{Sj} = t_d; t_d + t_0 = \frac{T_M}{2}$$

Складемо рівняння напруг:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q_M = \frac{2t_d}{T_M} = \dots \quad (2.3)$$

$$U_S \equiv q_M \quad (2.4)$$

Тоді:

$$q_S = \frac{t_{Si}}{t_d} = \dots \quad (2.5)$$

при $t_d = const$.

Перехід до миттєвих значень:

$$u_U = Re \{ \dots \} ; \quad (2.6)$$

$$u_V = Re \{ a^2 \overline{U_S} \} = -\frac{1}{2} Re \{ \dots \} + \frac{\sqrt{3}}{2} Im \{ \dots \} \quad (2.7)$$

$$u_W = Re \{ a \overline{U_S} \} = -\frac{1}{2} Re \{ \dots \} + \frac{\sqrt{3}}{2} Im \{ \dots \} \quad (2.8)$$

Представимо діаграми.

Рис. 2.5 Діаграма миттєвих значень фазної напруги u_U в секторі S12

Тоді напруга мережі [56]:

$$U_M = \vec{U} + \bar{U} = U_d(1 + \kappa_{lv} \cdot \Gamma_M) \quad (2.9)$$

де:

\vec{U} - пряма хвиля напруги;

\bar{U} - відбита хвиля напруги;

Γ_M - коефіцієнт відбиття навантаження – двигуна;

$$\Gamma_M = \frac{Z_M - Z_L}{Z_M + Z_L} \quad (2.10)$$

Z_M - опір навантаження;

$Z_L = \rho_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$ - хвильовий опір лінії без втрат, у даному випадку – кабелю;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

$L_L \approx 0,25$ мкГн/м; $C_L \approx 0,7$ мкФ/м – розподілені параметри кабелю; оскільки вони залежать від типу, геометрії й матеріалу виготовлення кабелю, прийняті усереднені значення для трижильного кабелю живлення асинхронного двигуна потужністю 10 кВт [62].

Коефіцієнт хвильового процесу:

$$k_{lv} = \frac{3t_t}{t_V} \leq 1 \quad (2.11)$$

де:

t_t - час проходження хвилею імпульсу довжини кабелю один раз (від інвертора до двигуна);

t_V - час наростання імпульсу напруги.

При $t_V > 3t_t$ згідно (1.44) $U_M < 2U_d$.

При $t_V = 3t_t$ (2.12)

Час $t_t = \frac{l_L}{v_t}$ (2.13)

де:

l_L - довжина живильного кабелю [м];

v_t - фазова швидкість хвилі (швидкість проходження імпульсу напруги).

Для повітряної лінії:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк. 24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_t = \frac{v_C}{\sqrt{\epsilon\mu}} \approx \frac{v_C}{2} \approx 150 \text{ м/мкс} \quad (2.14)$$

де: ϵ, μ - абсолютні діелектрична й магнітна проникності середовища, $\sqrt{\epsilon; \mu} \approx 2$ (з узагальнення експериментальних даних [35]).

Підставляючи (2.13) і (2.14) в (2.12):

$$(l_L)_{\text{крит}} = 50t_V \quad (2.15)$$

де:

$(l_L)_{\text{крит}}$ виміряється в [м]; t_V - в [мкс].

На рис. 2.6 б:

$$Z_f = \sqrt{R_f^2 + \left(\frac{1}{j\omega_f c_f}\right)^2} = Z_L \quad (2.16)$$

де:

$\omega_f = 2\pi f_f$, f_f - частота ШІМ.

Резонансний опір:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

$$R_f \succ 2 \sqrt{\frac{L_L}{C_f}} \quad (2.17)$$

Представимо схему фільтра.

Рис. 2.6 Схеми фільтрів

а) резисторний; б) одноступінчастий; в) двоступінчастий

А, В, З – фази двигуна

На рис. 2.6 в:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$Z_f = \sqrt{\left(\frac{R_f \cdot \omega_f^2 \cdot L_f^2}{R_f^2 + \omega_f^2 L_f^2}\right)^2 + \left(\frac{R_f^2 \cdot \omega_f \cdot L_f}{R_f^2 + \omega_f^2 L_f^2} - \frac{1}{\omega_f c_f}\right)^2} = Z_L \quad (2.18)$$

Резонансний опір:

$$R_f \prec \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{c_f}} \quad (2.19)$$

На практиці розрахункові значення слід підрегулювати відповідно до режимів роботи.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

2.2. Вибір методу оцінки впливу якості перетворення електричної енергії на режими роботи асинхронного двигуна

Оцінювання показників якості споживання електричним приводом будемо розраховувати у відповідності із вище перерахованими методами завдяки представленим розрахунковим рівнянням параметрів електричних схем.

При цьому аналіз якості виконують відповідно до алгоритму:

- розрахунок вхідної напруги;
- розрахунок вхідного струму;
- розрахунок вихідної напруги;
- розрахунок вихідного струму.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Розділ 3. Розробка заходів з підвищення ефективності роботи електричного приводу з асинхронними двигунами

3.1. Дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами

Показники якості електричної енергії можна дослідити за допомогою
представлених функцій.

Рис. 3.1 Показники якості перетворення енергії.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01			
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>				
<i>Розробив</i>	Антонов В.А.				Розділ 3	<i>Літ.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевірів</i>	Берідзе Т.М.						29	15
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	Берідзе Т.М.				КНУ ЕЕМ-21ск			
<i>Затвердив</i>	Пересунько І.І.							

Рис. 3.2 Узагальнений показник якості.

Рис. 3.3 Показник „завантаження“ фаз.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.4 Показник зміни моменту.

Рис. 3.5 Показника віброхарактеристик.

Результати моделювання режимів роботи асинхронного частотно-керovanого електроприводу.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Рис. 1.6 Показник якості перетворення енергії.

Рис. 3.7 Узагальнений показник якості.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Рис. 3.8 Показника „завантаження“ фаз.

Рис. 3.9 Показник віброхарактеристик.

Рис. 3.10 Показник зміни моменту.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Аналіз отриманих результатів вказує на ефективність проведеного дослідження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

3.2. Розробка й дослідження роботи Г-Образного фільтра

Представимо рівняння що описують Г-подібний фільтр у структурі керованого перетворювачем електроприводу [64].

$$Q = \sqrt{U_{\phi\omega c}^2} 3R = \sqrt{3U_{\phi\omega c_{\Delta}}^2} 3R_{\Delta};$$

$$c^2 \cdot R = 3c_{\Delta}^2 \cdot R_{\Delta} \quad (3.1)$$

при $L_Y = L_{\Delta}$ (3.2)

Рис. 3.11 Схеми Г-Образного фільтра: а) принципова,
б) у вигляді чотиріполюсника, в) ідеалізована ЛАЧХ

Тоді загальний опір:

$$\overline{Z_G} = \frac{\overline{U_G}}{\overline{I_G}} = \frac{A \cdot \overline{Z_Z} + B}{C \cdot \overline{Z_Z} + D} \quad (3.3)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

для опору навантаження

$$\bar{Z}_Z = \frac{-\bar{U}_Z}{\bar{I}_Z} \quad (3.4)$$

Система рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_G &= A\bar{U}_Z + B\bar{I}_Z \\ \bar{I}_G &= C\bar{U}_Z + D\bar{I}_Z \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Для Г-Образного фільтра:

$$A = \frac{\bar{Z}_L + \bar{Z}_{RC}}{\bar{Z}_{RC}}; B = \bar{Z}_L; C = \frac{1}{\bar{Z}_{RC}}; D = 1 \quad (3.6)$$

$$\bar{Z}_L = jX_L = j\omega L; \bar{Z}_{RC} = \frac{1}{j\omega C} + R = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega C} \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6) і (3.7) у (3.3):

$$\begin{aligned} \bar{Z}_G &= \frac{(\bar{Z}_L + \bar{Z}_{RC})\bar{Z}_Z + \bar{Z}_L \cdot \bar{Z}_{RC}}{\bar{Z}_Z + \bar{Z}_{RC}} \rightarrow (\bar{Z}_L + \bar{Z}_{RC}) = \\ &= \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C} + R = \frac{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}{j\omega C} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Складемо схему фільтру.

а)

Рис. 3.12,а Схема з'єднання фільтра „у зірку“ \star у трифазній системі

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

б)

Рис. 3.12,б Схема з'єднання фільтра „у трикутник“ Δ у трифазній системі

Представимо частотну характеристику:

$$\bar{U}(\omega) = \frac{\bar{U}_Z}{\bar{U}_G} = \frac{1}{A} = \frac{\bar{Z}_{RC}}{\bar{Z}_G} = \frac{1 + j\omega RC}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \quad (3.9)$$

З метою спрощення:

$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - частота власних коливань ідеального контуру;

$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - хвильовий опір контуру;

$r = \frac{R}{\rho}$ - відносний опір; для демпфірування коливань досить $r > 2$;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\Omega = \frac{\omega}{\omega_m}$ - відносна частота; $\Omega_m = 1$, $\Omega_Z = 2$ - частота зрізу фільтра.

При цьому:

$$\bar{U}(\Omega) = \frac{1 + j\Omega r}{1 - \Omega^2 + j\Omega r}; \quad (3.10)$$

$$\bar{Z}_G = \frac{1 - \Omega^2 + j\Omega r}{j\Omega r} \cdot R; \quad (3.11)$$

Для частоти:

$$\bar{U}(j\Omega_m) = \bar{U}_m = 1 - \frac{j}{r} \quad (3.12)$$

$$|\bar{U}_m| = \frac{\sqrt{1 + r^2}}{r} \quad (3.13)$$

$$\bar{Z}_G = Z_{G_{\min}} = R \quad (3.14)$$

Приведемо:

$$\bar{U}(j\Omega) = W(\Omega) + j \cdot V(\Omega) \quad (3.15)$$

$$W(\Omega) = \frac{1 - \Omega^2 + \Omega^2 r^2}{1 - 2\Omega^2 + \Omega^4 + \Omega^2 r^2} \quad (3.16)$$

де $W(\Omega)$ - речовинна частотна характеристика.

$$V(\Omega) = \frac{\Omega^3 r}{1 - 2\Omega^2 + \Omega^4 + \Omega^2 r^2} \quad (3.17)$$

де $V(\Omega)$ - уявна частотна характеристика.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль

$$\begin{aligned} |\bar{U}(j\Omega)| = U(\Omega) &= \sqrt{W^2(\Omega) + V^2(\Omega)} = \\ &= \frac{\sqrt{1 - 2\Omega^2 + \Omega^4 + 2\Omega^2 r^2 - 2\Omega^4 r^2 + \Omega^6 r^2 + \Omega^4 r^4}}{1 - 2\Omega^2 + \Omega^4 + \Omega^2 r^2} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Фазова частотна характеристика:

$$\varphi(\Omega) = \operatorname{arctg} \frac{V(\Omega)}{W(\Omega)} = \operatorname{arctg} \frac{\Omega^3 r}{1 - \Omega^2 + \Omega^2 r^2} \quad (3.19)$$

$$\text{Тоді } \bar{U}(j\Omega) = U(\Omega) \cdot \exp \left[j\varphi(\Omega) \right] \quad (3.20)$$

Тоді при $f_V = 8\text{кГц}$:

$$\Omega_Z = \frac{\omega_Z}{\omega_m} = 2\pi f_Z \cdot \sqrt{LC} = 2\pi f_V \cdot \sqrt{LC} = 2, \text{ звідки}$$

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{\pi f_V} = \frac{1}{8000 \cdot \pi} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ або}$$

$$LC = 1600 \cdot 10^{-12} \text{ } \left[\right]^2 = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ } \left[\right]^2 \quad (3.21)$$

Визначимо енергію:

$$LI^2 = CU^2 \quad (3.22)$$

Тоді необхідна індуктивність:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

$$L = 40 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U^2}{S}; C = 40 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{S}{U^2} \quad (3.23)$$

При напрузі 220В:

$$L = \frac{2}{S}; C = 0,8 \cdot 10^{-9} \cdot S \quad (3.24)$$

Представимо графічні залежності.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рис. 3.13 Залежності індуктивності і ємності Г-Образного фільтра
індустріальних радіоперешкод від потужності однофазного навантаження

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Висновки

Електропривод змінного струму займає велику частку від усіх систем електроприводу.

Переважає більшість таких систем у якості привідного двигуна має асинхронний.

Для реалізації ефективного способу керування таким електроприводом обирають системи що містять керовані перетворювальні пристрої.

Система керування електроприводом реалізує ефективні закони регулювання параметрів асинхронного двигуна.

До структури керованого перетворювача може входити як регульований так і нерегульований випрямляч.

Для реалізації повністю керованої структури необхідно забезпечити випрямну частину перетворювача керованими ключовими елементами що забезпечують її функціонування.

Повністю керовані схеми випрямлення можуть забезпечити ефективне регулювання як споживання електричної енергії так і її віддачу у зовнішню мережу.

Процес генерування відбувається відповідно до режиму роботи електроприводу.

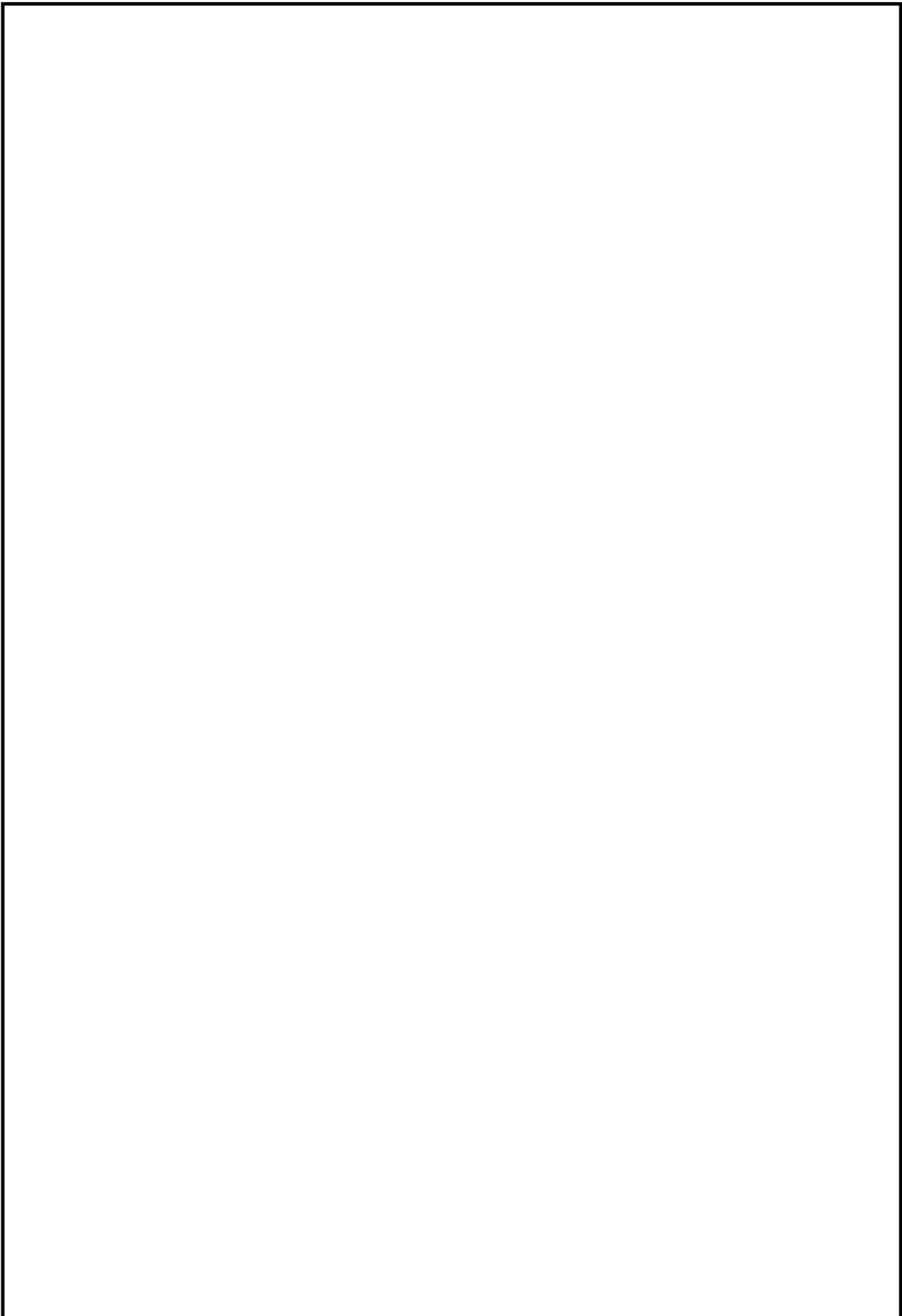
Ефективне регулювання потоками електричної енергії забезпечується оптимальним алгоритмом використання змодельованого сигналу що розраховується.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуляція частотного сигналу дозволяє підвищити якість регулювання та поліпшити характеристики керованого електроприводу з асинхронним двигуном.

Для підвищення якості споживання електричної енергії частотно-керованим асинхронним електроприводом слід використовувати вхідні фільтри.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.304-01	
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		