

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет  
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Аналіз та дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами»

*КНУ.МР.141.24.776-11*

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-23м /Максим РОМАНЮК/

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

д.е.н., професор

\_\_\_\_\_ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Нормоконтролер:

д.е.н., професор

\_\_\_\_\_ /Тетяна БЕРІДЗЕ/

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор

\_\_\_\_\_ /Олег СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ /Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг  
2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

РОМАНЮК Максим Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Аналіз та дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами

1. Термін подання студентом роботи: 09 грудня 2024 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є аналіз впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами. Завданням є дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Аналіз режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами; II. Аналіз показників якості електричної енергії електроприводів з асинхронними двигунами; III. Дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Перехідні процеси в електроприводі; II. Аналіз режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами; III. Дослідження якості електричної енергії в електроприводах з асинхронними двигунами; IV. Аналіз роботи фільтрів у структурі електроприводів з асинхронними двигунами.

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 та параметри електроприводів з асинхронними двигунами	10.09.24
2	Дослідження режимів роботи електроприводів	19.10.24
3	Аналіз показників якості електричної енергії	26.11.24
4	Аналіз впливу якості електричної енергії	30.11.24
5	Розробка заходів підвищення показників якості електричної енергії	07.12.24

Дата видання завдання 02.09.2024 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Максим РОМАНЮК  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Тетяна БЕРІДЗЕ  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи магістра на тему: «Аналіз та дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами»

Об'єкт розробки – показники якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами.

У першому розділі було проведено аналіз структури електроприводів з асинхронними двигунами, показані основні параметри й режими роботи електроприводів. Також було розглянуто показники якості електричної енергії режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами.

У другому розділі було проведено дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами. Також було обрано метод оцінки впливу показників якості перетворення електричної енергії.

У третьому розділі було проведено розрахунки щодо вибору методів поліпшення якості електричної енергії відповідно до режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами. Також була обрана структура фільтру та досліджено режими роботи розробленої системи.

**ЕЛЕКТРОПРИВОД, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГІЯ, ЯКІСТЬ.**

## Зміст

Вступ.....	6
Розділ 1. Аналіз режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами .....	13
1.1. Структура та параметри електроприводів з асинхронними двигунами	13
1.2. Дослідження режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами.....	18
Розділ 2. Аналіз показників якості електричної енергії електроприводів з асинхронними двигунами.....	22
2.1. Аналіз впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами .....	22
2.2. Вибір методів дослідження якості електричної енергії у структурах електроприводів з асинхронними двигунами .....	34
Розділ 3. Дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами .....	36
3.1. Дослідження показників якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами .....	36
3.2. Розробка заходів підвищення показників якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами .....	42
Висновки .....	51

## Вступ

Електропривод змінного струму на базі асинхронного короткозамкненого двигуна займає велику частку серед усіх типів електричних приводів які експлуатуються у промислових виробничих об'єктах.

Такий тип електроприводу набув широкого розповсюдження унаслідок простоти свого виконання.

Можна зазначити, що у переважній своїй більшості це нерегульовані електроприводи.

Але за останні роки розвиток промисловості та скорочення природних ресурсів що до їх необмеженого використання змінює підхід що до ефективності експлуатації подібних систем.

Тому з'являється необхідна потреба у зміні параметрів електричного приводу протягом його експлуатації відповідно до зміни режимів його роботи.

Таку можливість дозволяє забезпечити розвиток напівпровідникової техніки.

З'являється можливість використовувати для потреб розробки систем регулювання параметрів електроприводу новітні досягнення у галузі перетворювальної техніки.

На сам перед це вдається бути можливим завдяки розробці та появі на ринку перетворювальної техніки потужних повністю керованих напівпровідникових приладів.

Використання таких елементів при створенні систем регулювання параметрів електричного приводу надає нових характеристик та можливостей його застосування.

Особливо це спостерігається для електроприводу з асинхронними електричними електродвигунами.

Тим більше це надає новий виток у створенні та розробці систем при короткозамкненому виконанні останніх.

Звісно, що такий підхід не може задовольнити увесь перелік експлуатуємого обладнання, але може задовольнити потреби де це конструктивно можливо.

Таким чином при збереженні вже експлуатуємого обладнання у вигляді асинхронної короткозамкненої машини можна розширити спектр її використання, що у значній мірі дозволить розширити можливості що до змін у виробничому процесі на технологічній ділянці, або, навіть, у промисловому масштабуванні.

Також, звісно при збереженні вже експлуатуємої асинхронної машини з короткозамкненим ротором у структурі електроприводу доволі суттєво знижуються витрати на реалізацію подібних проектів безпосередньо у діючій технологічній установці.

Отже, розробка перетворювачів на новій напівпровідниковій базі та впровадження таких розробок на вже діюче електротехнічне обладнання дозволяє ефективно використовувати його відповідно до потреб у технологічному виробництві.

Що до характеристик електроприводу, яких він набуває із впровадженням подібних структур регульованого електроприводу з перетворювачем можна зазначити:

- системи електричного приводу на базі асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором що керуються за допомогою перетворювачів набувають можливості змінювати частоту обертання ротору асинхронного двигуну в залежності від параметрів вихідної напруги перетворювача, яка у свою чергу залежатиме від отриманого завдання на керування;
- системи електричного приводу на базі асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором що керуються за допомогою перетворювачів набувають можливості змінювати електромагнітний момент асинхронного двигуну в залежності від зміни значення динамічного навантаження та з корегуванням завдання, що у свою чергу надходить від системи керування.

Важливо також зазначити, що можливість системи електричного приводу на базі асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором що керуються за допомогою перетворювачів змінювати частоту обертання ротору асинхронного двигуну в залежності від параметрів вихідної напруги перетворювача забезпечується формуванням відповідного завдання на керування, яке у свою чергу залежатиме від отриманих значень сигналів зворотного зв'язку, що надходять від датчиків напруги на обмотці статора асинхронного двигуна та частоти обертання ротору електричної асинхронної машини.

Це так зване скалярне регулювання параметрів асинхронного електричного двигуна за допомогою функцій перетворювача при зміні частоти напруги живлення.

Здійснення такого однобічного регулювання забезпечується спеціальними алгоритмами формування сигналу завдання.



Керування такими системами здійснюється на основі порівняння завдання, отриманого на формування певної частоти обертання та сигналів, отриманих від датчиків.

При цьому корегування завдання відбувається за певним законом, що обирається у відповідності до характеру зміни навантаження на валу асинхронного електричного двигуна.

Тобто, можна стверджувати, що керування асинхронним електричним двигуном з короткозамкненим ротором відбувається підпорядковано до закону регулювання його параметрів.

Скалярне керування параметрами асинхронного короткозамкненого двигуна є простим та надійним способом регулювання його характеристик у обмежених режимах роботи.

Цей спосіб керування не є дуже дієвим при наявності у складі технологічного процесу складних виробничих механізмів, що мають підвищену потребу точності та швидкості відпрацьовування зміну параметрів технологічного завдання.

Для забезпечення подібних систем електроприводу на базі асинхронних електричних машин з короткозамкненим ротором, що живляться від керованих перетворювачів необхідним є зміна тактики у підходах щодо регулювання режимами роботи подібних систем.

Доволі ефективним є запровадження так званих систем векторного керування електричним приводом на базі асинхронного електричного двигуна з перетворювачем.

Такі системи дозволяють швидко формувати завдання щодо створення необхідного значення та напрямку моменту асинхронного електричного двигуна.

Можливість системи електричного приводу на базі асинхронних електричних двигунів з короткозамкненим ротором що керуються за допомогою перетворювачів змінювати електромагнітний момент асинхронного двигуну в залежності від зміни значення динамічного навантаження стає можливим завдяки надходженню значень від датчиків струму статора та положення ротора асинхронного електричного двигуну під час його роботи.

Слід також зазначити, що інформація з датчиків струму статора та положення ротора асинхронного електричного двигуну корегується у відповідності із завданням, та у подальшому надходить безпосередньо до системи керування.

Інформація від датчиків дозволяє визначити у свою чергу значення складових вектору потокозчеплення асинхронного електричного двигуну та сформувати так зване векторне керування параметрами асинхронної електричної машини.

Нажаль, не у всіх системах електроприводу можна встановлювати датчики магнітного потоку.

Там де відсутня можливість отримувати інформацію про значення та розподіл складових вектору магнітного потоку асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовують косвені методи визначення зазначених складових.

Подібні системи оснащуються додатково датчиками напруги на обмотці статора асинхронного двигуна.

Отже, можна бачити, що при роботі електричного приводу з асинхронним електричним двигуном та керованим перетворювачем суттєво поліпшуються можливості щодо регулювання його характеристик.

Негативною складовою наявності перетворювача у структурі електричного приводу є погіршення показників якості споживання електричної енергії.

Слід зазначити, що не залежно від способу керування та структури перетворювача, комутаційні процеси, що відбуваються під час його роботи у значній мірі впливатимуть на якісні характеристики споживання електричної енергії.

При цьому буде спостерігатись викривлення форми напруги живлення у наслідок наявності виникнення гармонійних складових у контурі навантаження.

Такі процеси зазвичай усуваються за допомогою фільтруючих елементів.

До таких елементів можна віднести стаціонарні установки, що містять індуктивні та ємнісні складові.

Параметри таких установок слід розраховувати виходячи з режимів енергоспоживання.

Електричні параметри мають задовольняти можливість подавляти певні складові у викривленій формі напруги живлення у відповідності до проведених досліджень.

На базі форми досліджуваної напруги живлення проводять уточненні розрахунки що до налагодження подібних фільтруючих структур.

Також важливим є схематичне з'єднання та реалізація можливої зміни конфігурації фільтруючих елементів.

Тобто можна зазначити, що важливим є не тільки розрахунок параметрів фільтруючого пристрою, але й визначення схеми з'єднання його елементів.

Ефективність застосування фільтруючих елементів у структурі електроприводу на базі асинхронного електричного двигуна з перетворювачем визначається за допомогою розрахунку показників якості споживання електричної енергії.

Також проводяться дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення із отриманням форми струмів та напруги.

Можна зазначити що наявність фільтруючих елементів, розрахованих у відповідності до режимів роботи електроприводів з асинхронними електричними двигунами, що живляться від керованих перетворювачів, дозволяє суттєво поліпшити показники якості споживання електричної енергії.

## Розділ 1. Аналіз режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами

### 1.1. Структура та параметри електроприводів з асинхронними двигунами

Розглянемо структуру системи електроприводу та складемо регульовальні рівняння стану.

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

Запишемо відповідності:

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

Тоді для векторного поля слід записати:

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

Накладемо обмеження на керуючі вектори.

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

Проведемо оптимізацію розглянутого контуру керування.

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

А отже еквівалентні опори:

$$\bar{x}_{12} \succ \bar{x}_2 \quad (1.5)$$

Розрахуємо значення:

$$\bar{x}_{12} \approx \bar{x}_2 \quad (1.6)$$

Проведемо порівняння:

1) маємо  $\bar{x}_{12} \succ \bar{x}_2$  й  $\bar{x}_{22} \succ \bar{x}_3$ , те  $\bar{x}_{12} \succ \bar{x}_3$ ;

2) маємо  $\bar{x}_{12} \approx \bar{x}_2$  й  $\bar{x}_{22} \approx \bar{x}_3$ , те  $\bar{x}_{12} \approx \bar{x}_3$

Застосуємо функціонал результуючої змінної.

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

де  $\omega_i$  - ваговий критерій.

Отже критерій ефективності:

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

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

розрахуємо параметри:

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

Тоді:

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

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

А отже оптимальна функція:

$$\begin{aligned}
 u(x_n) &= 1 \\
 u(x_{n-1}) &= \frac{1}{2n-1}
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

$$u(x_l) = \frac{1}{n-1} \prod_{i=l} \alpha_i$$

Тоді у контурі резонуюче значення:

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

отже:

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

Складемо функцію вагових коефіцієнтів:

$$K(\vec{X}) = W(\vec{K}(\vec{X}))
 \tag{1.11}$$

А отже у комплексній формі:



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

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

$$K(\vec{X}) \rightarrow \min_{x \in O_{\text{в}}}$$

$$K(\vec{X}) \rightarrow \min_{x \in O_{\text{в}}} K(\vec{X}) \quad (1.13)$$

Розрахунок системи керування електроприводом із застосуванням функціоналу оптимального вирішення завдання регулювання його параметрів виконується за зазначеними системами рівнянь.

## 1.2. Дослідження режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами

Комутацію ключових елементів а також її вплив на роботу електроприводу слід враховувати при розрахунках характеристик регульованого електроприводу.

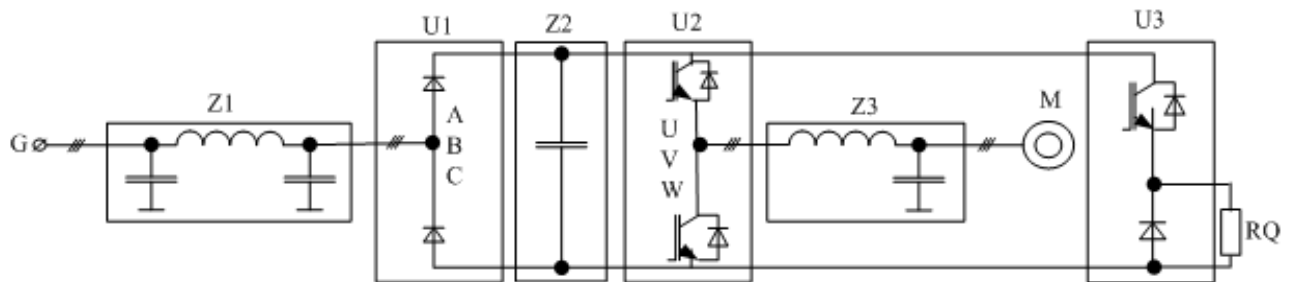


Рис. 1.1 Застосована структура при розрахунках характеристик регульованого електроприводу та впливі процесів комутації ключових елементів

Розрахуємо індуктивність:

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

Розглянемо графіки напруги відповідно до отриманих характеристик системи електроприводу.

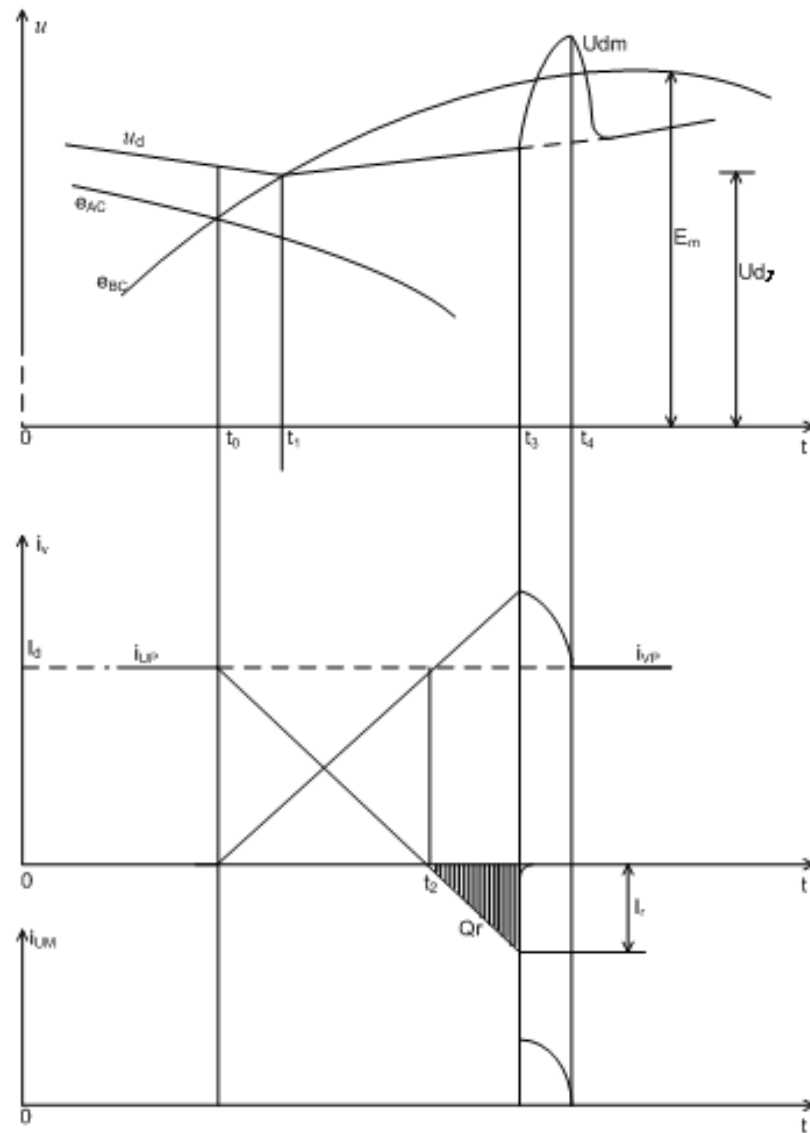


Рис. 1.2 Графіки напруги відповідно до отриманих характеристик системи електроприводу

Розрахуємо запас електричної енергії:

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

Отже:

$$2L_{\Sigma} \cdot I_r^2 = C_l \cdot \Delta U_d^2 \quad (1.16)$$

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

Тоді для шпаруватості  $\gamma = \alpha x_{\gamma}$ :

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

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

Розглянемо процеси при номінальних параметрах.

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

Тоді:

$$\chi = \nu \cdot \cos \varphi_l \quad (1.21)$$

Отже швидкість:

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

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi_1 = \frac{1 + \cos \gamma}{2} \approx \cos \frac{\gamma}{2} \quad (1.23)$$

Розрахунок системи керування електроприводом із застосуванням функціоналу оптимального вирішення завдання регулювання його параметрів виконується за зазначеними системами рівнянь та з врахуванням нових його параметрів.

## Розділ 2. Аналіз показників якості електричної енергії електроприводів з асинхронними двигунами

### 2.1. Аналіз впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами

Складемо рівняння системи керування електроприводом із застосуванням функціоналу оптимального вирішення завдання регулювання його параметрів.

Такі розрахунки можна виконувати за зазначеними системами рівнянь.

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

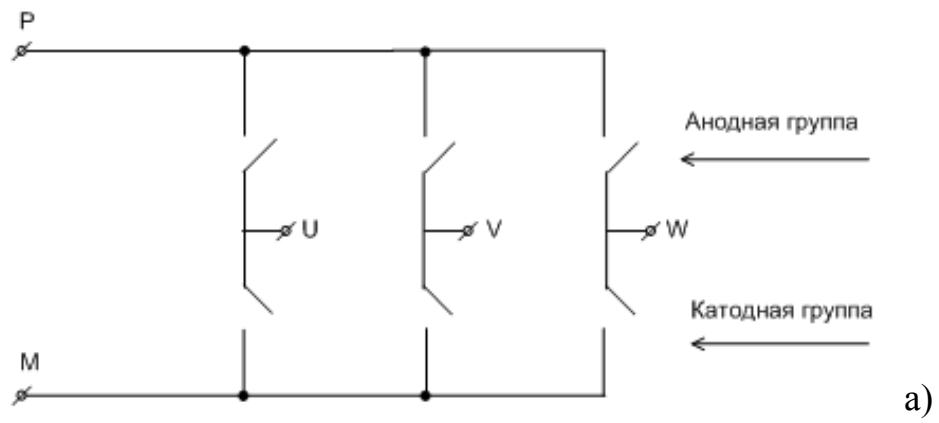
де  $\bar{a} = \exp j\frac{2\pi}{3}$  - одиничний вектор.

Тоді для вектору  $|\overline{U_S}| = U_S$  отримаємо:

$$U_s = \frac{2}{3}U_d;$$

$U_s = 0$  відповідно для рис. 2.1.

Покажемо режими роботи та сформуємо таблицю істинних значень функцій.



Включенные ключи в фазах			Вектор $\overline{U}_s$	
U	V	W	Положение	Велич. модуля
М	М	М	$\overline{U}_{sm}$	0
Р	М	М	$\overline{U}_{s1}$	$\frac{2}{3}U_d$
Р	Р	М	$\overline{U}_{s2}$	
М	Р	М	$\overline{U}_{s3}$	
М	Р	Р	$\overline{U}_{s4}$	
М	М	Р	$\overline{U}_{s5}$	
Р	М	Р	$\overline{U}_{s6}$	
Р	Р	Р	$\overline{U}_{sp}$	0

б)

Рис. 2.1 Режимы работы электроприводу та сформовані таблиці істинних значень функцій:

Розглянемо сектор  $S_{12}$ :

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

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

Отже:

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

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

Тоді:

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

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

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



Для модульованого сигналу:

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

Наведемо розподіл за секторами у векторному просторі.

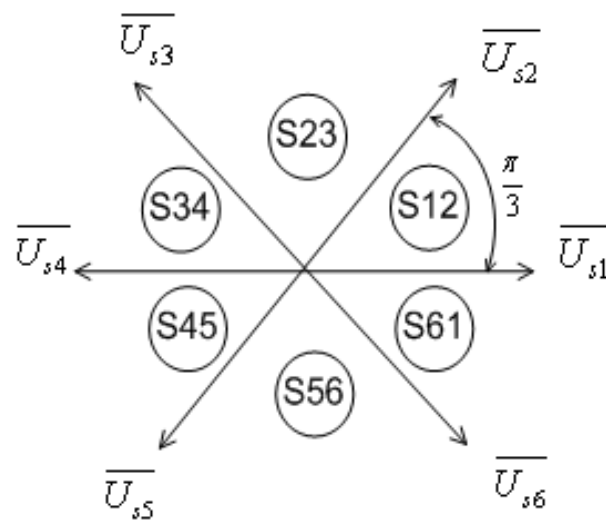


Рис. 2.2 Розподіл за секторами у векторному просторі

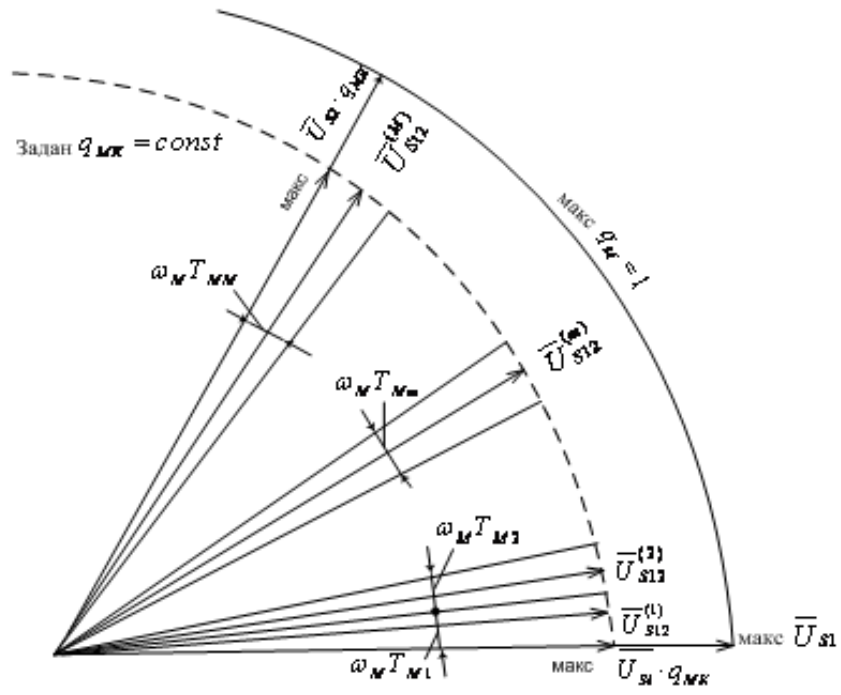


Рис. 2.3 Розподіл за секторами у векторному просторі

Розподіл за секторами у векторному просторі при  $S12$

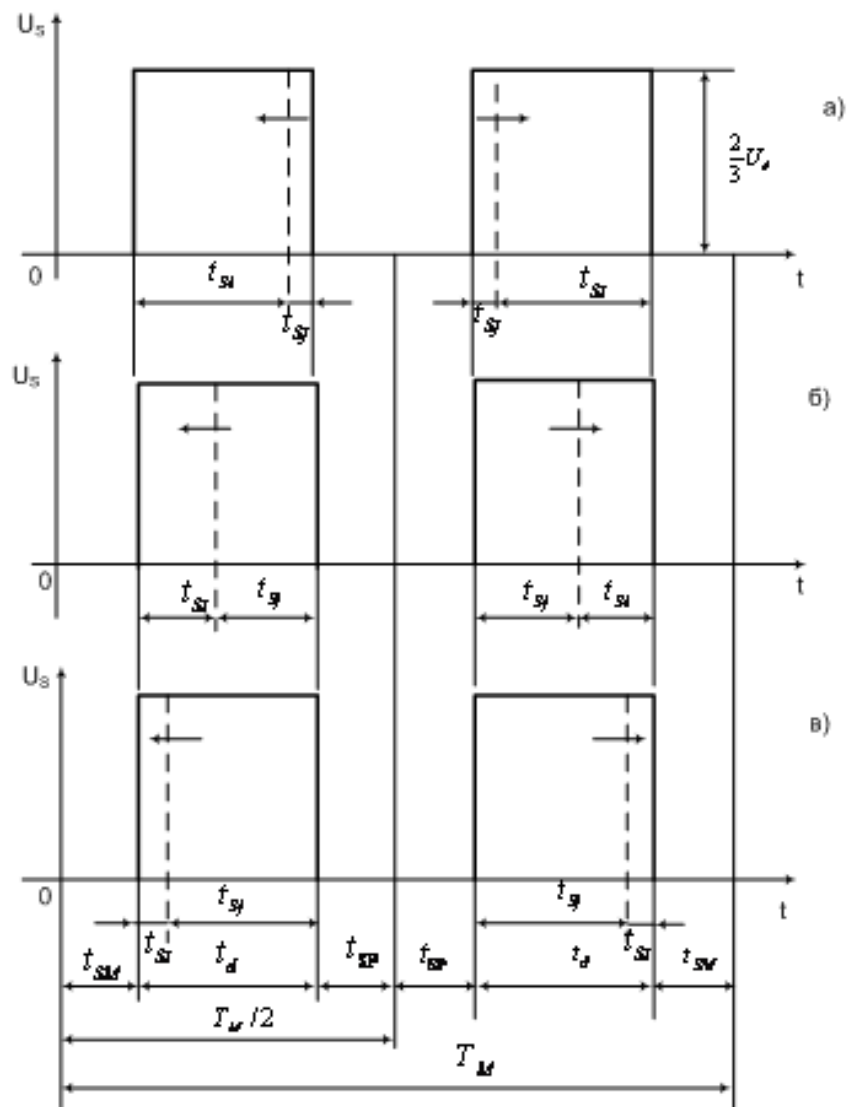


Рис. 2.4 Розподіл за секторами у векторному просторі при  $S_{12}$ :

У діаграмі є наступні допущення:

$t_{SM} = t_{SP}$  - нульова послідовність, при якій  $U_{SM} = U_{SP} = 0$ ;  $t_{SM} + t_{SP} = t_0$ ;

$t_{Si}, t_{Sj}$  - послідовність вектору, відповідно  $\overline{U_{Si}}$  й  $\overline{U_{Sj}}$

Тоді:

$$t_{S_i} + t_{S_j} = t_d; \quad t_d + t_0 = \frac{T_M}{2}$$

За напругою:

$$q_M = \frac{2t_d}{T_M} = [0...1] \quad (2.3)$$

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

Отже:

$$q_S = \frac{t_{S_i}}{t_d} = [1...0] \quad (2.5)$$

при  $t_d = const$ .

За напругою:

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

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

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

Наведемо результати розрахунків у вигляді отриманих діаграм напруги.

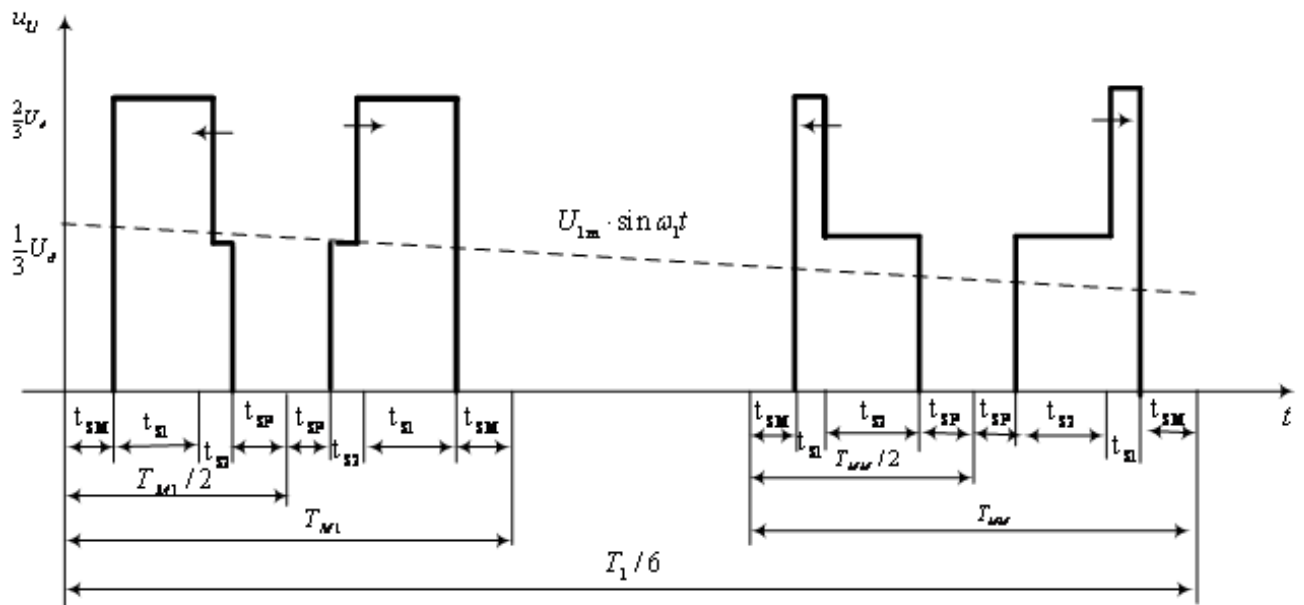


Рис. 2.5 Результати розрахунків у вигляді отриманих діаграм напруги

Складемо рівняння:

$$U_M = \dot{U} + \ddot{U} = U_d (1 + \kappa_{IV} \cdot \Gamma_M) \quad (2.9)$$

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

$Z_M$  - опір навантаження;

$$Z_L = \rho_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \text{ - хвильовий опір;}$$

$L_L \approx 0,25$  мкГн/м;  $C_L \approx 0,7$  мкФ/м – параметри кабелю.

Коливальний процес може бути представлено:

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

де:

Якщо  $t_V > 3t_t$  то  $U_M < 2U_d$ .

$$\text{Якщо} \quad t_V = 3t_t \quad (2.12)$$

$$\text{Визначимо} \quad t_t = \frac{l_L}{v_t} \quad (2.13)$$

де:

Для мережі живлення:

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

Тоді з (2.13) і (2.14) можна отримати підставивши у (2.12):

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

де:

Для рис. 2.6 б:

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

де:

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

Тоді:

$$R_f \gg 2 \sqrt{\frac{L_L}{c_f}} \quad (2.17)$$

Наведемо схематичне вирішення.

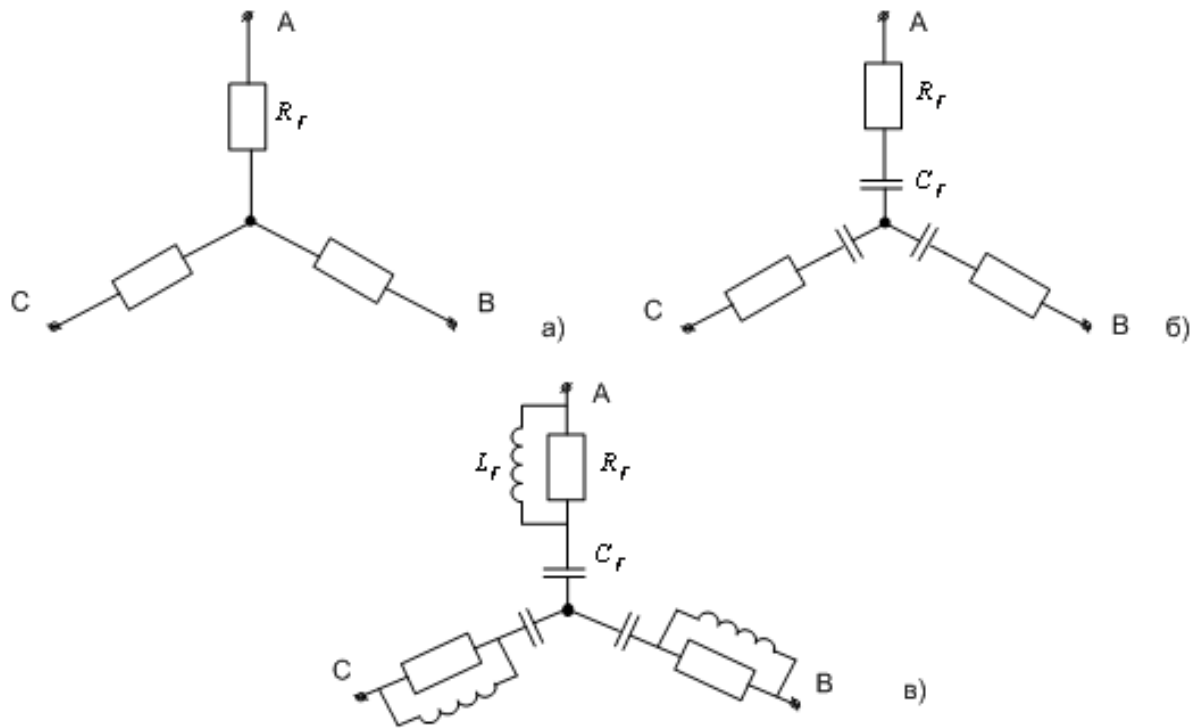


Рис. 2.6 Схематичне вирішення

Для рис. 2.6 в:

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

Тоді:



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

Розрахунок системи керування електроприводом із застосуванням функціоналу оптимального вирішення завдання регулювання його параметрів виконується за зазначеними системами рівнянь та з врахуванням наведених параметрів.

## **2.2. Вибір методів дослідження якості електричної енергії у структурах електроприводів з асинхронними двигунами**

Негативною складовою наявності перетворювача у структурі електричного приводу є погіршення показників якості споживання електричної енергії.

Слід зазначити, що не залежно від способу керування та структури перетворювача, комутаційні процеси, що відбуваються під час його роботи у значній мірі впливатимуть на якісні характеристики споживання електричної енергії.

При цьому буде спостерігатись викривлення форми напруги живлення у наслідок наявності виникнення гармонійних складових у контурі навантаження.

Такі процеси зазвичай усуваються за допомогою фільтруючих елементів.

Параметри таких установок слід розраховувати виходячи з режимів енергоспоживання.

Електричні параметри мають задовольняти можливість подавляти певні складові у викривленій формі напруги живлення у відповідності до проведених досліджень.

На базі форми досліджуваної напруги живлення проводять уточненні розрахунки що до налагодження подібних фільтруючих структур.

Також важливим є схематичне з'єднання та реалізація можливої зміни конфігурації фільтруючих елементів.

Ефективність застосовування фільтруючих елементів у структурі електроприводу на базі асинхронного електричного двигуна з

перетворювачем визначається за допомогою розрахунку показників якості споживання електричної енергії.

## Розділ 3. Дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами

### 3.1. Дослідження показників якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами

Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення необхідно проводити для отримання форми струмів та напруги.

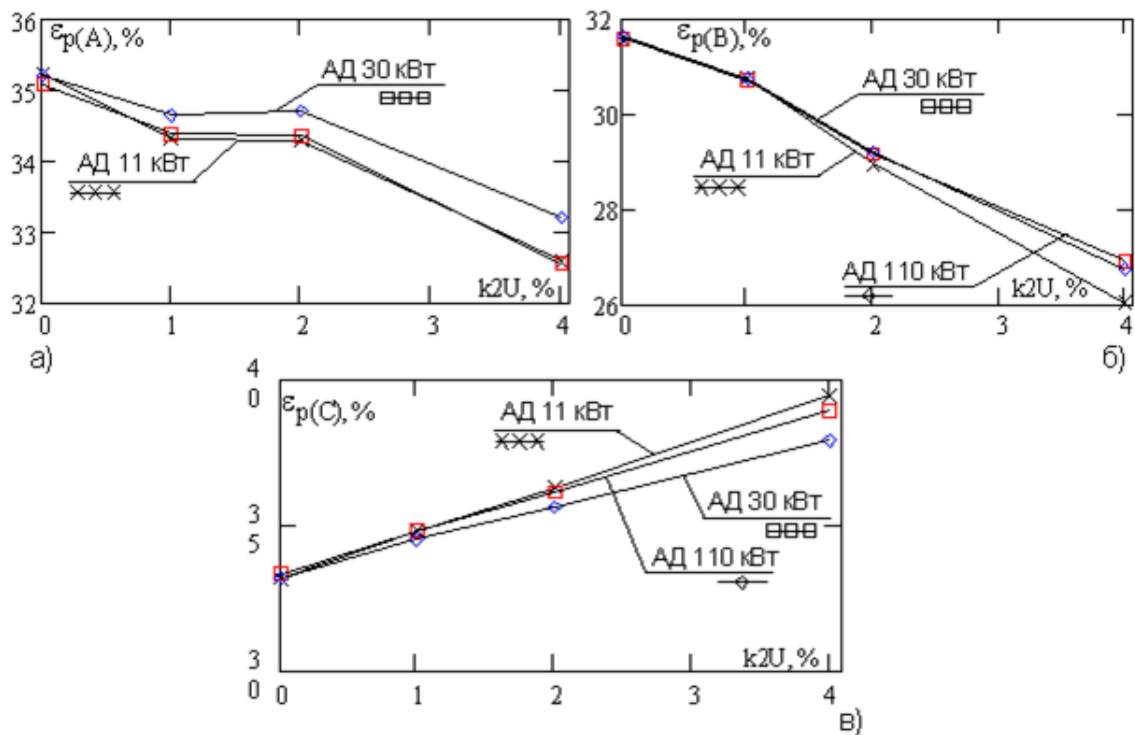


Рис. 3.1 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами струмів та напруги.

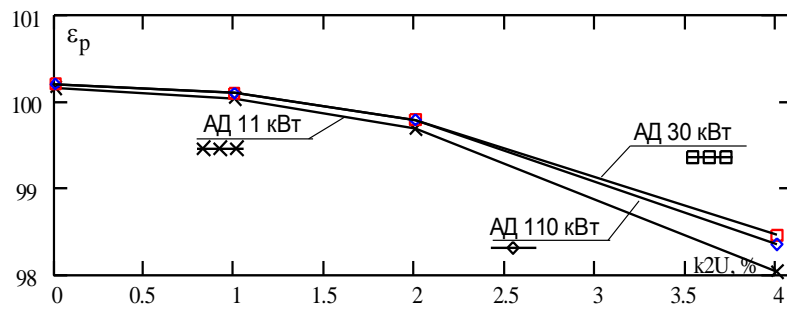


Рис. 3.2 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими узагальненою формами струмів та напруги.

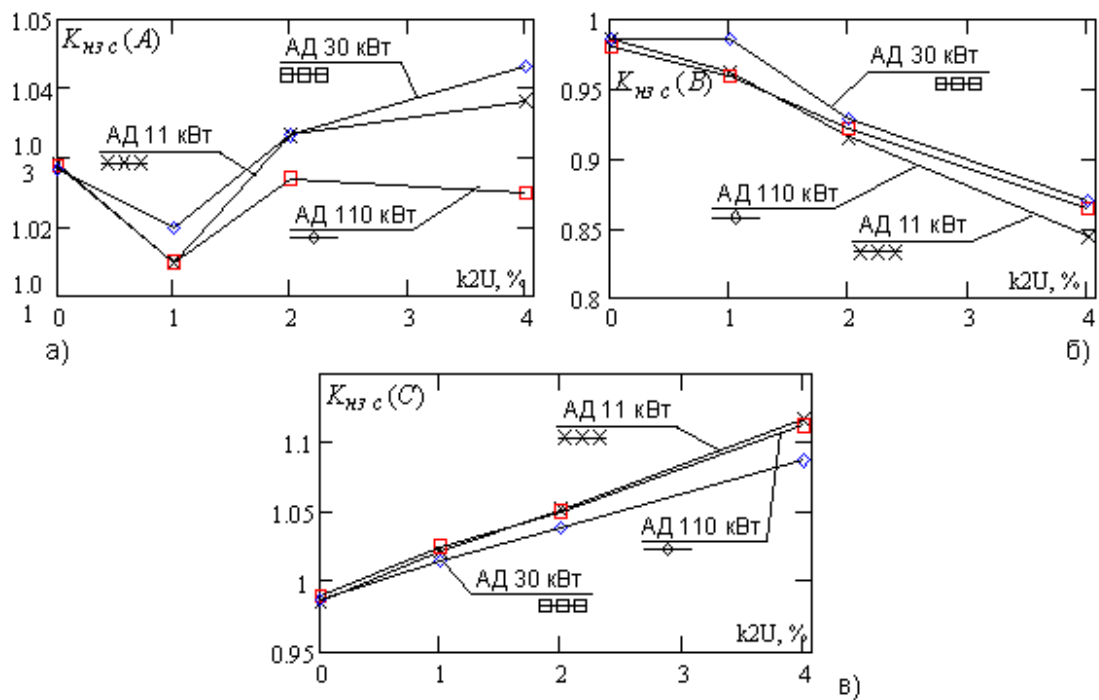


Рис. 3.3 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами фазних струмів та напруги.

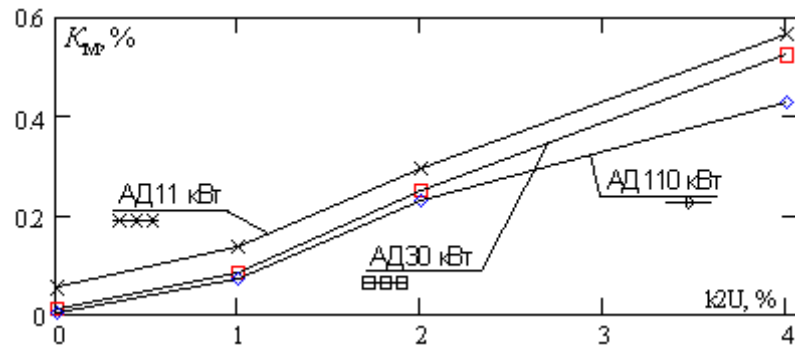


Рис. 3.4 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами моменту.

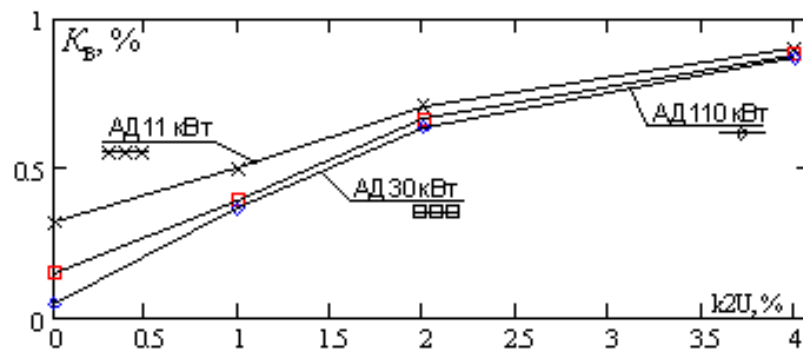


Рис. 3.5 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами вібростійкості.

Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення необхідно проводити також для варіанту частотного керування з отриманням форми струмів та напруги.

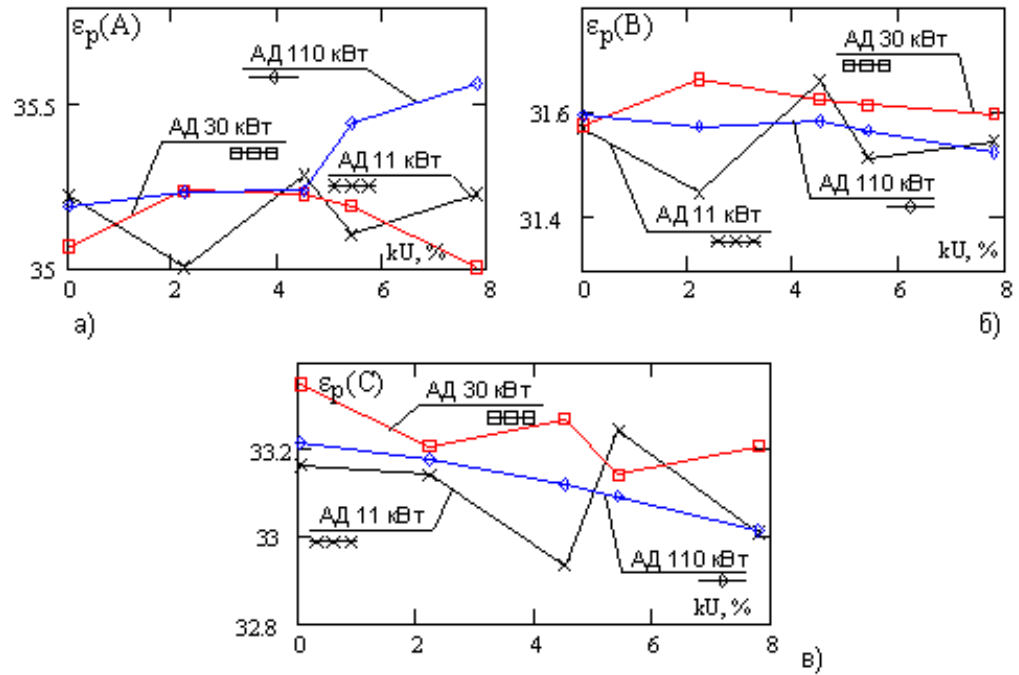


Рис. 3.6 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами споживання електричної енергії.

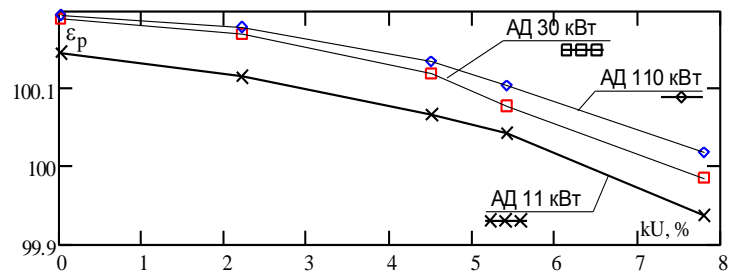


Рис. 3.7 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими узагальненою формами струмів та напруги.

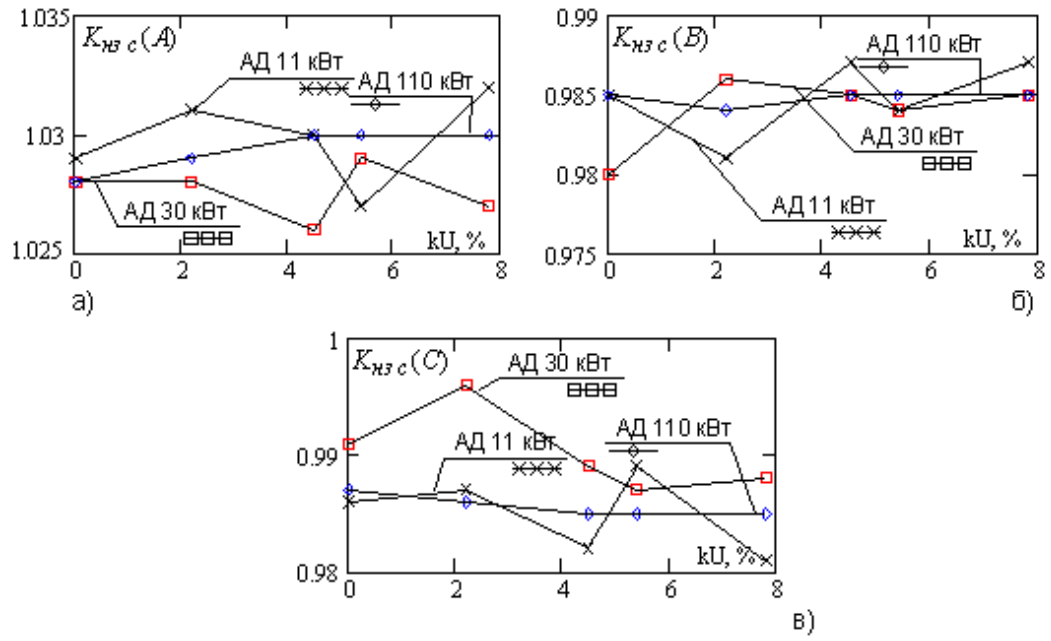


Рис. 3.8 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами фазних струмів та напруги.

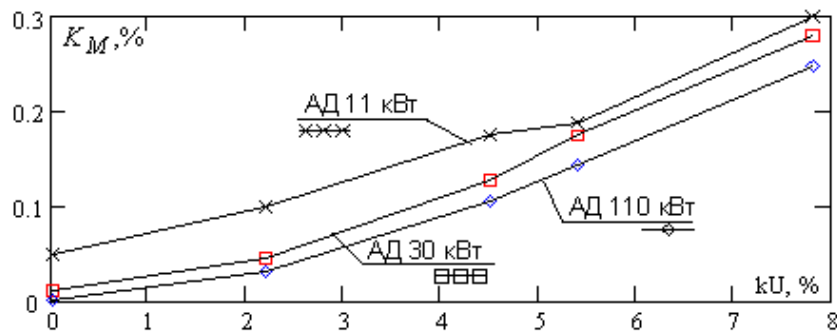


Рис. 3.9 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами вібростійкості.



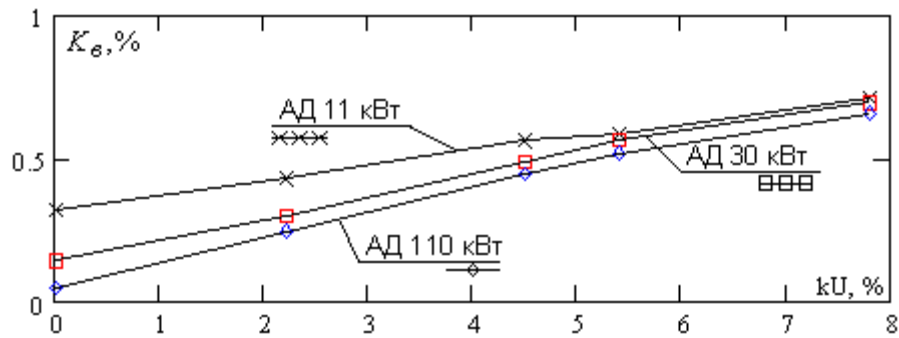


Рис. 3.10 Дослідження перехідних процесів у структурі електроприводів та мережі живлення за отриманими формами моменту.

Можна зазначити що наявність фільтруючих елементів, розрахованих у відповідності до режимів роботи електроприводів з асинхронними електричними двигунами, що живляться від керованих перетворювачів, дозволяє суттєво поліпшити показники якості споживання електричної енергії.

### 3.2. Розробка заходів підвищення показників якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами

Розрахуємо фільтруючі елементи:

$$Q = (U_{\phi} \omega)^2 3R = (\sqrt{3} U_{\phi} \omega_{\Delta})^2 3R_{\Delta};$$

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

$$\text{при } L_Y = L_{\Delta} \quad (3.2)$$

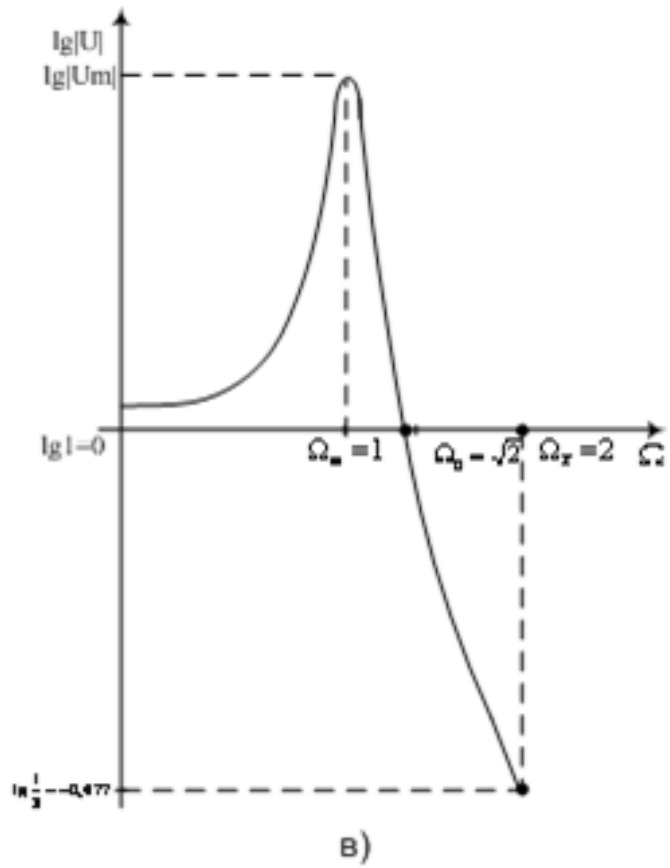
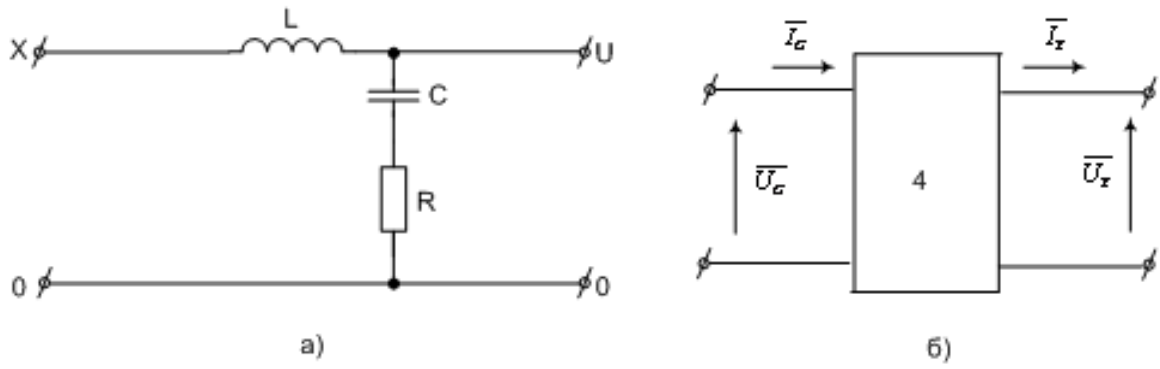


Рис. 3.11 Схема фільтруючого елементу:

Запишемо:

$$\overline{Z}_G = \frac{\overline{U}_G}{\overline{I}_G} = \frac{A \cdot \overline{Z}_Z + B}{C \cdot \overline{Z}_Z + D} \quad (3.3)$$

Тоді:

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

Отже:

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

Параметри:

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

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

Тоді з (3.6) і (3.7) та (3.3):

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

Представимо варіанти схематичного вирішення питання фільтрації.

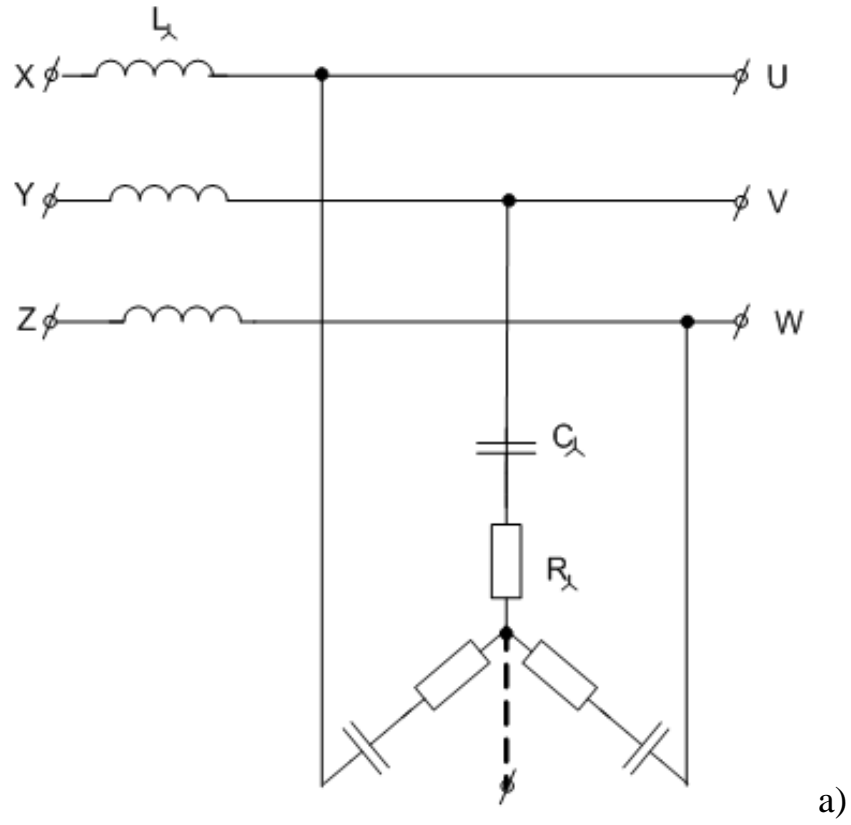


Рис. 3.12,а Схематичне вирішення питання фільтрації

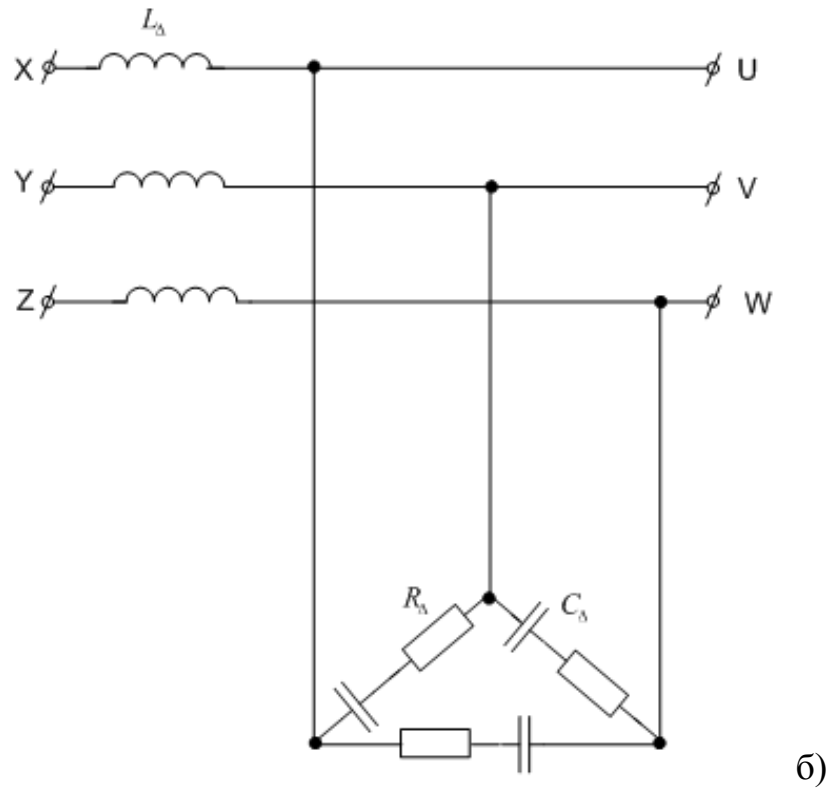


Рис. 3.12,б Схематичне вирішення питання фільтрації

Представимо напругу:

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

де

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ - частота коливань;}$$

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

$$r = \frac{R}{\rho} \text{ - відносний опір;}$$

$\Omega = \frac{\omega}{\omega_m}$  - відносна частота;

$\Omega_m = 1$ ,  $\Omega_Z = 2$  - частота зрізу.

Тоді:

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

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

А отже:

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

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

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

Визначимо:

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

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

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

Тоді:

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

Наведемо:

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

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

Для  $f_V = 8 \text{ кГц}$  :

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

$$\text{, тут } \sqrt{LC} = \frac{1}{\pi f_V} = \frac{1}{8000 \cdot \pi} = 40 \cdot 10^{-6} [\text{с}] \text{ та}$$

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

Отже:



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

Для фільтру:

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

Для номінальних параметрів:

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

За наведеними розрахунками покажемо розподіл залежності параметрів фільтруючих елементів при зміні характеристик електроприводу з перетворювачем.

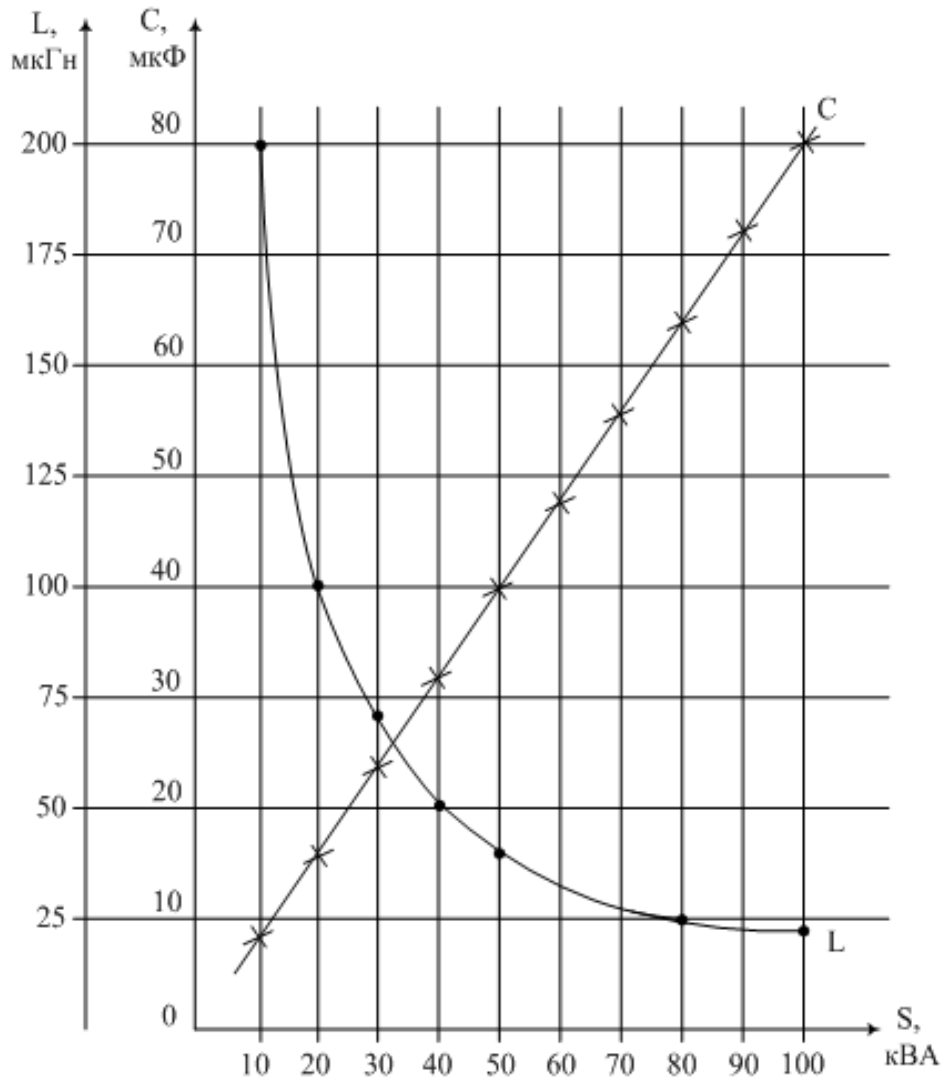


Рис. 3.13 Розподіл залежності параметрів фільтруючих елементів при зміні характеристик електроприводу з перетворювачем

## Висновки

У роботі було розглянуто показники якості електричної енергії у структурі електроприводів з асинхронними двигунами.

У першому розділі було проведено аналіз структури електроприводів з асинхронними двигунами, показані основні параметри й режими роботи електроприводів.

Також було розглянуто показники якості електричної енергії режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами.

У другому розділі було проведено дослідження впливу якості електричної енергії на параметри й режими роботи електроприводів з асинхронними двигунами.

Також було обрано метод оцінки впливу показників якості перетворення електричної енергії.

У третьому розділі було проведено розрахунки щодо вибору методів поліпшення якості електричної енергії відповідно до режимів роботи електроприводів з асинхронними двигунами.

Також була обрана структура фільтру та досліджено режими роботи розробленої системи.