

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**магістр**

(назва освітнього ступеня)

на тему:

Удосконалення керування

компенсаційними установками

для пускових режимів електроприводів

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи ЕМм-61

спеціальності 141 "Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Пановик Т.М.  
(прізвище та ініціали)

Керівник

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Зінь М.М.  
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Вакуленко О.О.  
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Тарасенко М.Г.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дана кваліфікаційна робота магістра містить у собі: 67 сторінок, 40 рисунків, 2 таблиці, 46 використаних першоджерел, \_\_ листів креслень формату А1 (слайдів).

**Об'єкт дослідження** – процеси компенсації реактивної потужності електроприводів.

**Предмет дослідження** – методи та засоби керування установками компенсації реактивної потужності електроприводів.

**Мета роботи** – покращення напруги мережі шляхом компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних та синхронних електроприводів.

**Методи дослідження:** теорія електротехніки, теорія електричних машин, методи комп'ютерного та фізичного моделювання.

**У роботі вирішено наступні основні задачі:**

1. Вдосконалено математичні моделі пускових режимів електроприводів, які базуються на використанні нелінійних диференціальних рівнянь та дають можливість отримати оптимальні критерії для швидкого компенсування реактивної потужності.

2. Вдосконалено системи керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності, що дає підвищення точності та швидкості компенсування реактивних навантажень.

**Ключові слова:** реактивна енергія, компенсація, асинхронний електропривод, синхронний електропривод, пусковий режим.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП .....	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	9
1.1 Аналіз взаємного впливу реактивної потужності та відхилення напруги .....	9
1.2 Установки компенсації реактивної потужності.....	13
Висновки до розділу 1 .....	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	19
2.1 Системи динамічної компенсації реактивної потужності .....	19
2.2 Проектування вимірювальних каналів .....	27
2.3 Вплив напруги живлення на пускові та усталені струми асинхронних двигунів.....	35
Висновки до розділу 2 .....	40
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ .....	41
3.1 Вибір критерію оптимальності та моделювання пускових процесів СД.....	41
3.2 Дослідження пуску синхронних двигунів за зниження якості електроенергії .....	45
3.3 Моделювання компенсації реактивної потужності з використанням СД.....	53

	4
Висновки до розділу 3 .....	57
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....</b>	<b>58</b>
4.1 Електробезпека та захисне заземлення електрообладнання .....	58
4.2 Надзвичайні ситуації воєнного часу .....	60
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>62</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....</b>	<b>63</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АД	– асинхронний двигун
АД ФР	– асинхронний двигун з фазним ротором
АПН	– аналоговий подільник напруги
АРЗ СД	– автоматичне регулювання збудження СД
БК	– блок керування
БТРР	– блок тиристорно-регульованих реакторів
ВДТ	– вольтододатковий трансформатор
Д	– джерело живлення
ЕПС	– електропостачальна система
ЗЗК	– задавач зони керування
К	– ключ силовий
КБ	– конденсаторна батарея
КЛ	– кабельна лінія електропередачі
КП	– квазізрівноважений вимірювальний перетворювач
КУ	– конденсаторна компенсвальна установка
МК	– однокристальний мікроконтролер
Н	– навантаження
ОВ	– одновібратор
ОП	– операційний підсилювач
ПВ	– пристрій віднімання
ПЕ	– порогів елемент
ПК	– пристрій коректування
ПЛ	– повітряна лінія електропередачі
ПН	– вимірювальний перетворювач напруг
ПП	– вимірювальний перетворювач реактивної потужності
ПС	– вимірювальний перетворювач струмів

ПФС	–	вимірювальний перетворювач фазового зсуву
Р	–	регулятор
СД	–	синхронний двигун
СІФК	–	система імпульсно-фазового керування
СКЗ	–	сенсор короткого замикання
СТК	–	статичний тиристорний компенсатор реактивної потужності
СФ	–	силовий фільтр
Т	–	трансформатор силовий
ТН	–	трансформатор напруг вимірювальний
ТПП	–	тиристорно-перемикальний пристрій
ТРК	–	тиристорно-реакторне коло
ТРР	–	тиристорно-регульований реактор
ТС	–	трансформатор струму вимірювальний
ФІ	–	формував імпульсів
ФП	–	фазочутливий інтегрувальний перетворювач

## ВСТУП

**Актуальність теми.** При пуску синхронних та асинхронних двигунів виникають струми, що приводять до різкого зниження напруги у мережі. Це приводить до ряду небажаних наслідків, серед яких збільшення часу пуску двигунів, зменшення резерву динамічної та статичної стійкості вузлів електричних мереж.

Найефективнішим заходом підвищення величини напруги під час пуску двигунів є компенсація реактивної потужності. Водночас для регулювання силових елементів пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів та оцінка ефективності процесу пуску.

Тому очевидним постає актуальне завдання, яке полягає в оптимізації процесу компенсації реактивної потужності під час пуску потужних синхронних та асинхронних електроприводів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає в покращенні напруги мережі шляхом компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних та синхронних електроприводів.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Вивчити способи компенсації реактивної потужності в пускових режимах електроприводів.
2. Розглянути процеси компенсації реактивної потужності з використанням тиристорних компенсаторів.
3. Запропонувати комплекс заходів компенсації реактивної потужності в пускових режимах електроприводів.

**Об'єкт дослідження** – процеси компенсації реактивної потужності електроприводів.

**Предмет дослідження** – методи та засоби керування установками компенсації реактивної потужності електроприводів.

**Методи дослідження:** теорія електричних машин, теорія електротехніки, фізичне та комп'ютерне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає наступному:

1. Вдосконалено математичні моделі пускових режимів електроприводів, які базуються на використанні нелінійних диференціальних рівнянь та дають можливість отримати оптимальні критерії для швидкого компенсування реактивної потужності.

2. Вдосконалено системи керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності, що дає підвищення точності та швидкості компенсування реактивних навантажень.

**Практичне значення отриманих результатів:** провадження нових даних при проектуванні систем для компенсування реактивної потужності в пускових режимах електроприводів.

**Публікації.** Основні положення та результати кваліфікаційної роботи магістра доповідалися на ІХ Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів ТНТУ імені Івана Пулюя «Актуальні задачі сучасних технологій» (25-26 листопада 2020 року, м. Тернопіль).



## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Аналіз взаємного впливу реактивної потужності та відхилення напруги

В загальному випадку схема електропостачання електроприводів (рис. 1.1) складається з повітряної лінії електропередач (ПЛ), трансформатора (Т1), кабельної лінії електропередач (КЛ), трансформатора (Т2), синхронних (СД) і асинхронних (АД) двигунів. При роботі асинхронних та синхронних двигунів в першу чергу погіршуються такі показники якості електроенергії, як коливання та відхилення напруги [1-7].

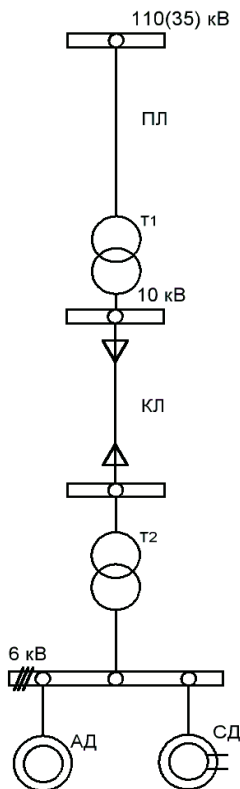


Рисунок 1.1 – Схема електропостачання за наявності АД та СД

Дослідження вказують [2, 8, 9], що величина втрат від відхилення показників якості електроенергії є важливою техніко-економічною характеристикою об'єкта та може виступати критерієм оптимізації, який спрямований на покращення показників якості електричної енергії [1, 7, 10].

Споживання активної та реактивної потужностей АД та СД визначається моментом навантаження.

Активна потужність синхронного двигуна

$$P = -\frac{3U}{\omega_0 L_d} \left( E \sin \theta + \frac{U}{2} \sin 2\theta \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \right) = M \omega_0 / p_0, \quad (1.1)$$

де  $M$  – момент навантаження на валу;

$\omega_0$  – частота напруги живлення;

$p_0$  – кількість пар полюсів;

$U$  – напруга електричної мережі;

$E$  – електрорушійна сила в обмотці якоря;

$\theta$  – кут навантаження синхронного двигуна;

$L_d, L_q$  – індуктивності статорної обмотки по осях.

Реактивна потужність синхронного двигуна

$$Q = -\frac{3U}{\omega_0 L_d} \left( E \cos \theta - U \left( 1 + \sin^2 \theta \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \right) \right). \quad (1.2)$$

Електрорушійна сила в обмотці якоря

$$E = p_0 \omega M_{sf} I_f, \quad (1.3)$$

де  $\omega$  – частота обертів ротора;

$M_{sf}$  – взаємні індуктивність між обмотками ротора та статора;

$I_f$  – струм обмотки збудження.

Збільшення напруги на клеммах синхронного двигуна призводить до значного погіршення його компенсувальної здатності. Значення активної та реактивної потужностей і струму асинхронного двигуна можна визначити за спрощеними формулами

$$P = \frac{U^2 \frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2}; \quad Q = \frac{U^2 X}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2}; \quad I = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2}}, \quad (1.4)$$

де  $U$  – напруга живлення;

$R_r$  – опір ротора;

$X = X_s + X_r$  – сумарний опір статора і ротора двигуна;

$s$  – ковзання ротора.

Для визначення відхилення напруги на затискачах установки, яка живиться по лінії КЛ і через трансформатор Т2 (рис. 1.1), необхідні імовірнісні характеристики величини навантаження двигунів в залежності від технологічних режимів роботи.

Коефіцієнт завантаження  $i$ -го двигуна по активній потужності  $\beta_i = \frac{P_i}{P_{ном.i}}$  може змінюватись в інтервалі для таких характерних режимів: неробочий хід двигуна, номінальне навантаження двигуна  $\beta_{ном} = 1$ , максимальне навантаження двигуна  $\beta_{max} = 1,8$ . Водночас, коефіцієнт завантаження двигуна по реактивній потужності  $\alpha_i = \frac{Q_i}{Q_{ном.i}}$  змінюється в порівняно вузьких межах  $\alpha_{max} = 1,2$ .

Під час пуску СД та АД характерним є істотне збільшення споживання активної та реактивної потужностей, а також струму.

При відомих значеннях  $\beta_i$  та  $\alpha_i$  втрати напруги в лінії складають

$$\Delta U = \frac{R_{\text{л}} \sum \beta_i P_{\text{ном.}i} + X_{\text{л}} \sum \alpha_i Q_{\text{ном.}i}}{U_1}, \quad (1.5)$$

де  $R_{\text{л}}$ ,  $X_{\text{л}}$  – активний і реактивний опори лінії електропередачі та трансформатора;

$U_1$  – напруга зі сторони мережі живлення.

Підсумовування проводиться за кількістю увімкнених електроприводів з урахуванням можливості одночасного їх пуску.

Значення напруги на затискачах установки

$$U_2 = U_1 - \Delta U.$$

Розрахунки показують, що рівень напруги  $U_2$  на вводі установки (рис. 1.1) не є постійною величиною, навіть при незмінній напрузі трансформатора і номінальному струмі збудження синхронного двигуна, і залежить від навантаження і опору лінії електропередач. Межі відхилення напруги на установці в межах допустимих опорів лінії електропередач і заданих навантажень значно перевищують допустимі згідно з ГОСТ 13109-97 значення.

Втрати активної  $\Delta P_{\text{л}}$  і реактивної  $\Delta Q_{\text{л}}$  потужностей в живлячій лінії і силовому трансформаторі

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{\sum (\beta_i^2 P_{\text{ном.}i}^2 + \alpha_i^2 Q_{\text{ном.}i}^2)}{U_1^2} R_{\text{л}}; \quad \Delta Q_{\text{л}} = \frac{\sum (\beta_i^2 P_{\text{ном.}i}^2 + \alpha_i^2 Q_{\text{ном.}i}^2)}{U_1^2} X_{\text{л}}. \quad (1.6)$$

Враховуючи взаємозв'язок напруг та потужностей, розрахунок необхідно проводити шляхом послідовних наближень.

## 1.2 Установки компенсації реактивної потужності

Робота установок компенсації реактивної потужності побудована на використанні наступних компонентів:

- тиристорно-регульованих реакторів;
- тиристорних ключів;
- нерегульованих конденсаторних батарей;
- дискретно-регульованих конденсаторних батарей.

Пристрої динамічної компенсації реактивної потужності відрізняються способом керування та способом ввімкнення конденсаторних батарей.

Найпростішими є установки, в яких використано ключі (контактори або вимикачі) для перемикання конденсаторів [41]. Установка (рис. 1.2) містить:

- БК – блок керування;
- ПЕ – пороговий елемент;
- АПН – аналоговий подільник напруги;
- ПН, ПС ПП – перетворювач напруги, струму, потужності;
- ТПП – тиристорно-перемикальний пристрій;
- КБ – конденсаторну батарея;
- К1–К3 – силові ключі;
- $VD1, VD2$  – діоди;
- $R$  – регульований резистор;
- $C1$  – поздовжню секцію конденсаторів;
- $C2$  – поперечну секцію конденсаторів.

В [42] описано установку регулювання напруги та реактивної потужності в електромережах напругою до 12 кВ, які живлять потужні АД. Будова даної установка (рис. 1.3) наступна:

- КБ – конденсаторна батарея;
- ВДТ – послідовний вольто-додатковий трансформатор;
- К1, К2 – силові ключів;
- $R1$  – регульований резистор;
- СКЗ – сенсор короткого замикання;

- БК – блок керування
- ПН – перетворювач напруги;
- Н – підключене навантаження.

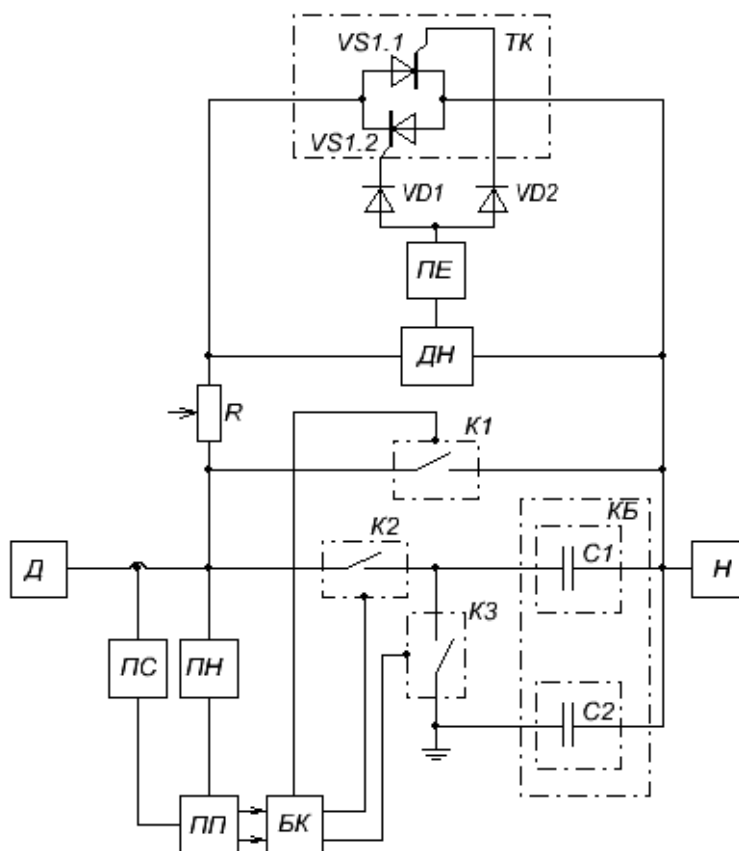


Рисунок 1.2 – Установка компенсації реактивної потужності з використанням дискретно-регульованих конденсаторів

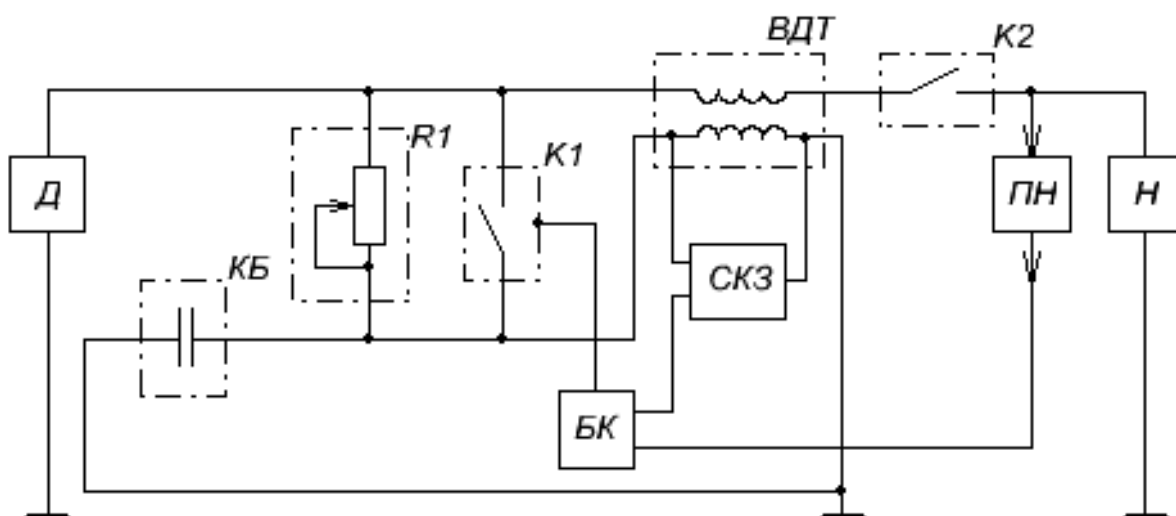


Рисунок 1.3 – Установка компенсації реактивної потужності з поперечним регулюванням

У [43] наведено установку для поздовжньо-поперечної компенсації втрат напруги та реактивної потужності в електричних мережах напругою до 1,2 кВ, які живлять потужні АД (рис. 1.4). Установка містить: блок керування БК, трансформатор Т, керований силовий ключ К1, конденсаторну батарею КБ.

У [44] розглянуто установку для збільшення коефіцієнта потужності споживачів зі змінним характером навантаження, яка містить статичний тиристорний компенсатор СТК (рис. 1.5).

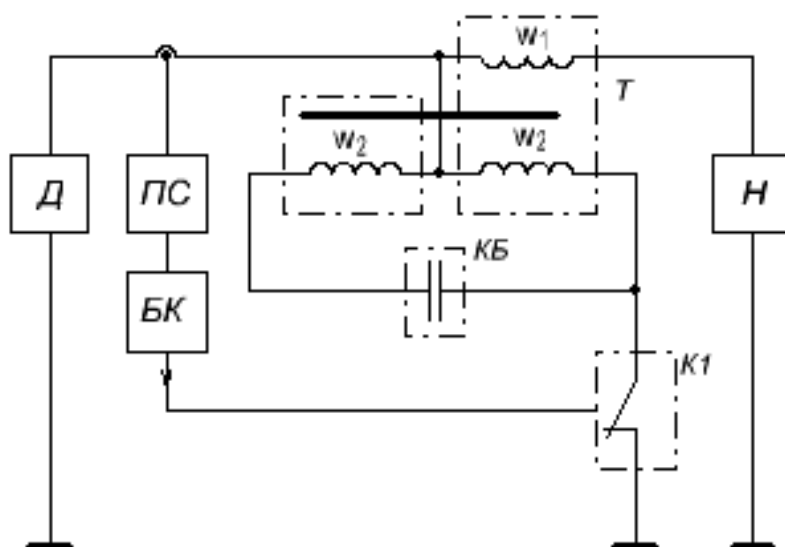


Рисунок 1.4 – Установка компенсації реактивної потужності з поздовжньо-поперечним регулюванням

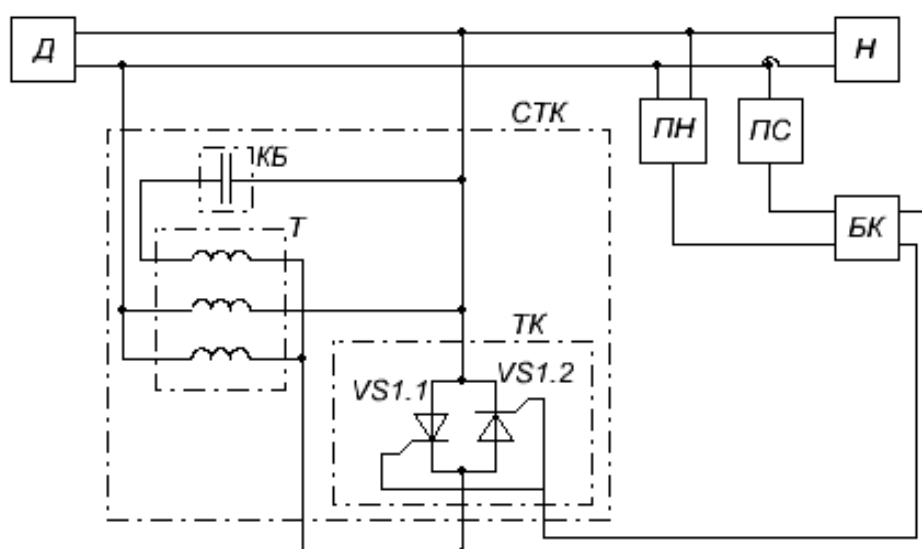


Рисунок 1.5 – Установка компенсації реактивної потужності з використанням СТК

В [45] запропоновано систему живлення швидкозмінного навантаження (рис. 1.6), яка складається із трансформатора  $T$ , лінії живлення  $L$ , джерела живлення  $D$ , тиристорно-перемикального пристрою ТПП, до вторинної обмотки якого ввімкнений СТК та навантаження  $H$ .

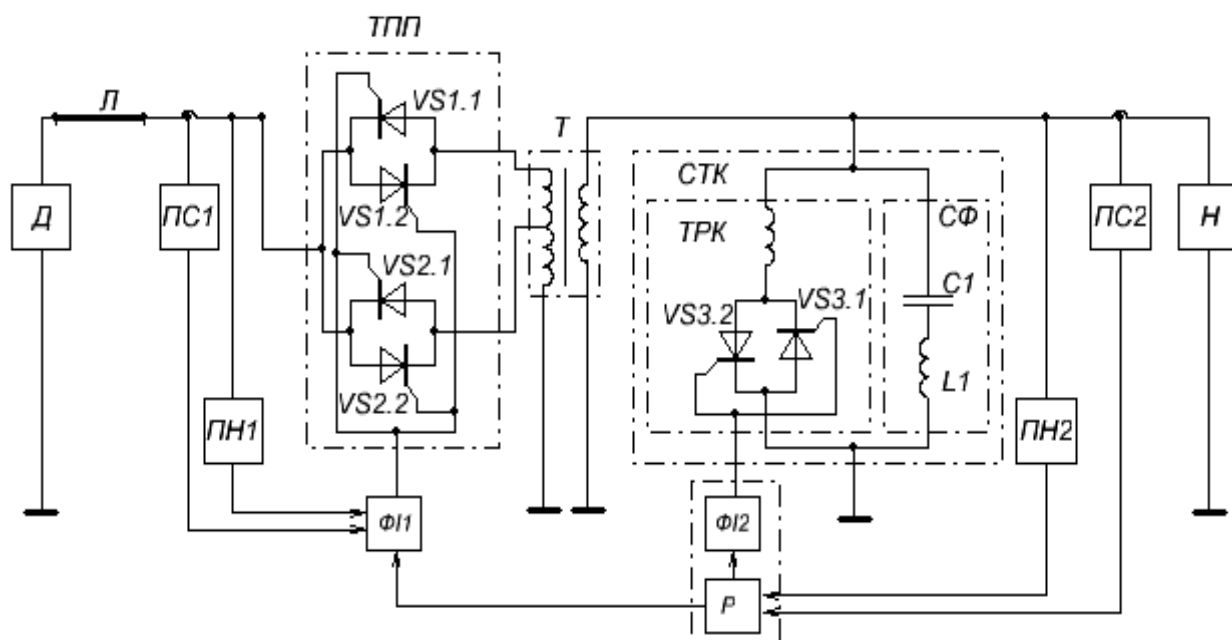


Рисунок 1.6 – Установа компенсації реактивної потужності з регулюванням напруги

В [46] запропоновано установку для компенсації реактивної потужності з використанням СТК (рис. 1.7).

Кути керування  $\gamma$  тиристорів  $VS1...VS3$  відраховуються від додатного максимуму анодної напруги на тиристорах і змінюються від  $0$  до  $\pi/2$ . Реактивні потужності зсуву основної гармоніки  $Q$  описується виразом

$$Q = \frac{U_{\max}^2}{2\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right),$$

де  $U_{\max}$  – амплітуда лінійної напруги.



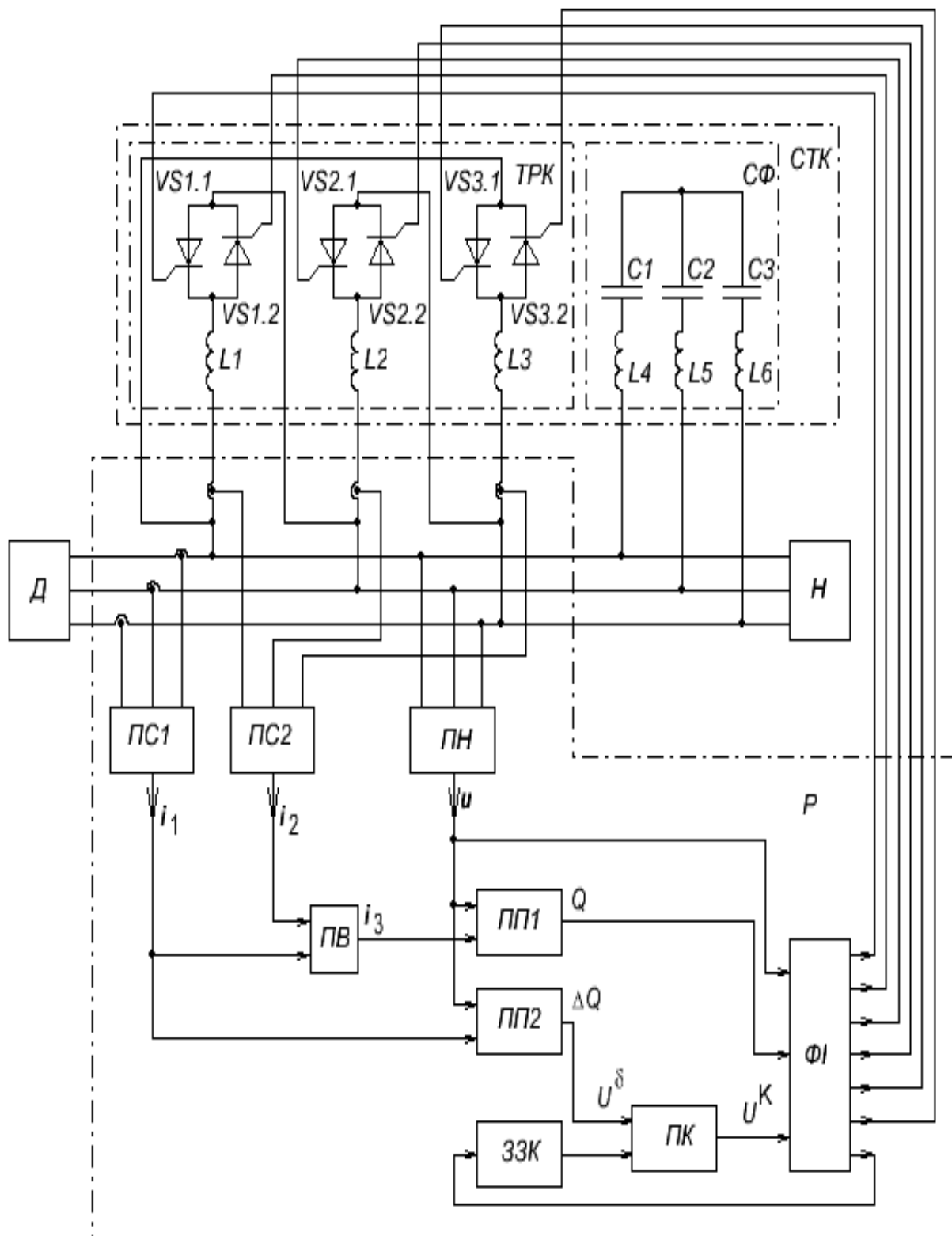


Рисунок 1.7 – Установка компенсації реактивної потужності  
з використанням СТК

## Висновки до розділу 1

1. Аналіз режимів роботи електроприводів в електромережах та проведений огляд існуючих методів їх дослідження показав, що немає досить простих і точних методик розрахунку їх сумісних режимів роботи, які враховують взаємний вплив параметрів мережі та двигунів.

2. Для поліпшення показників якості та зменшення провалів напруги доцільно використовувати пристрої динамічної компенсації реактивної потужності та СД з системою автоматичного регулювання збудження.

3. Огляд установок динамічної компенсації показав, що найбільш ефективними є пристрої, що побудовані на основі СТК, але їх робота в пускових режимах асинхронних та синхронних двигунів потребує доопрацювань.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Системи динамічної компенсації реактивної потужності

Наявність пускових режимів потужних електроприводів приводить до різкого зменшення напруги й вимагає миттєвого регулювання реактивної потужності. Найкращим методом для запобігання зниження втрат напруги в мережі під час пуску електроприводів є використання установок динамічної компенсації реактивної потужності.

Прогрес у створенні потужних напівпровідникових приладів дав поштовх для розробки швидкодіючих регульованих статичних тиристорних компенсаторів реактивної потужності (СТК). Зазначені установки відрізняються надійністю, хорошими динамічними характеристиками, зручністю при експлуатації.

На рис. 2.1 подано приклад реалізації СТК для мереж з ізольованою нейтраллю зі схемою з'єднання „трикутник”. Схему заміщення вузла мережі зі статичним тиристорним компенсатором реактивної потужності та навантаженням зображено на рис. 2.2.

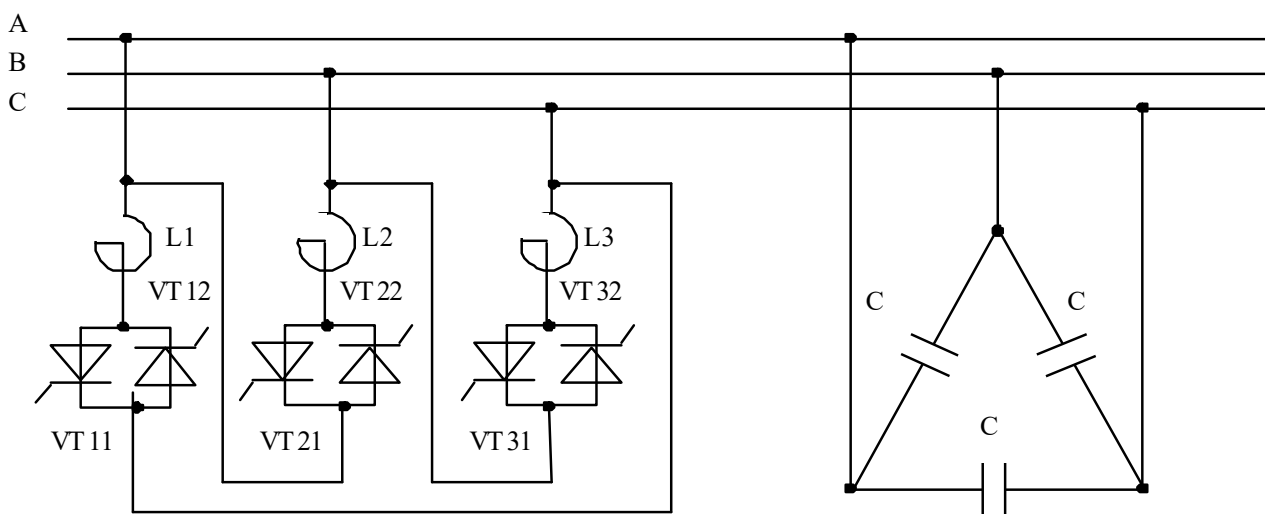


Рисунок 2.1 – Схема статичних тиристорних компенсаторів (СТК)

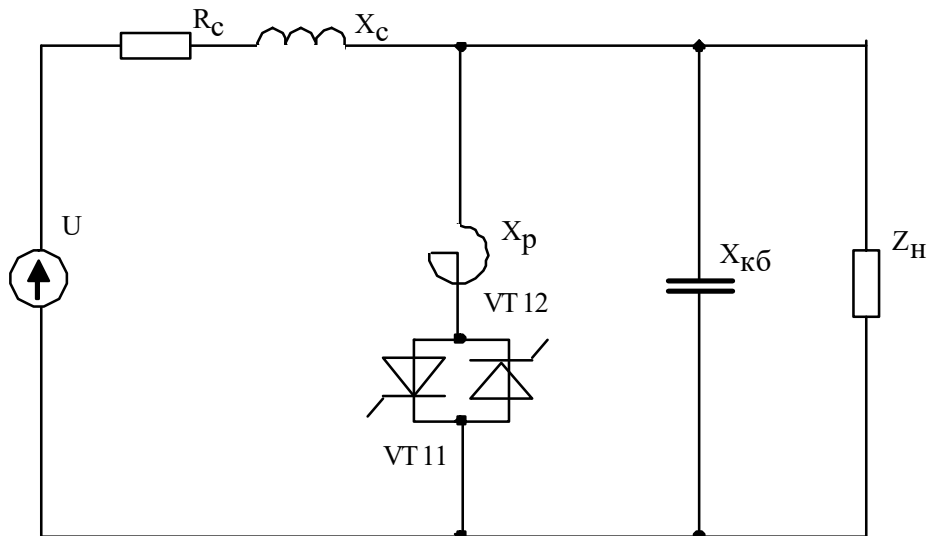


Рисунок 2.2 – Схема заміщення вузла мережі з СТК і навантаженням

Розв'язавши диференційне рівняння

$$U_m \cdot \cos(\omega t + \gamma) = i \cdot (R_p + R_c) + \omega(L_p + L_c) \frac{di}{d\omega t} \quad (2.1)$$

можна отримати вираз для обчислення миттєвого струму тиристорно-регульованого реактора. Із врахуванням початкових умов  $\omega t = \gamma$ ,  $i = 0$ , отримаємо

$$i(\omega t) = I_m \cdot \left[ \cos(\omega t - \varphi) - \cos(\gamma - \varphi) \cdot e^{-\frac{\omega t - \gamma}{\omega \tau}} \right] \quad (2.2)$$

де  $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{[R_p + R_c]^2 + [\omega \cdot (L_p + L_c)]^2}}$  – струм через ТРР при  $\gamma = 0$ ;

$\varphi = \arctg \frac{\omega(L_p + L_c)}{R_p + R_c}$  – кут зсуву фаз основної гармоніки струму через

ТРР;

$$\tau = \frac{L_p + L_c}{R_p + R_c} \text{ — константа часу кола.}$$

Форма струму в тиристорно-регульованому реакторі при збільшенні кута ввімкнення  $\gamma$  зменшує свою амплітуду, практично не змінюючи фазовий зсув (рис. 2.3).

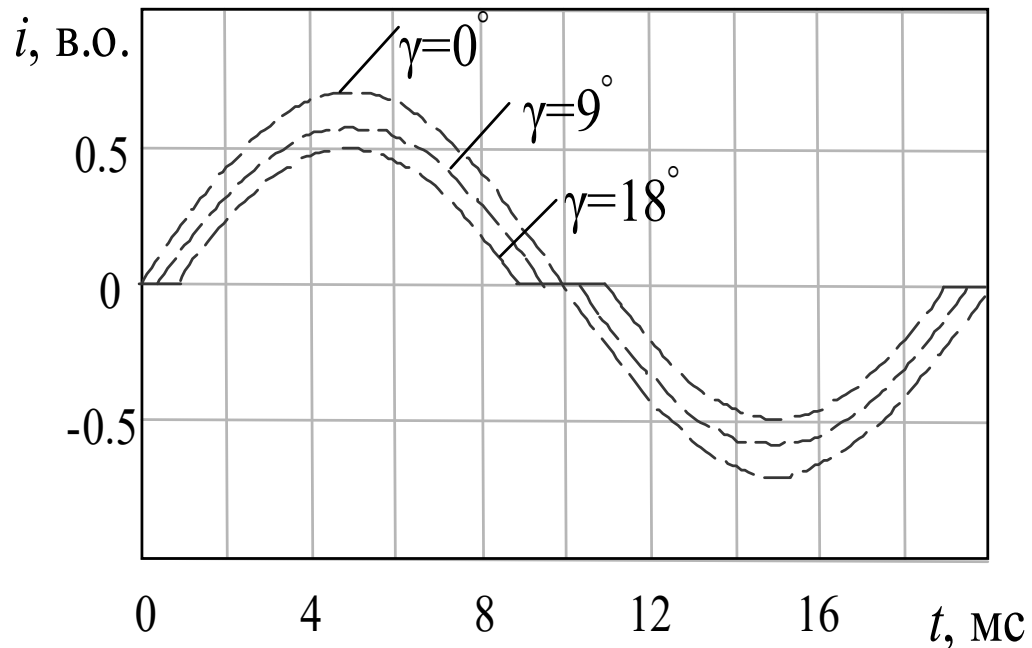


Рисунок 2.3 – Графік зміни струму через ТРР

Враховуючи те, що тиристорно-регульований реактор приєднаний до синусоїдної напруги, через нього тече несинусоїдний струм.

Розклавши у ряд Фур'є співвідношення (2.1), отримаємо активну та реактивну складові гармонік

$$i_{va} = \left[ \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\gamma}^{\gamma\theta} i(\omega t) \cos v\omega t d\omega t \right];$$

$$i_{vp} = \left[ \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\gamma}^{\gamma\theta} i(\omega t) \sin v\omega t d\omega t \right].$$

За допомогою програми MathCad виконано розрахунок гармонічних складових струму. Періодично повторювана часова функція  $i(t) = i(t \pm nT)$  подана у вигляді збіжних тригонометричних рядів:

$$i(t) = c_0 + \sum_{v=1}^{v=\infty} c_v \cos(v\omega t + \varphi_v) = c_0 + \sum_{v=1}^{v=\infty} a_v \cos v\omega t + \sum_{v=1}^{v=\infty} b_v \sin v\omega t,$$

де

$$a_v = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \cos v\omega t \cdot dt;$$

$$b_v = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \sin v\omega t \cdot dt;$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i(t) \cdot dt;$$

$$c_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}; \quad \varphi_v = \operatorname{arctg} \frac{b_v}{a_v},$$

$T$  – період функції  $i(t)$ .

Результати розрахунків подано в табл. 2.1.

Аналіз отриманих даних вказує на те, що зі збільшенням кута  $\gamma$  реактивний струм основної гармоніки зменшується. Одночасно при збільшенні кута  $\gamma$  з'являються реактивні складові вищих гармонік струму. На рис. 2.4 подано залежності спектра струму ТРР від кута  $\gamma$ . Найбільшим є амплітудне значення 3-ї гармоніки струму, яке досягає свого максимуму при  $\gamma \approx 30^\circ$ .

Таблиця 2.1 – Гармонічний спектр струму через ТРР

$\gamma$	$\nu$	1	3	5	7	9	11	13
$0^\circ$	$a_\nu$	0,004	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,986	0	0	0	0	0	0
$9^\circ$	$a_\nu$	0,003	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,790	-0,065	-0,036	-0,024	-0,016	-0,011	-0,001
$18^\circ$	$a_\nu$	0,002	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,604	-0,113	-0,051	-0,021	-0,005	0,003	0,006
$27^\circ$	$a_\nu$	0,001	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,436	-0,136	-0,037	0,002	0,013	0,009	0,001
$36^\circ$	$a_\nu$	0,001	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,293	-0,131	-0,006	0,020	0,008	-0,005	-0,006
$45^\circ$	$a_\nu$	0	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,179	-0,105	0,021	0,015	-0,007	-0,006	0,004
$54^\circ$	$a_\nu$	0	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,096	-0,069	0,031	-0,002	-0,009	0,005	0,002
$63^\circ$	$a_\nu$	0	0	0	0	0	0	0
	$b_\nu$	0,042	-0,035	0,024	-0,012	0,002	0,003	-0,004

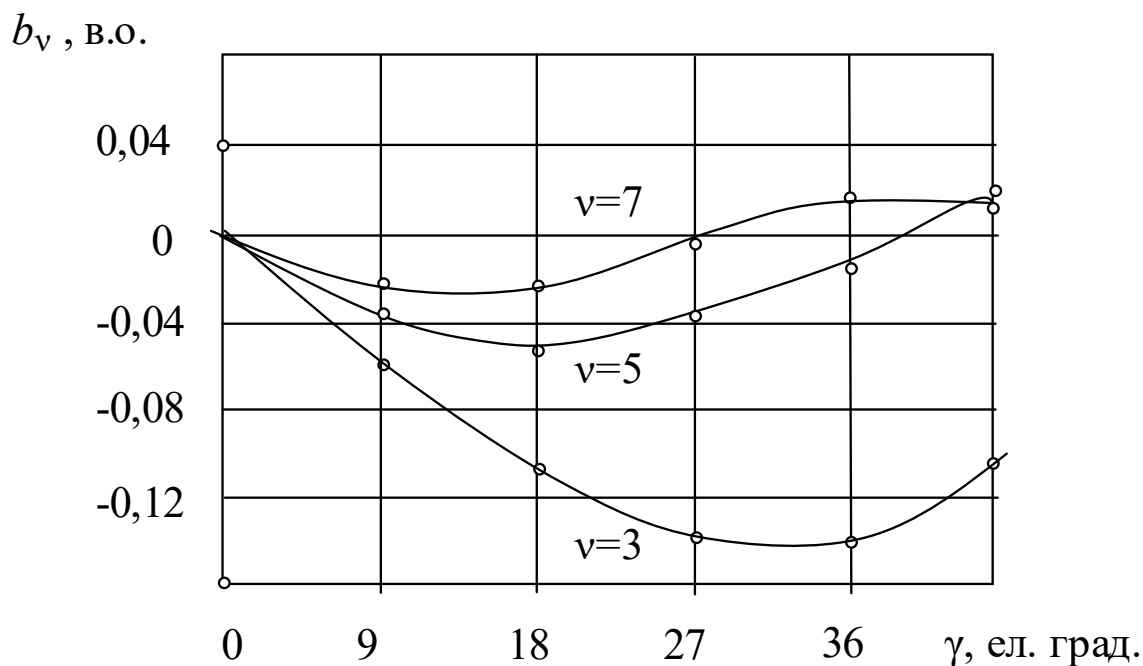


Рисунок 2.4 – Залежності спектра струму ТРР від кута  $\gamma$

Розглянемо два варіанти реалізації систем динамічної компенсації реактивної потужності електроприводів за допомогою СТК для мереж з ізольованою нейтраллю зі схемою з'єднання „трикутник” (рис. 2.5). Система, зображена на рис. 2.5 а, забезпечує керування за збуренням, а система на рис. 2.5, б – за відхиленням. Перша зі систем характеризується більш високою швидкодією, однак для її побудови необхідно отримати регулювальні характеристики СТК.

Для випадків, коли вищі гармоніки напруги живлення дорівнюють нулю, активна та реактивна потужності будуть визначатись як

$$P = U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = U \cdot I_{1a},$$

$$Q = U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = U \cdot I_{1p}.$$



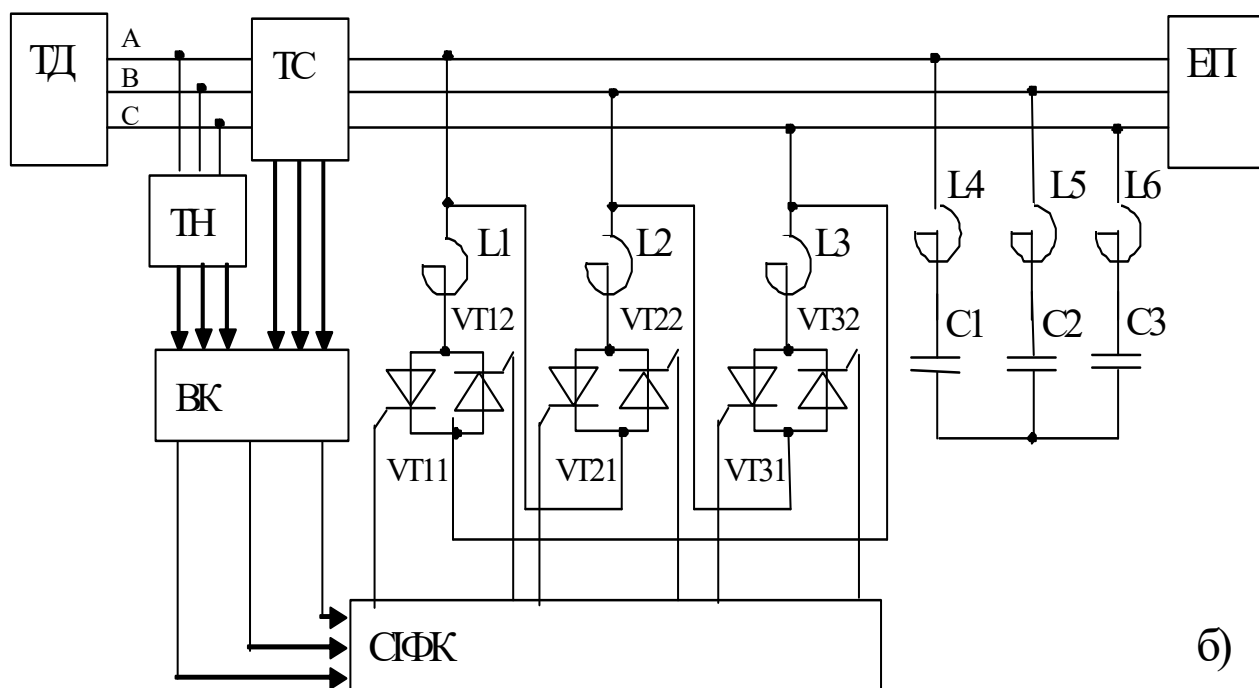
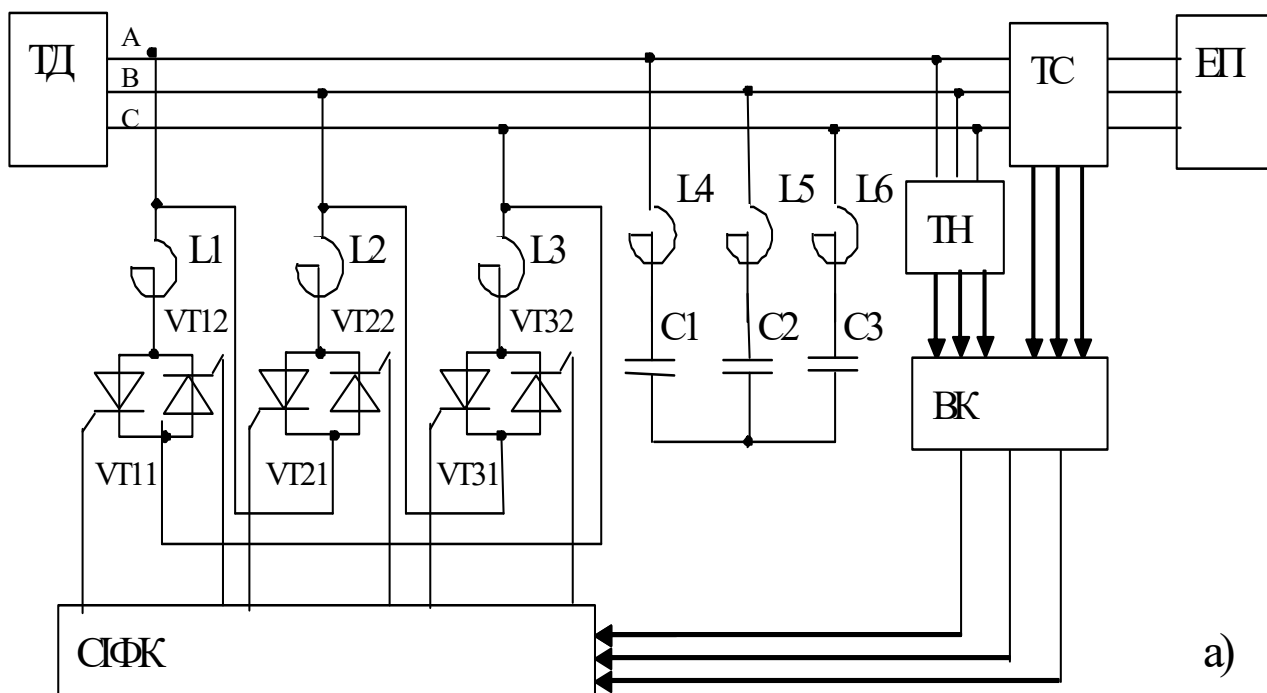


Рисунок 2.5 – Схеми динамічної компенсації реактивної потужності

ТД – трифазне джерело; СІФК – система імпульсно-фазового керування; ЕП – електроприймач; ВК – вимірювальний канал; ТС – трансформатор струму; ТН – трансформатор напруги;  $L_1, L_2, L_3$  – реактори;  $L_4, L_5, L_6$  – фільтрові реактори;  $C_1, C_2, C_3$  – конденсатори блоку фільтрів;  $VS_{11}, VS_{12}, VS_{21}, VS_{22}, VS_{31}, VS_{32}$  – зустрічно-паралельні тиристри

На рис. 2.6 подано залежність реактивної потужності  $Q(\gamma)$ , що дозволяє отримати регулювальну характеристику СТК за реактивною потужністю

$$Q_{СТК}(\gamma) \approx Q_{КУ} - Q(\gamma), \quad (2.2)$$

де  $Q_{КУ}$  – потужність конденсаторної установки.

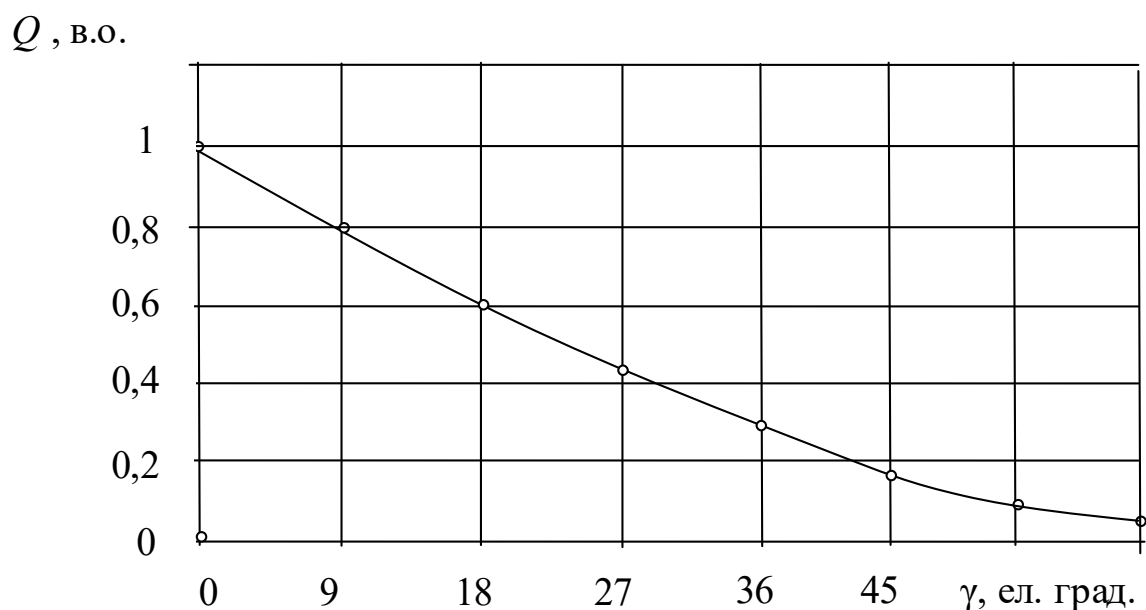


Рисунок 2.6 – Зміна реактивної потужності  $Q(\gamma)$

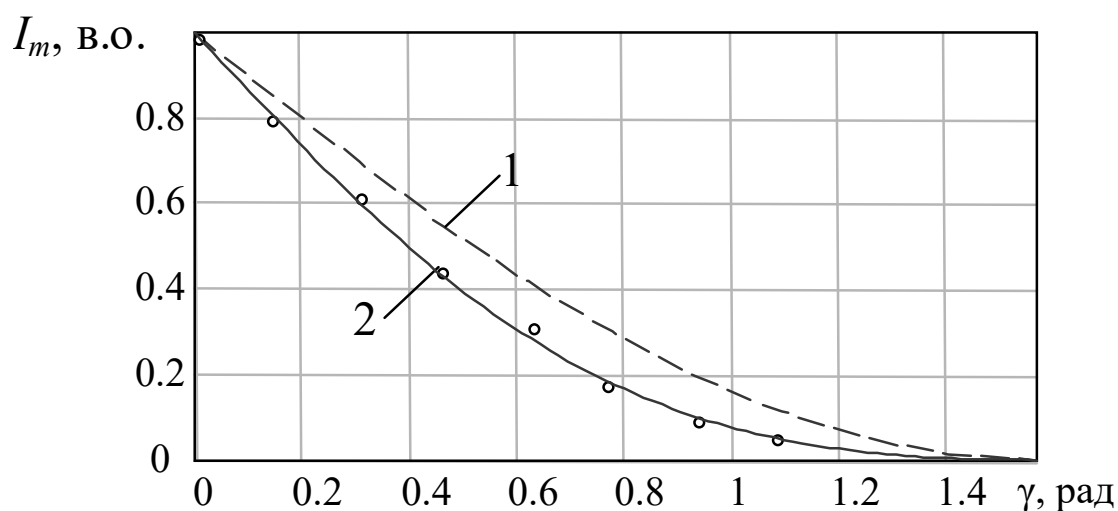


Рисунок 2.7 – Графіки амплітуд струмів

1 – несинусоїдальний струм; 2 – струм 1-ї гармоніки

В табл. 2.2 наведено значення струму  $\tilde{I}_m(\gamma)$ , що були отримані з використанням аналізатора мережі. Тут також подано значення струму 1-ї гармоніки.

Таблиця 2.2 – Амплітудні значення величини струму через ТРР

$\gamma$	$0^\circ$	$9^\circ$	$18^\circ$	$27^\circ$	$36^\circ$	$45^\circ$	$54^\circ$	$63^\circ$
$I_m(\gamma)$	1	0,844	0,692	0,548	0,414	0,295	0,193	0,110
$\tilde{I}_m(\gamma)$	1	0,839	0,693	0,538	0,405	0,293	0,186	0,107
$\tilde{I}_{1m}(\gamma)$	0,986	0,790	0,604	0,436	0,293	0,179	0,096	0,042

## 2.2 Проектування вимірювальних каналів

Структурна схема вимірювального каналу для систем динамічної компенсації зображена на рис. 2.8.

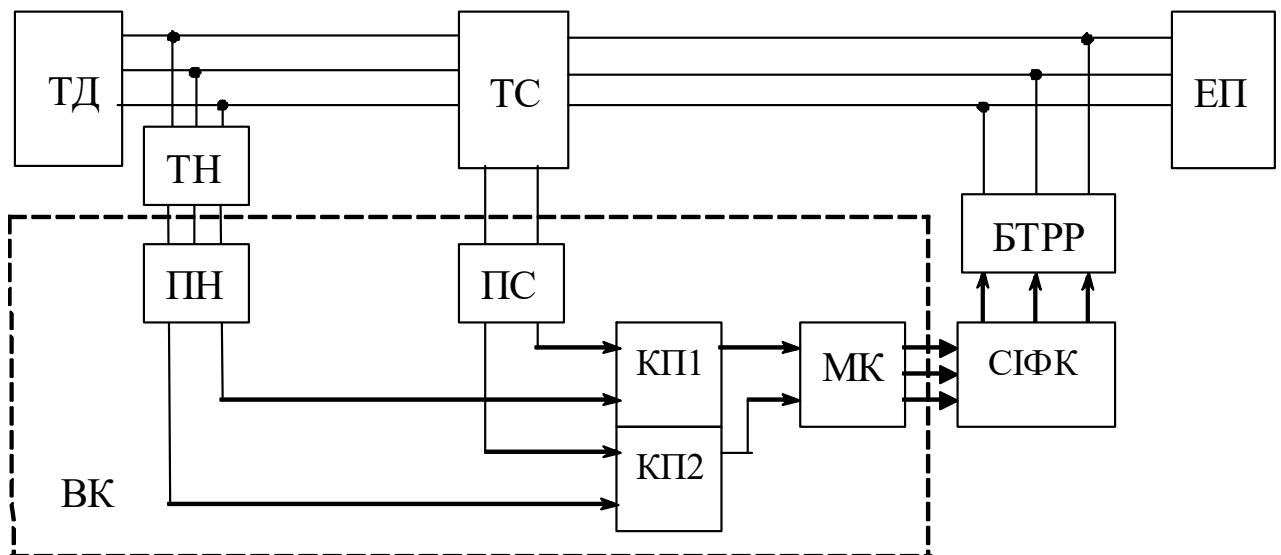


Рисунок 2.8 – Структурна схема вимірювального каналу

ПС – перетворювач струмів; ПН – перетворювач напруг; МК – мікроконтролер; БТРР – блок тиристорно-регульованих реакторів; СИФК – система імпульсно-фазового керування; КП1 та КП2 – квазоврівноважені перетворювачі

Для підвищення швидкодії пропонується замість двох вимірювальних перетворювачів використати 4 фазочутливих інтегровальних перетворювачі (ФП1–ФП4) прямого перетворення (рис. 2.9), а для реалізації критерію  $b_K(t) = 0$  – 6 перетворювачів (ФП1–ФП6) (рис. 2.10).

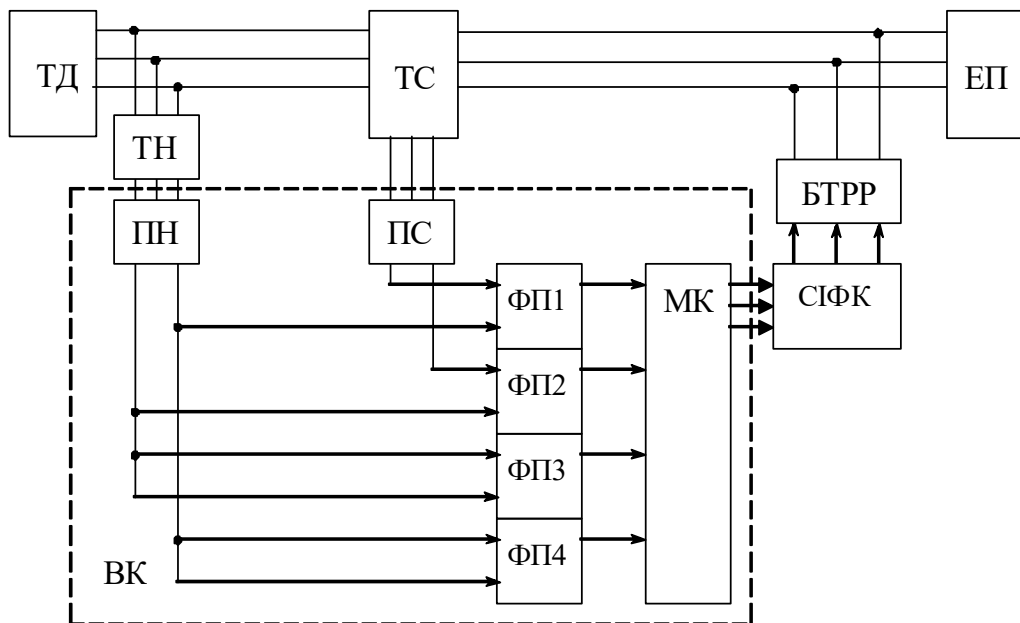


Рисунок 2.9 – Структурні схеми швидкодіючих вимірювальних каналів для отримання інформації про спектральні провідності  $b_C(t)$

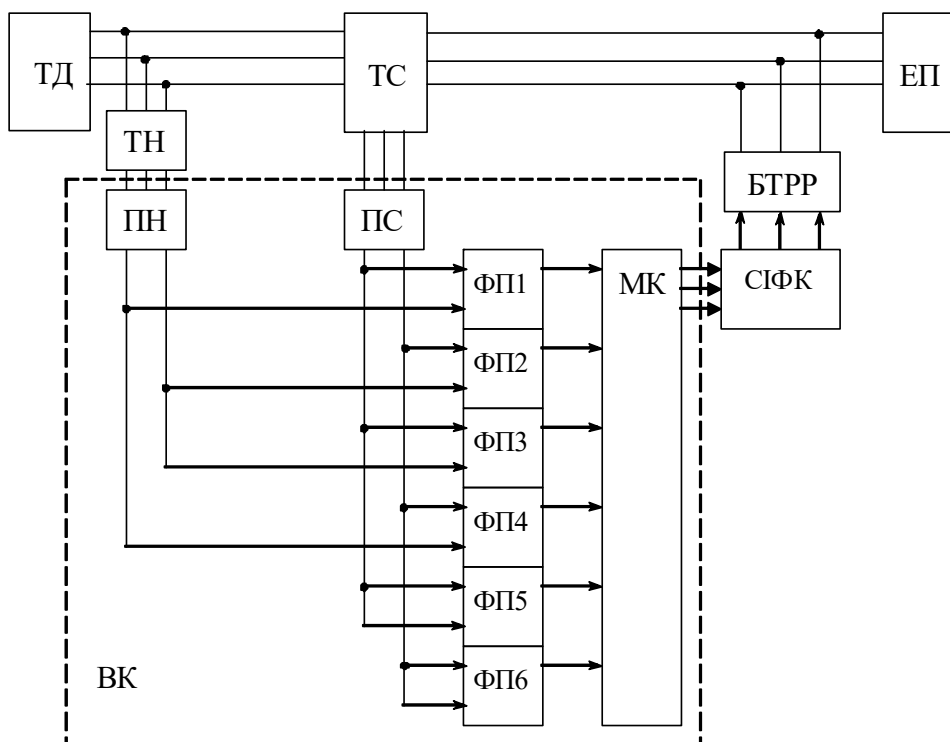


Рисунок 2.10 – Структурні схеми швидкодіючих вимірювальних каналів для отримання інформації про спектральні провідності  $b_K(t)$

При розробці вимірювальних каналів використано підхід, який побудований на використанні миттєвих потужностей. Визначення поточних значень активної, реактивної потужності та квадрату струму й напруги проводиться за формулами, які не дають значної похибки:

$$P(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt;$$

$$Q(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta}) dt;$$

$$I^2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (i_{\alpha}^2 + i_{\beta}^2) dt;$$

$$U^2(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2) dt.$$

Мікроконтролер в першому випадку (рис. 2.9) обчислює поточні значення спектральної реактивної провідності

$$b_C(t) = \frac{Q(t)}{U^2(t)},$$

або в другому випадку (рис. 2.10) – поточні значення спектральних опорів та провідностей

$$R_C(t) = \frac{P(t)}{I^2(t)},$$

$$X_C(t) = \frac{Q(t)}{I^2(t)},$$

$$b_K(t) = \frac{X_C(t)}{R_C^2(t) + X_C^2(t)}.$$

В основі вимірювання реактивної потужності лежить формула

$$UI \sin \varphi = U \sin(\omega t) I \sin\left[\frac{\pi}{2} - (\omega t - \varphi)\right] - U \sin\left[\frac{\pi}{2} - \omega t\right] I \sin(\omega t - \varphi),$$

де  $U, I$  – діючі значення відповідно напруги та струму;

$\varphi$  – кут зсуву фаз між  $U$  та  $I$ ;

$\omega$  – колова частота напруги живлення.

Даний спосіб вимірювання забезпечує безперервний відлік реактивної потужності без інтегрування протягом всього періоду. Аналогічний вираз можна отримати і для активної потужності.

У 3-фазній електричній мережі вирази для отримання поточних значень активної та реактивної потужності мають вигляд

$$P(t) = 1,5 \cdot (u_{\alpha}(t)i_{\alpha}(t) + u_{\beta}(t)i_{\beta}(t)),$$

$$Q(t) = 1,5 \cdot (u_{\beta}(t)i_{\alpha}(t) - u_{\alpha}(t)i_{\beta}(t)),$$

де  $u_{\alpha}, u_{\beta}$ , – ортогональні складові напруг 3-фазної мережі;

$i_{\alpha}, i_{\beta}$  – ортогональні складові струмів 3-фазної мережі.

На рис. 2.11 подано залежності активної та реактивної потужності при несиметричності струму навантаження, на рис. 2.12 – результати моделювання цього алгоритму у вигляді залежностей активної та реактивної потужностей за несинусоїдальності струму із вмістом 5-ї гармоніки, на рис. 2.13 – залежності активної та реактивної потужностей за несиметричності та несинусоїдальності струму. В результаті вимірювального перетворення за описаними формулами активна та реактивна потужності містять постійні складові частотою 100 і 200 Гц.

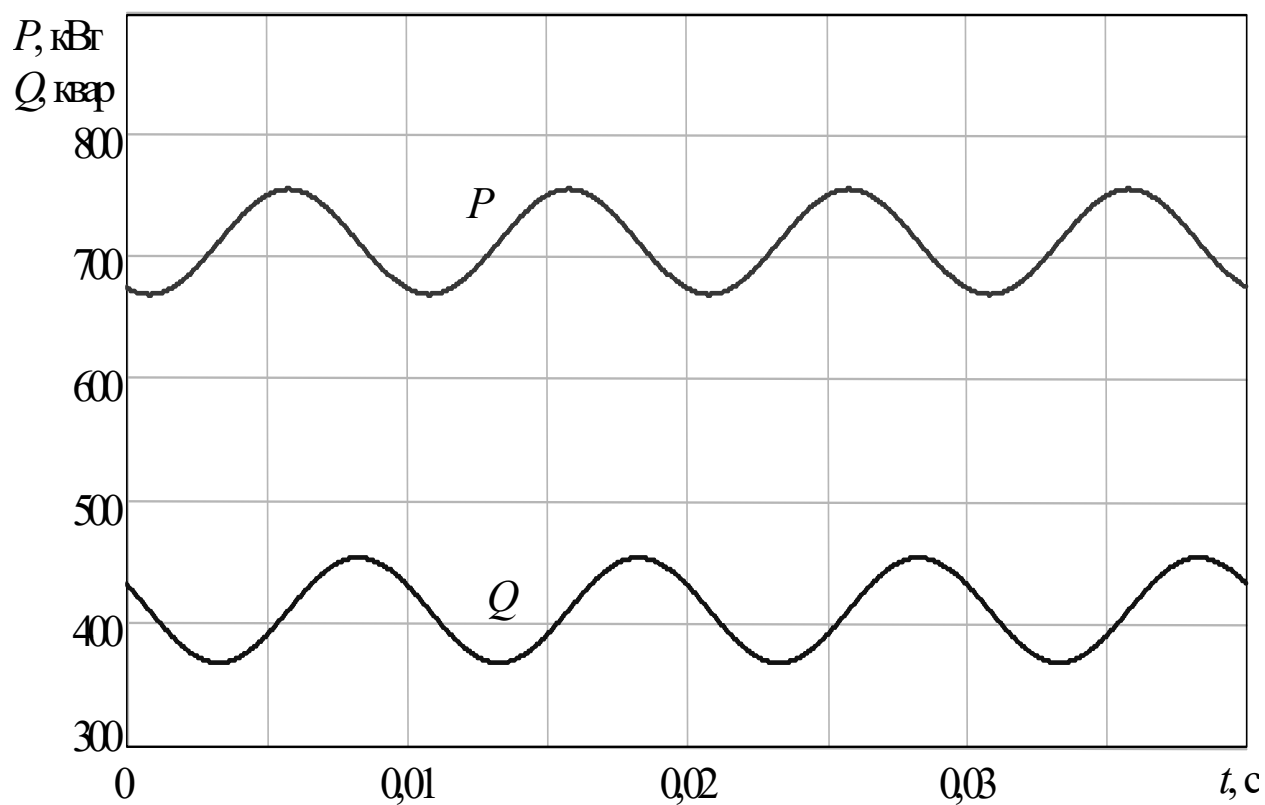


Рисунок 2.11 – Залежності  $P$  та  $Q$  за умови несиметричності струмів навантаження

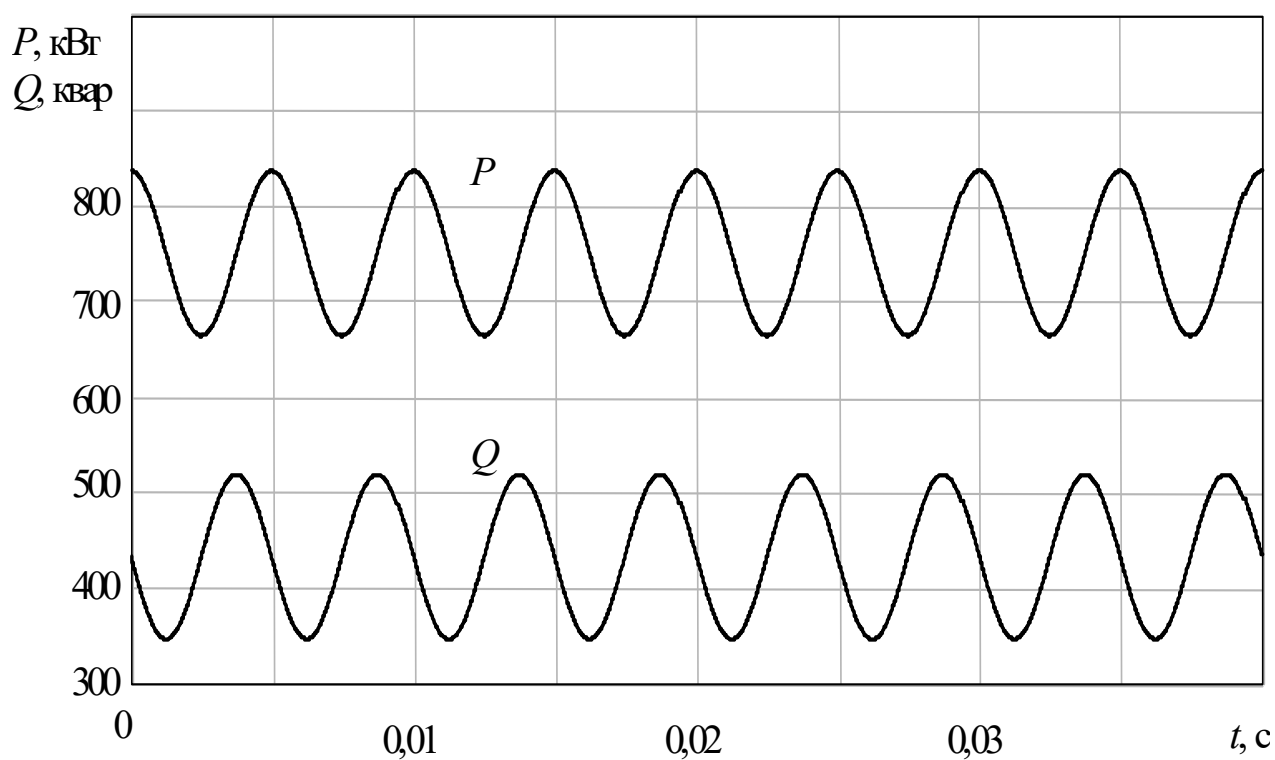


Рисунок 2.12 – Залежності  $P$  та  $Q$  за умови несинусоїдальності кривої струмів

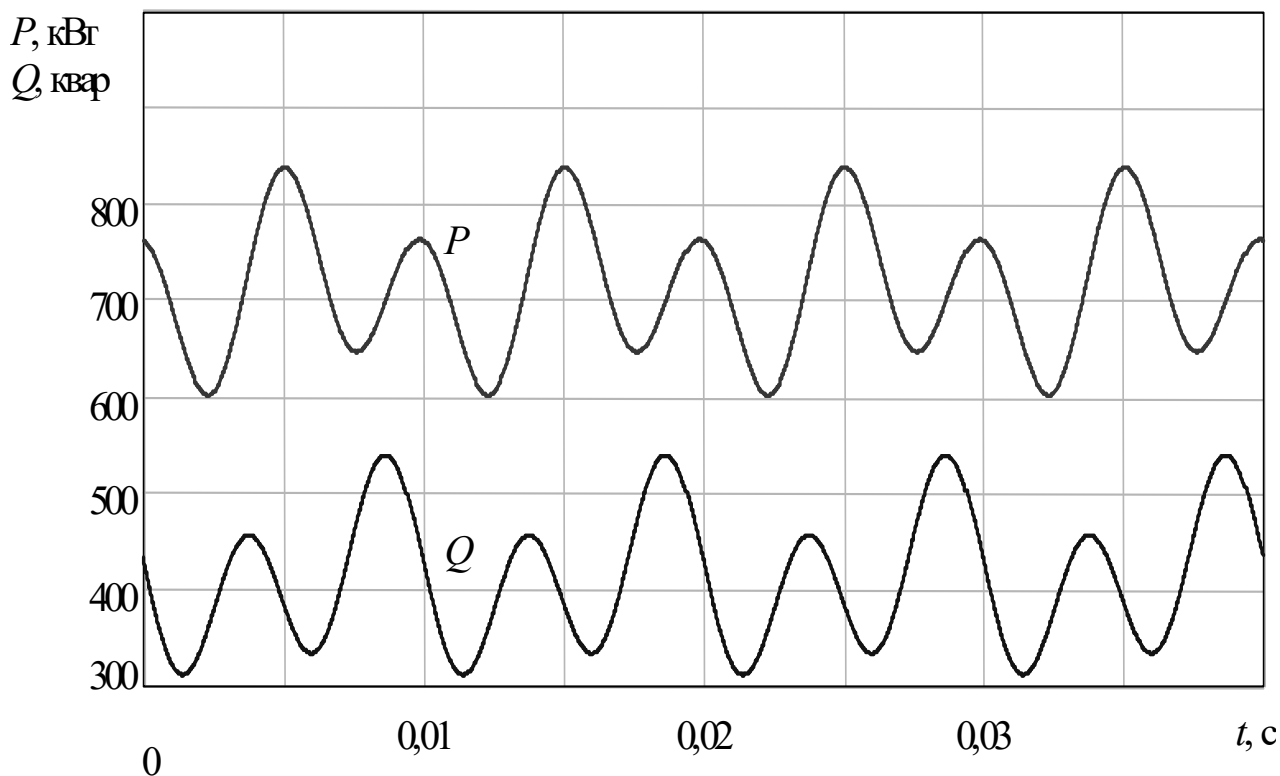


Рисунок 2.13 – Залежності  $P$  та  $Q$  за умови несиметричності та несинусоїдальності струмів навантаження

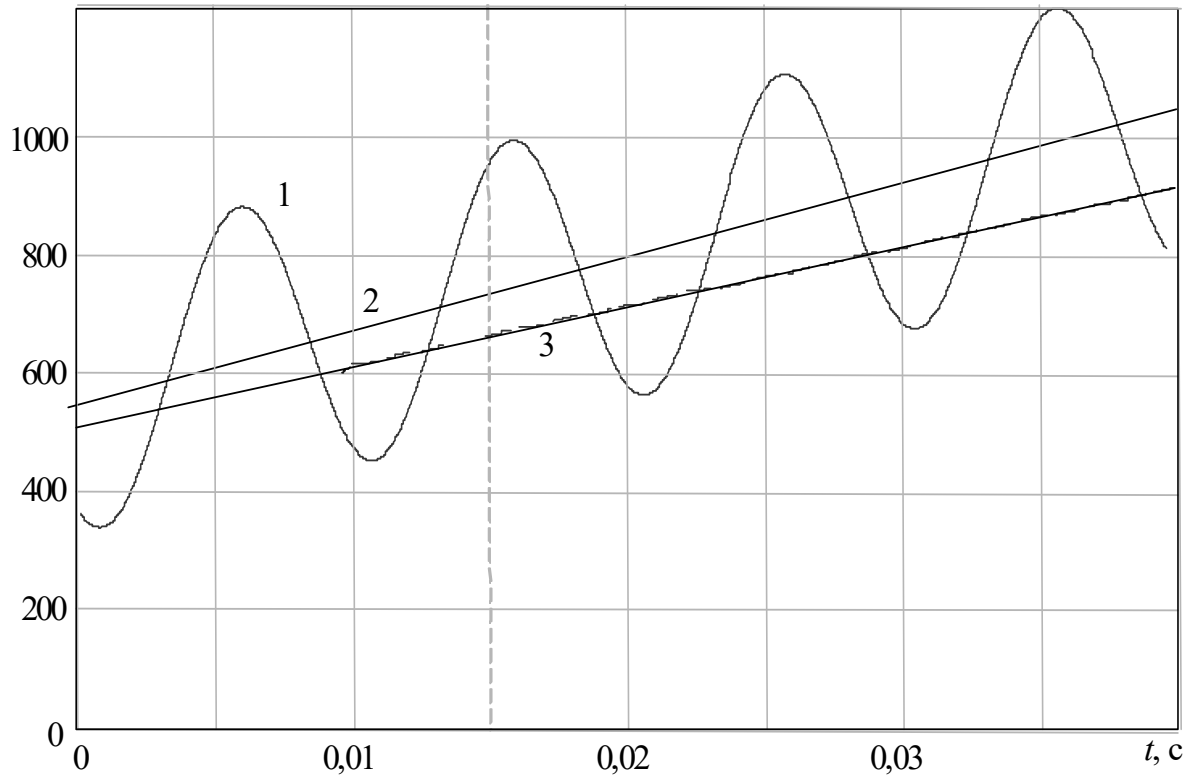
Точність можна підвищити, якщо для вимірювання  $P$  та  $Q$  використати поточне інтегрування миттєвих значень

$$P(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}) dt; \quad Q(t) = \frac{1,5}{T/2} \int_{t-T/2}^t (u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta}) dt.$$

Запропонований спосіб визначення  $P$  та  $Q$  характеризується практичною незалежністю результатів від несиметричності напруг і струмів, що є його перевагою. При збільшенні навантаження (рис. 2.14, кр. 1) на вхід пристрою поступає величина, середнє значення якої підвищується зі збереженням коливань відносно цього значення (кр. 2). На виході з'являється похибка, яка дорівнює майже половині амплітуди вхідної величини (кр. 3).

Перехідні характеристики неінерційного ВК для величин  $P$  та  $Q$  зображено на рис. 2.15, залежності спектральних провідностей та потужностей асинхронних двигунів – на рис. 2.16.



$Q$ , кварРисунок 2.14 – Поточні, виміряні та середні значення  $Q$ 

при пропорційному збільшенні навантаження

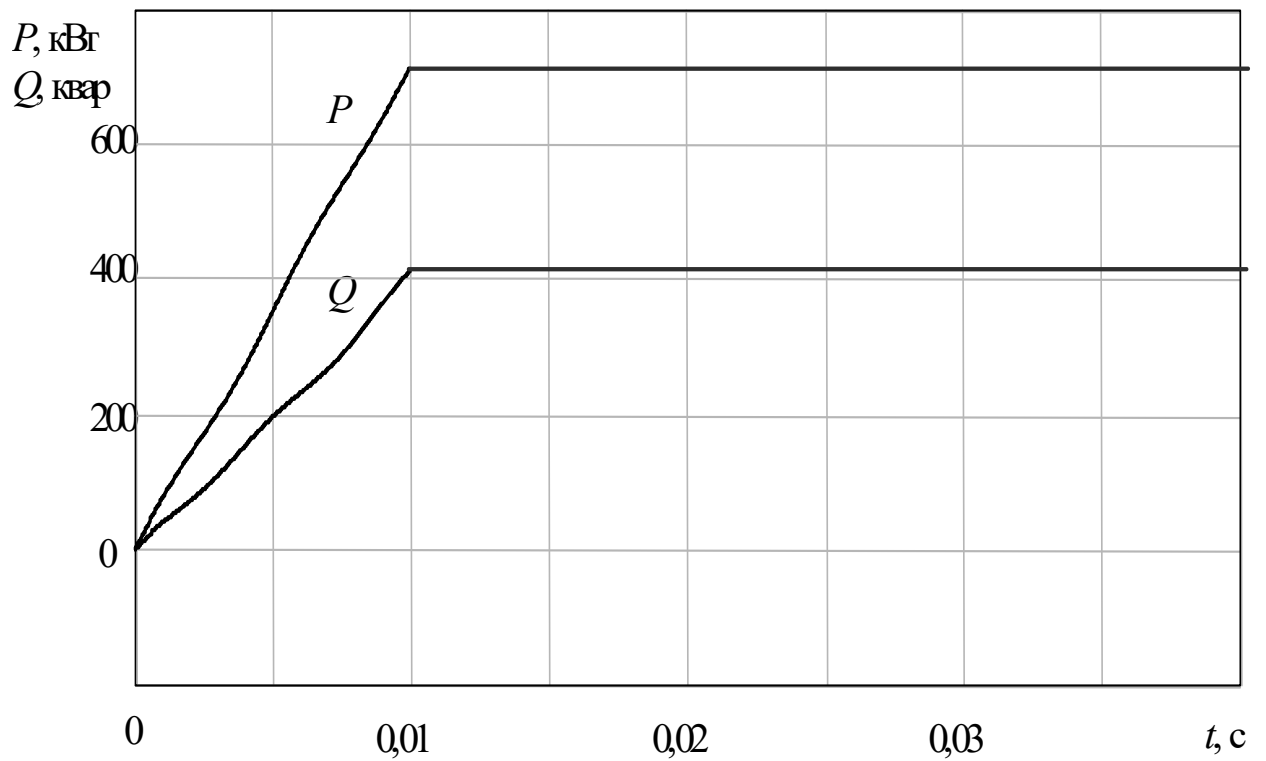
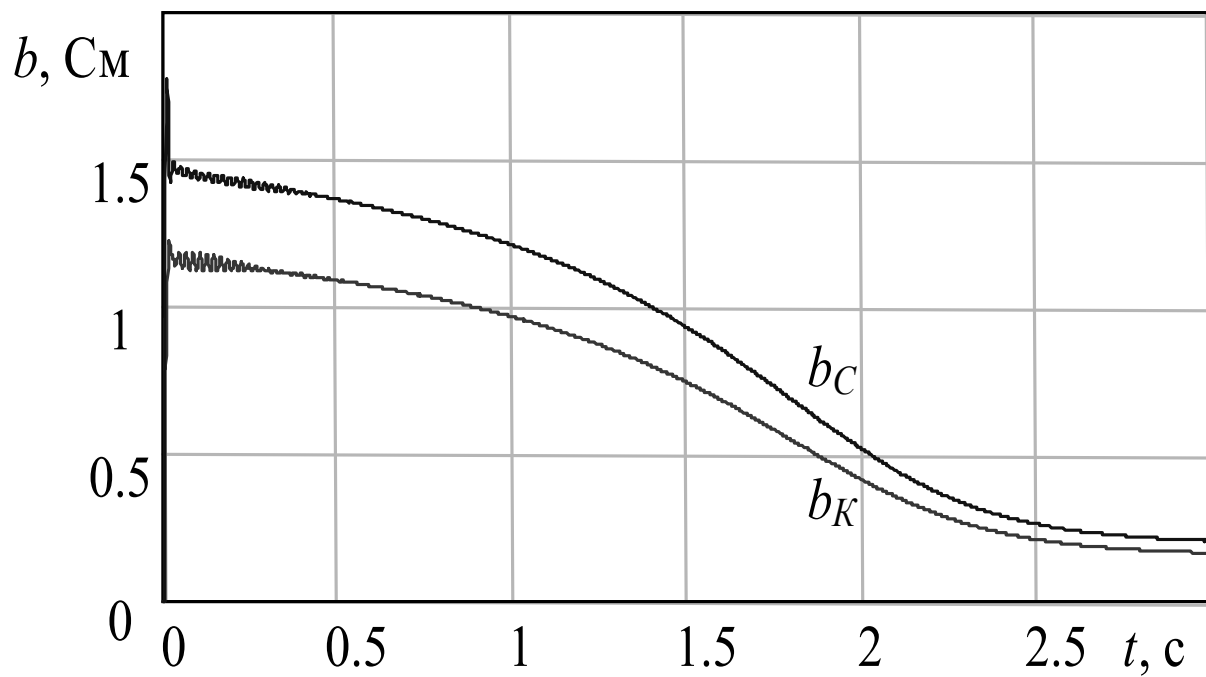
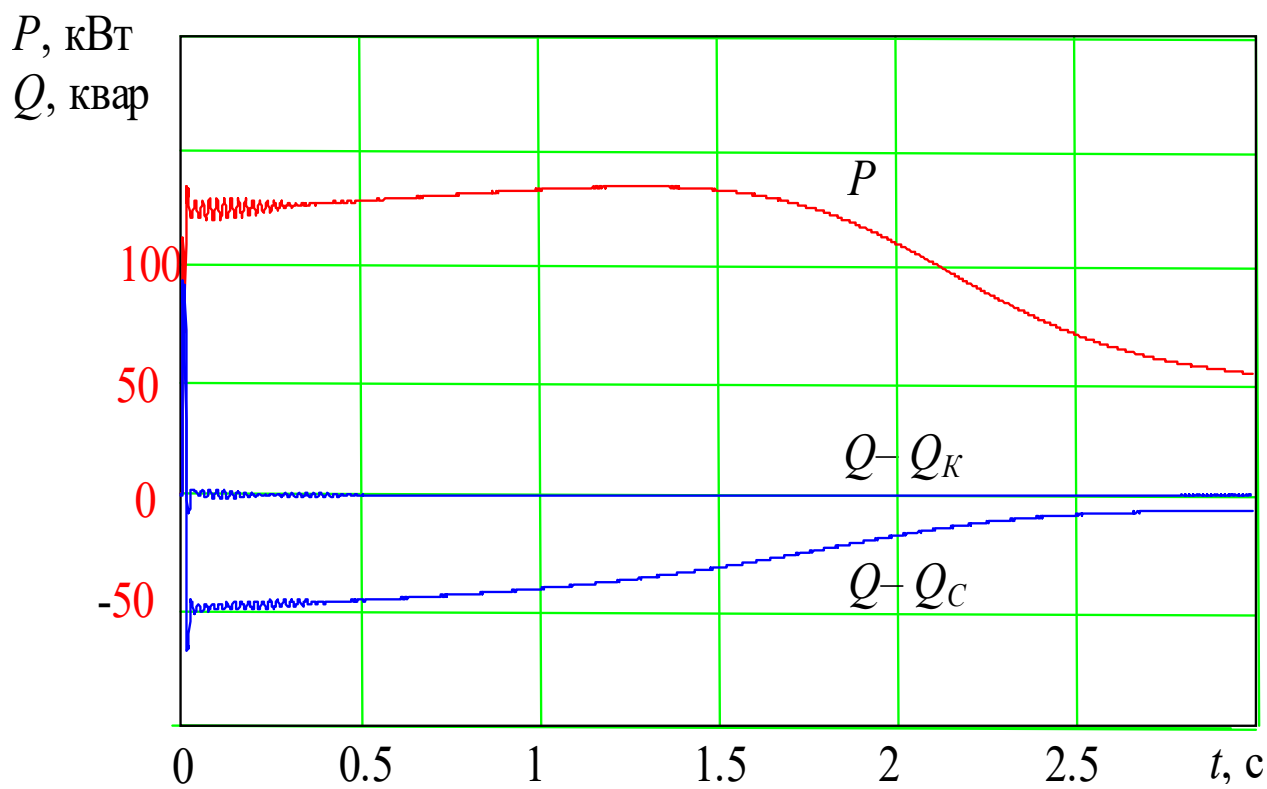


Рисунок 2.15 – Характеристики ВК активної та реактивної потужностей



a)



б)

Рисунок 2.16 – Залежності спектральних провідностей (а) та потужностей АД (б)

### 2.3 Вплив напруги живлення на пускові та усталені струми асинхронних двигунів

Експлуатація асинхронних електродвигунів на промислових підприємствах ускладнюється завищеним рівнем напруги в періоди зменшення навантажень, що приводить до частого пошкодження їх обмоток статора та ротора і вимагає встановлення причин та їх усунення.

Експериментальні дослідження напруги, виконані на ПС промислового підприємства, показали, що крім завищеного рівня напруги спостерігається також зниження (посадки) напруги і різке її збільшення (викиди) (рис. 2.17).

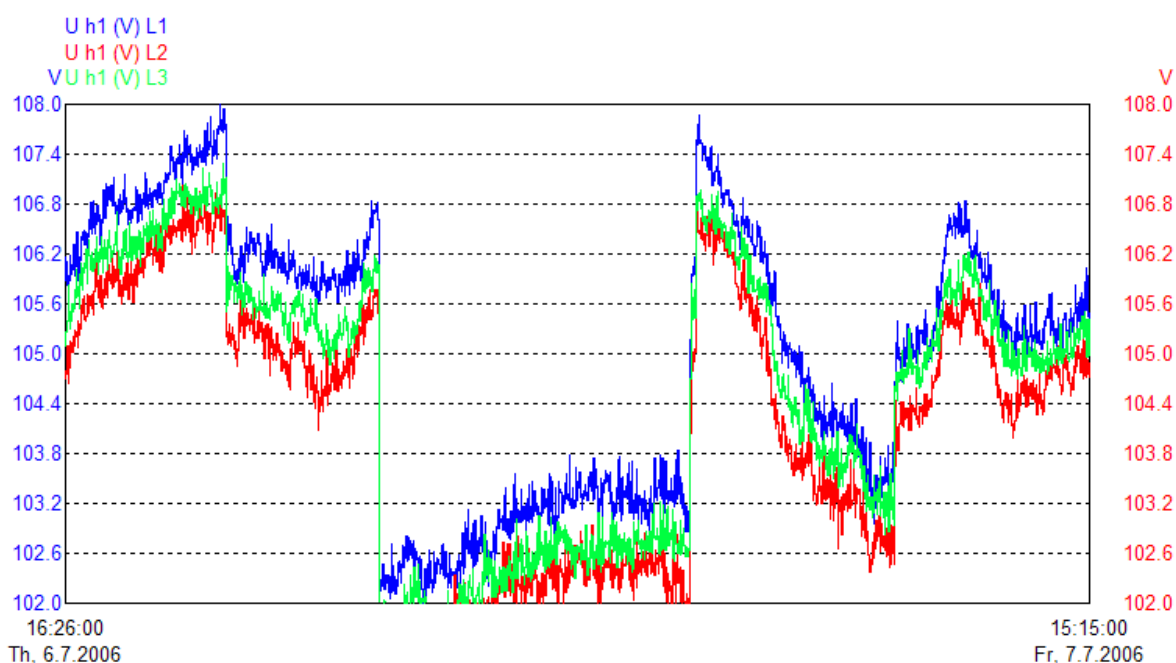


Рисунок 2.17 – Залежності напруги на ПС промислового підприємства

Проаналізуємо можливі причини руйнування двигунів. На рис. 2.18 наведені залежності струму ротора під час пуску АД при нормальній температурі у разі номінальної (крива 1) і завищеної (крива 2) напруги живлення.

Таким чином, причиною руйнування ротора може бути збільшення та коливання струму в початковий момент пуску АД, що викликає різке збільшення динамічних навантажень на клітку ротора.

Збільшення температури АД практично не впливає на режим споживання (рис. 2.19).

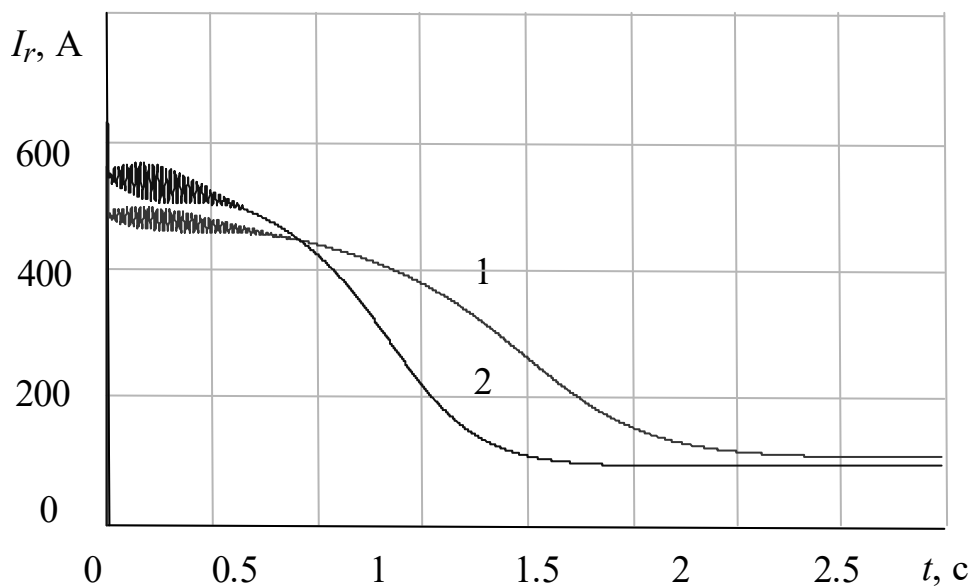


Рисунок 2.18 – Залежності струму ротора під час пуску АД при нормальній температурі у разі номінальної (крива 1) і завищеної (крива 2) напруги

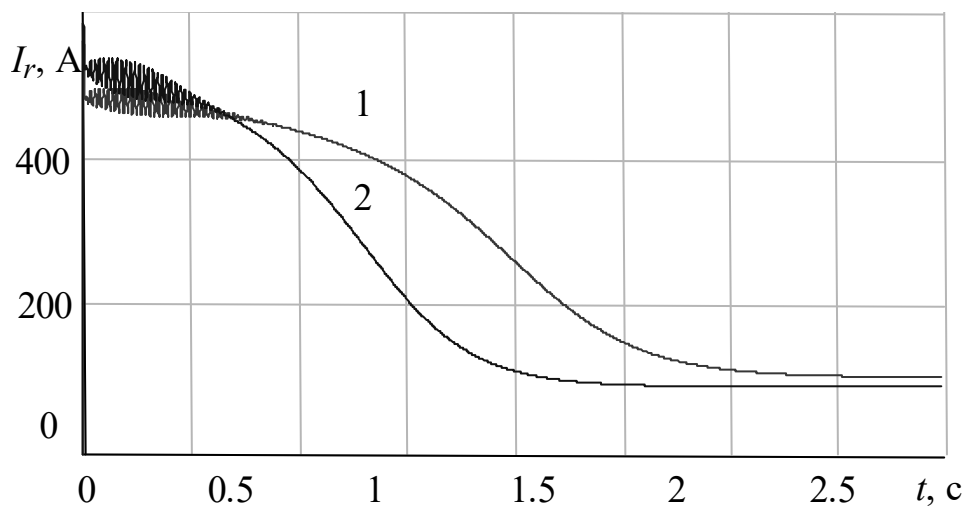


Рисунок 2.19 – Залежності струму ротора під час пуску АД при завищеній температурі у разі номінальної (крива 1) і завищеної (крива 2) напруги

Заміна двигунів на більш потужні забезпечить відносне зменшення струму в усталеному режимі (рис. 2.20). Збільшення напруги приводить до зменшення струму в усталеному режимі і до його збільшення в пусковому (рис. 2.21).

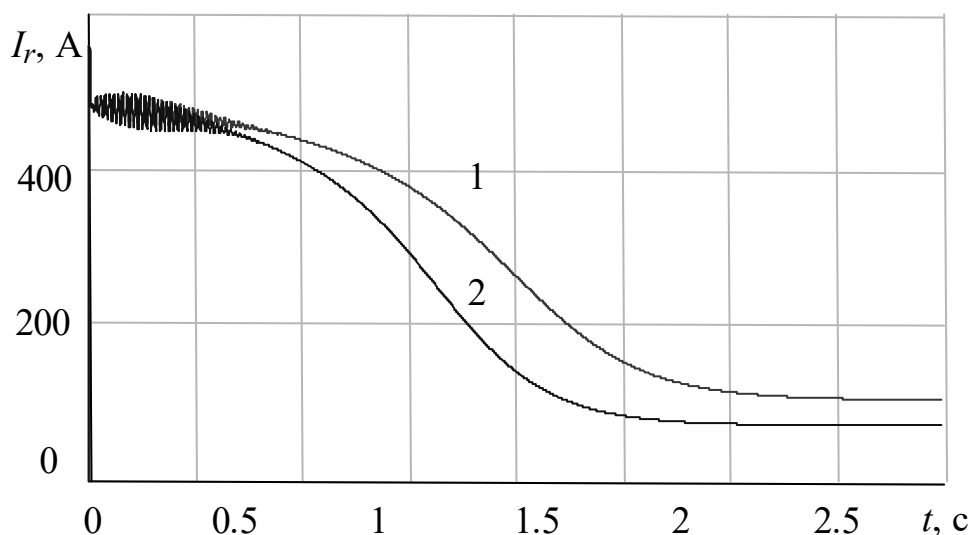


Рисунок 2.20 – Залежності струму ротора під час пуску АД при номінальному (крива 1) і зменшеному (крива 2) навантаженні у разі номінальної напруги

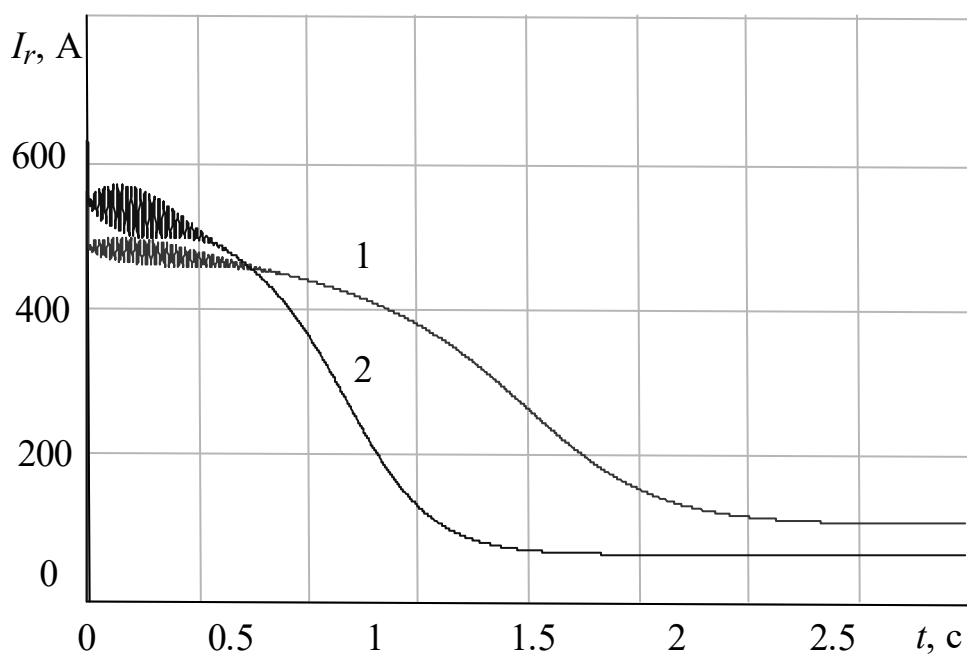


Рисунок 2.21 – Залежності струму ротора під час пуску АД при номінальному навантаженні і номінальній напрузі (крива 1) та зменшеному навантаженні і підвищеній напрузі (крива 2)

Розглянемо, яким чином впливають конденсаторні установки на величину напруги. На рис. 2.22 подано схему живлення вузла навантаження з вмиканням до виводів асинхронних двигунів КУ. При пуску двигуна у мережі протікає

струм  $I$ , утворений різницею пускового струму  $I_{\text{пуск}}$  та струму конденсаторної установки  $I_{\text{КУ}}$ .

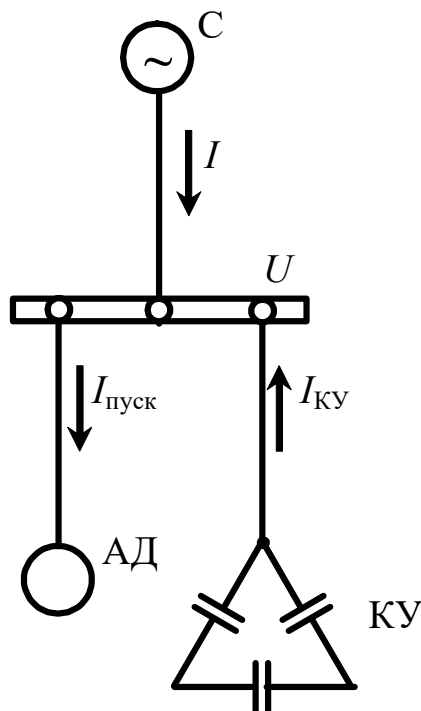


Рисунок 2.22 – Схема живлення вузла навантаження

На рис. 2.23 наведені залежності струму живлення під час пуску АД без КУ і з КУ у разі номінальної напруги живлення. В усталеному режимі компенсація реактивної потужності призводить до збільшення струму особливо в режимі завищеної напруги, внаслідок впливу статичних характеристик батарей конденсаторів (рис. 2.24).

Вплив статичних характеристик конденсаторних батарей описується квадратичною залежністю

$$Q = Q_{\text{КУ}} \left( \frac{U}{U_{\text{н}}} \right)^2,$$

де  $Q_{\text{КУ}}$  – потужність конденсаторної установки;

$U_{\text{н}}$  – номінальна напруга.

Внаслідок цього може спостерігатися збільшення струму.

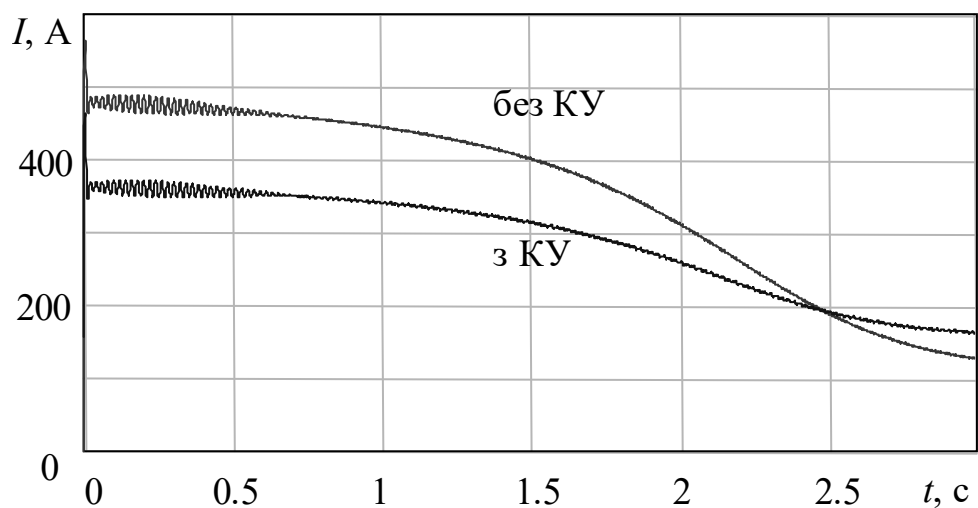


Рисунок 2.23 – Залежності струму живлення під час пуску АД без КУ і з КУ у разі номінальної напруги

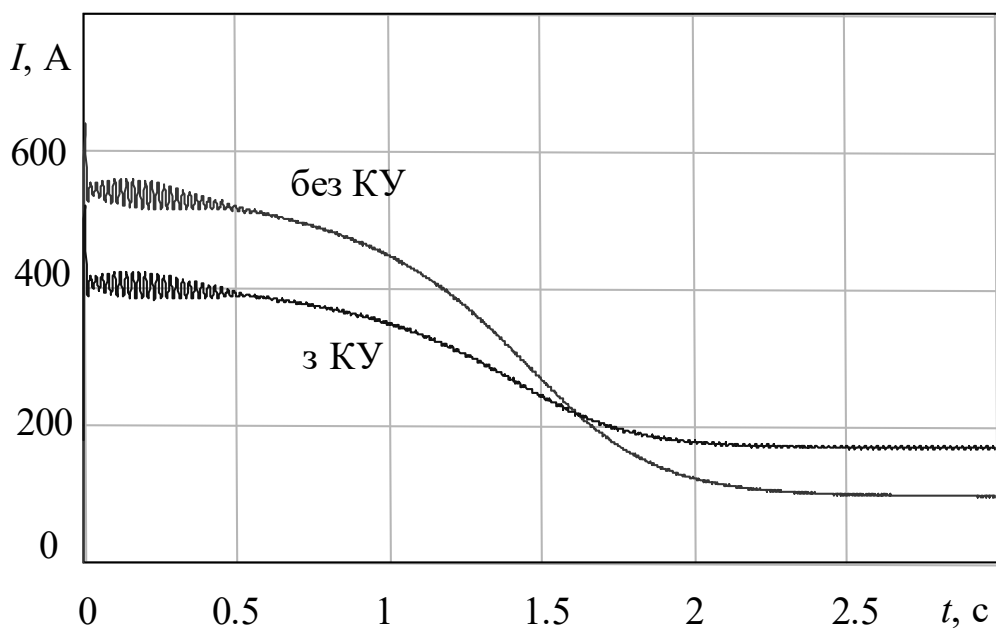


Рисунок 2.24 – Залежності струму живлення під час пуску АД без КУ та з КУ у разі завищеної напруги

## Висновки до розділу 2

1. Отримано аналітичні вирази для регулювальних характеристик СТК. Для практичного застосування проведено апроксимацію регулювальних характеристик більш простою аналітичною залежністю. Досліджено гармонічний спектр струму через СТК.

2. Запропоновано швидкодіючі ВК для системи динамічної компенсації за збуренням. Застосування способу дає можливість зменшити час вимірювання параметрів навантаження до півперіоду напруги живлення.

3. Шляхом аналізу пускових характеристик асинхронних двигунів встановлено, що причиною пошкодження обмоток АД є пускові струми за завищеної напруги на їх затискачах. Рекомендовано знизити рівень напруги з одночасним використанням динамічної компенсації реактивної потужності.



## 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Особливості вибору критерію оптимальності та моделювання пускових процесів СД

Вибір критерію оптимальності є важливою і складною задачею, а використання необґрунтованих критеріїв часто призводить до прийняття рішень, які не забезпечують бажаних техніко-економічних показників роботи електроприводів, включаючи і надійність. В роботах [11, 13] стверджується, що оптимальними критеріями регулювання струму збудження СД є економічність роботи самої машини і найкраще співвідношення її електромеханічних показників. Синхронний двигун повинен в першу чергу забезпечити ефективну роботу технологічної установки в умовах конкретної ЕПС, що можливо при відповідному автоматичному регулюванні струму збудження СД. АРЗ повинен забезпечувати високу стійкість роботи СД, нормальний його тепловий режим.

Однак такий підхід є неповним. Система АРЗ СД повинна враховувати технологічні особливості режимів роботи СД і найповніше використання їх компенсувальної здатності, яка дозволяє суттєво поліпшити якість напруги живлення у вузлі електричної мережі. АРЗ СД повинен забезпечувати мінімум втрат електроенергії в електричній мережі. Вибір пристрою АРЗ СД пов'язаний з вибором критерію оптимізації. Основні напрямки вирішення задачі оптимізації режимів роботи електроприводів такі:

1. Якнайкраще використання СД, як електричної машини, з точки зору її робочих характеристик (перевантажувальної здатності  $\beta$ , коефіцієнта потужності  $\cos\varphi$ , коефіцієнта корисної дії  $\eta$ ) при забезпеченні високої стійкості та гасіння коливань.

2. Місцеве регулювання перетоків реактивної потужності у вузлі навантаження з метою забезпечення високих техніко-економічних показників мережі.

3. Забезпечення параметрів режиму (в першу чергу відхилення та коливання напруги) у вузлах мережі в допустимих межах.

Оптимальне використання СД, обладнаних пристроями АРЗ, розглядається при порівнянні за двома критеріями:

- 1) стійкість, швидкодія приводу;
- 2) енергетичні і економічні показники синхронного електроприводу.

В основі критеріїв регулювання, які поліпшують показники якості електроенергії і якість режимів роботи СД, лежить положення, що відхилення рівня напруги від оптимальної величини погіршує показники якості режимів роботи СД і всього електричного обладнання. При цьому припускається, що при відхиленні рівня напруги від оптимальної величини змінюються сумарні втрати, включаючи і технологічні, які визначаються “мінімумом ” або величиною збитків. При реалізації таких критеріїв в пристроях АРЗ передбачається, що протягом кожного технологічного режиму напруга на шинах трансформатора і у вузлі навантаження буде підтримуватись оптимальним, при кожній миттєвій зміні його рівня.

Пристроїв АРЗ, які точно реалізують запропоновані критерії, немає не тільки через технічні складнощі, але і їх неекономічність, особливо при експлуатації СД в розподільчих мережах обмеженої потужності. Існуючі АРЗ, побудовані за спрощеними критеріями, які ґрунтуються на зміні миттєвих коливань напруги (струму), є інваріантними.

З вказаних критеріїв жодний безпосередньо не вирішує повністю задачу поліпшення показників якості режимів роботи СД, які працюють в ЕПС, тому необхідно використовувати комбіноване, або селективне регулювання. В умовах експлуатації ЕПС пристроєм АРЗ, який реалізовує два критерії регулювання, доцільно забезпечити незалежне налагодження контурів регулювання. Для цього можна скористатись логічним перемикаючим пристроєм. Для керування системою використовуються окремі регулятори, при цьому на систему вибірково діє той регулятор, вихід якого в даний момент часу є визначним.

Особливості режимів роботи СД в ЕПС обмеженої потужності дозволяють визначити шляхи покращення їх показників якості режимів роботи, до основних задач яких відносяться:

1. Забезпечення необхідної перевантажувальної здатності СД з врахуванням параметрів ліній електропередач і можливих коливань напруги живлячої мережі.

2. Забезпечення високих показників якості електроенергії на вводі установки.

Розрахунки показують, що в електропостачальній системі при опорі лінії електропередач і зміні навантаження двигуна неможливо встановити оптимальний струм збудження. Струм збудження СД необхідно автоматично регулювати в залежності від конкретних умов. Методи дослідження режимів роботи СД базуються на використанні аналітичних залежностей і математичних моделях для ЕОМ. Системи рівнянь можуть бути подані в нерухомих або рухомих системах координат.

Диференційне рівняння статора синхронного двигуна має вигляд

$$\frac{d\Psi_s}{dt} = U_s - R_s I_s.$$

Аналогічно для ротора синхронного двигуна маємо

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = U_R - R_R I_R,$$

де  $\Psi_s$  – вектор-стовпець потокозчеплень;

$U_s$  – вектор-стовпець електричних напруг;

$I_s$  – вектор-стовпець струмів обмоток статора;

$I_R$  – вектор-стовпець струмів обмоток ротора.

У розгорнутому вигляді запропонована математична модель має вигляд

$$\frac{d\psi_{SA}}{dt} = u_{SA} - \frac{1}{3} [(4R_{SA} - R_{SC})i_{SA} + (R_{SB} - R_{SC})i_{SB}];$$

$$\frac{d\psi_{SB}}{dt} = u_{SB} - \frac{1}{3} [(R_{SA} - R_{SC})i_{SB} + (4R_{SB} - R_{SC})i_{SA}];$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \quad \frac{d\psi_D}{dt} = -R_D i_D; \quad \frac{d\psi_Q}{dt} = -R_Q i_Q;$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0^2}{J} \sqrt{3} (\psi_{SA} i_{SB} - \psi_{SB} i_{SA}) - \frac{p_0 M}{J}; \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega.$$

де

$$i_{SA} = \alpha_S (\psi_{SA} - \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma);$$

$$i_{SB} = \alpha_S (\psi_{SB} - \psi_d \cos(\gamma - 120^\circ) + \psi_q \sin(\gamma - 120^\circ));$$

$$i_f = \alpha_f (\psi_f - \psi_d); \quad i_D = \alpha_D (\psi_D - \psi_d); \quad i_Q = \alpha_Q (\psi_Q - \psi_q).$$

$$\psi_d = \frac{1}{\alpha_d + \alpha_S + \alpha_f + \alpha_D} \times \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \alpha_S (\psi_{SB} \sin \gamma - \psi_{SA} \sin(\gamma - 120^\circ)) + \alpha_f \psi_f + \alpha_D \psi_D \right];$$

$$\psi_q = \frac{1}{\alpha_q + \alpha_S + \alpha_Q} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \alpha_S (\psi_{SB} \cos \gamma - \psi_{SA} \cos(\gamma - 120^\circ)) + \alpha_Q \psi_Q \right].$$

В поданій математичній моделі параметри синхронного двигуна не залежать від частоти напруги живлення. Це значно спрощує дослідження режимів роботи СД та аналіз їх роботи.

Якщо врахувати кабельну лінію електропередач, то математична модель матиме наступний вигляд

$$\frac{di_{JA}}{dt} = \frac{u_A - u_{SA} - R_{JA}i_{JA}}{L_{JA}},$$

$$\frac{di_{JB}}{dt} = \frac{u_B - u_{SB} - R_{JB}i_{JB}}{L_{JB}},$$

де  $R_L$  – активний опір ЛЕП;

$L_L$  – індуктивність ЛЕП.

Результати комп'ютерного моделювання за наведеними вище рівнянням подано на рис. 3.1.

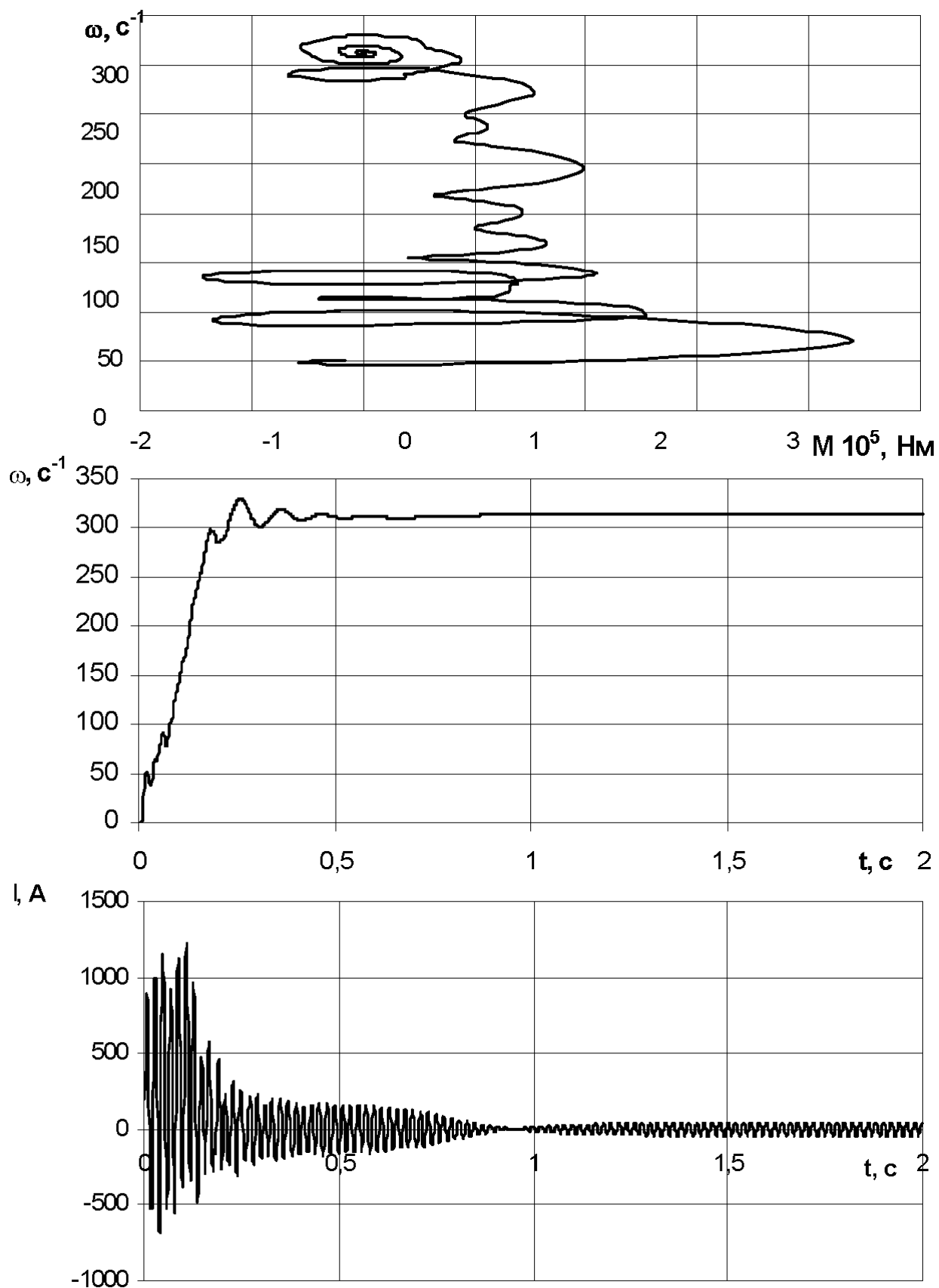
### 3.2 Дослідження пуску синхронних двигунів за зниження якості електроенергії

На промислових підприємствах використовуються різні споживачі електричної енергії. При цьому якість електричної енергії погіршується, з'являються вищі гармоніки по напрузі та струму. Аналіз та дослідження пускових режимів СД доцільно виконувати із врахуванням впливу рівня вищих гармонік напруги на пускові режими СД.

На практиці застосовується кілька методів дослідження роботи СД в несиметричному режимі:

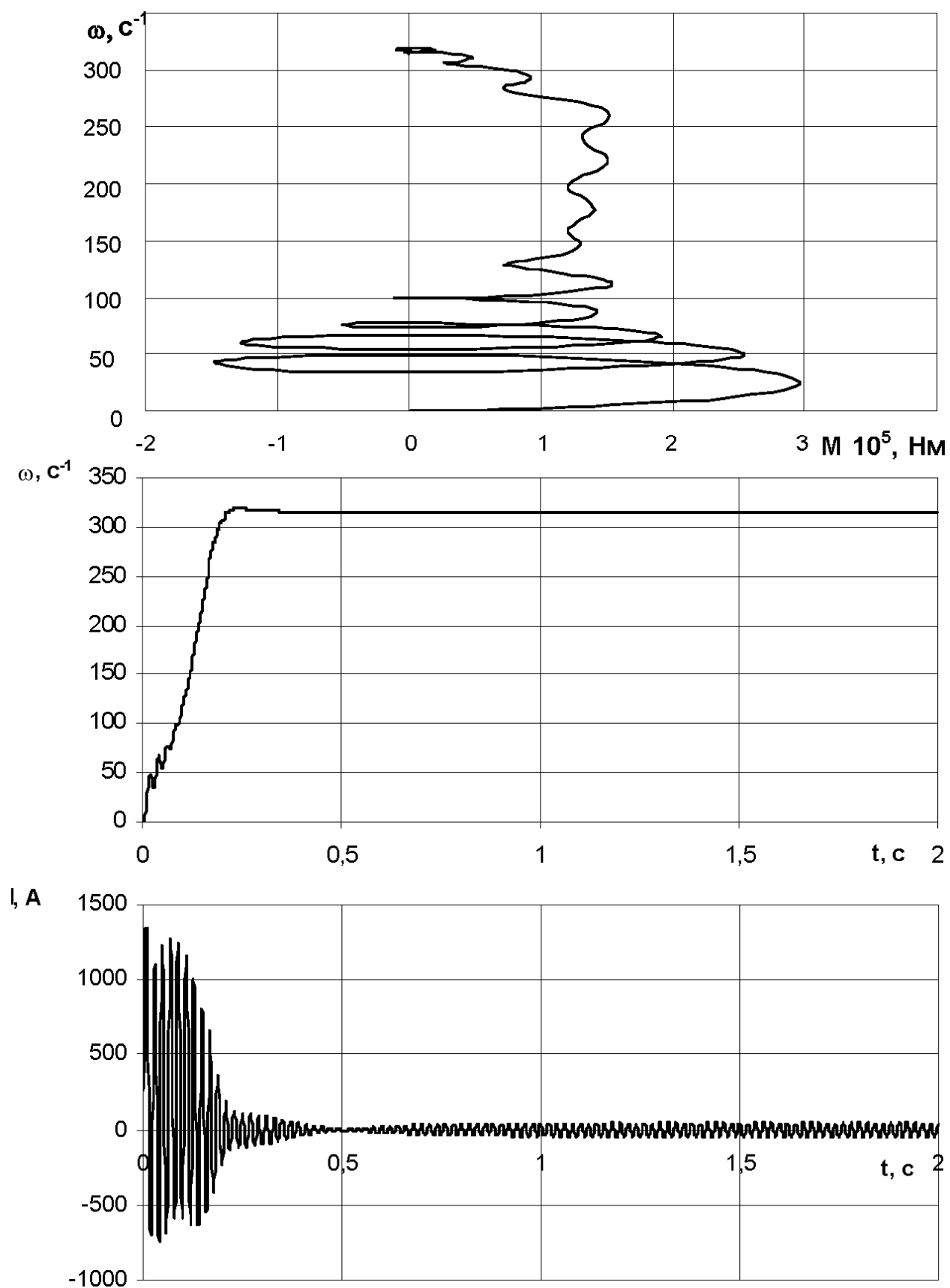
- метод обертових полів;
- метод поперечного полів;
- метод подовжнього полів;
- метод двох реакцій;
- метод симетричних складових.

Усі методи однаково можуть бути використані для аналізу роботи машин змінного струму в несиметричному режимі, хоча кожен із них має свої переваги та недоліки.



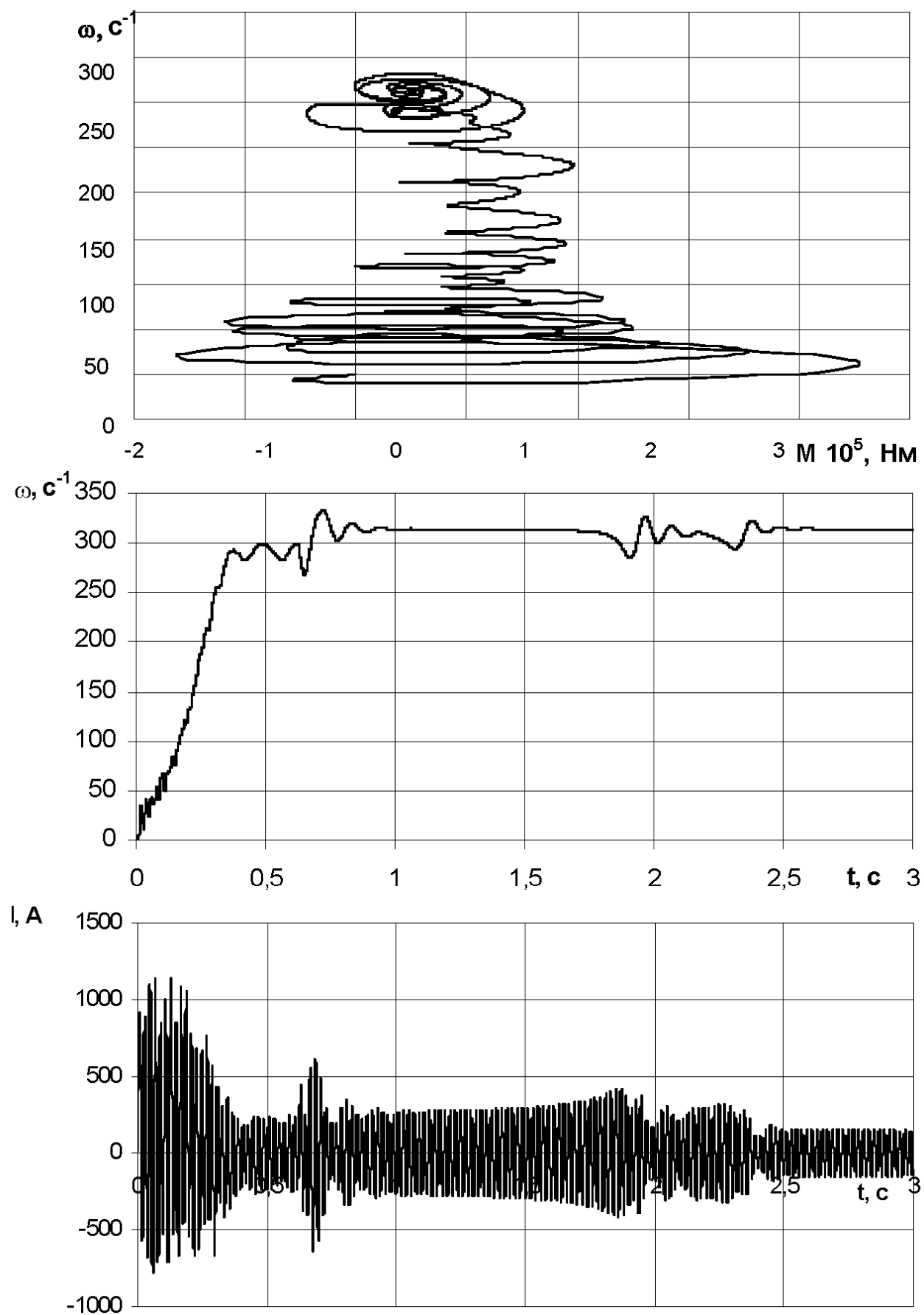
a)

Рисунок 3.1 – Результати комп'ютерного моделювання пуску СД



б)

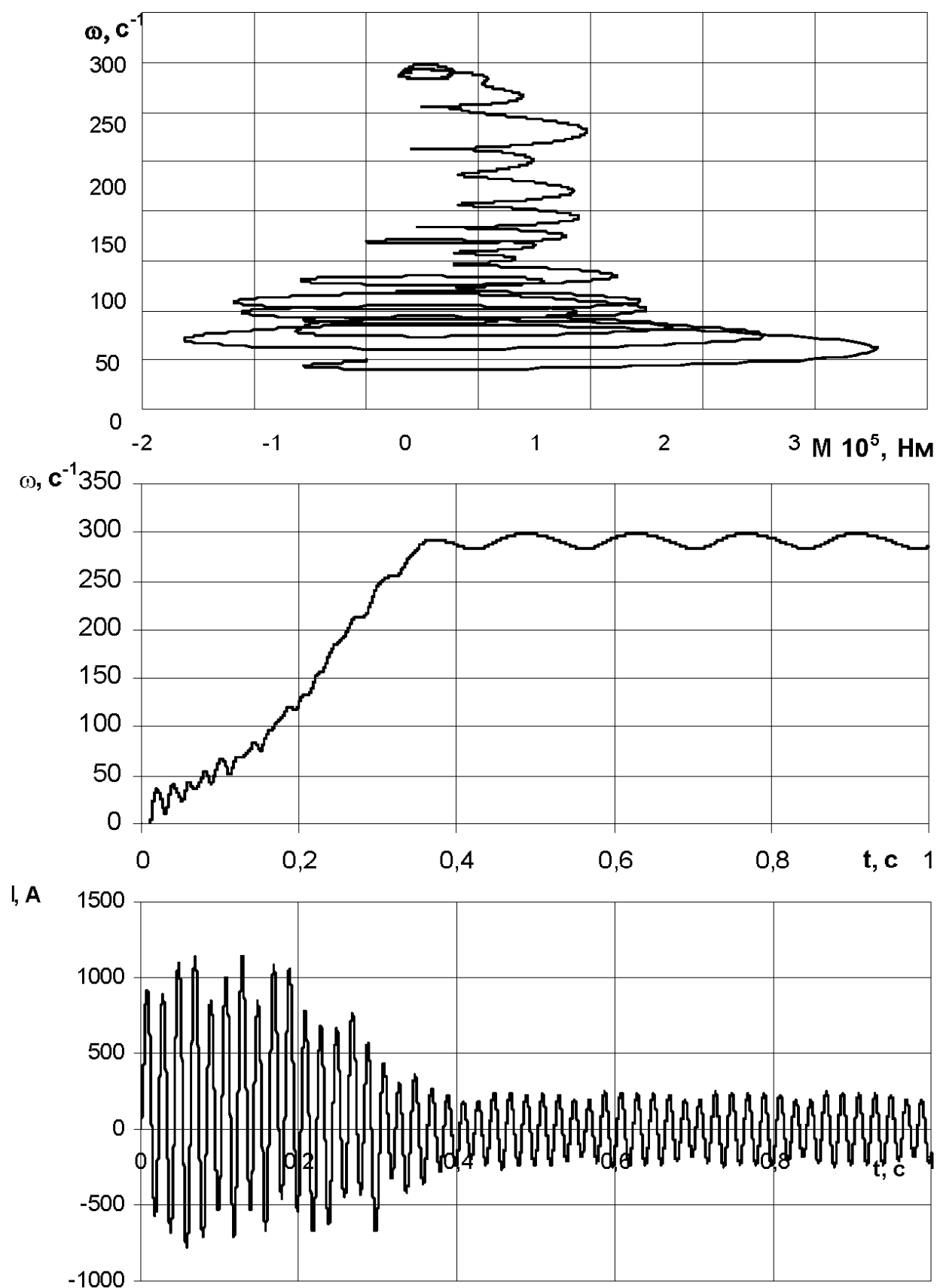
Продовження рисунка 3.1



в)

Продовження рисунка 3.1





г)

Продовження рисунка 3.1

Відповідно до ГОСТ 13109-97 [3] коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною та нульовою послідовностями не повинні перевищувати 2 %, а коефіцієнт  $v$ -тої гармонічної складової напруги не повинен перевищувати 5%.

На рис. 3.2 та рис. 3.3 подано часові діаграми пуску, динамічні характеристики та діаграми пускового струму за результатами комп'ютерного моделювання за поданими моделями в несинусоїдних режимах відповідно при моменті навантаження  $M = 0$  і при  $M = 20090$  Нм.

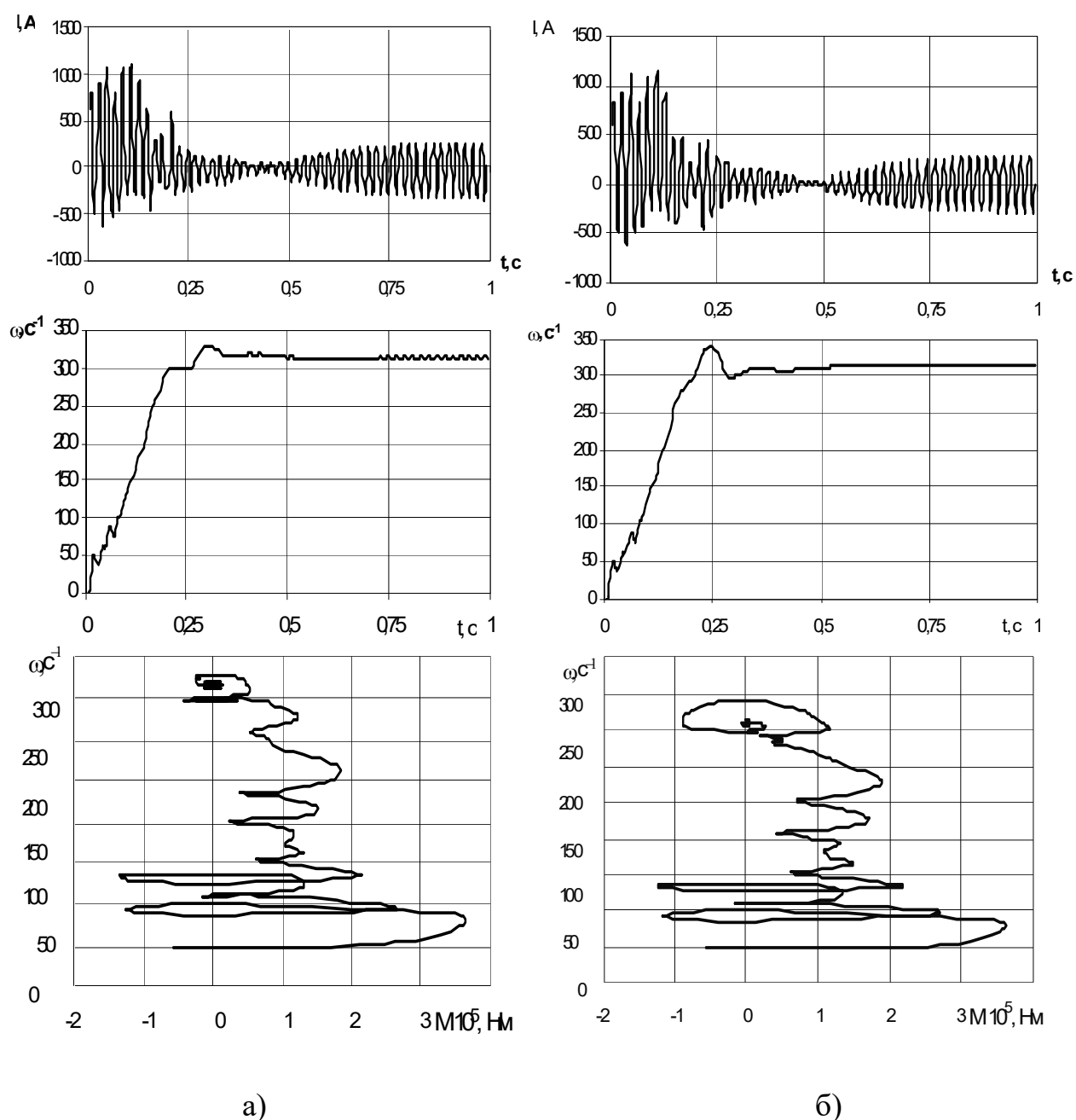


Рисунок 3.2 – Моделювання пуску СД при  $M = 0$

а – при  $\nu = 2$ ; б – при  $\nu = 9$

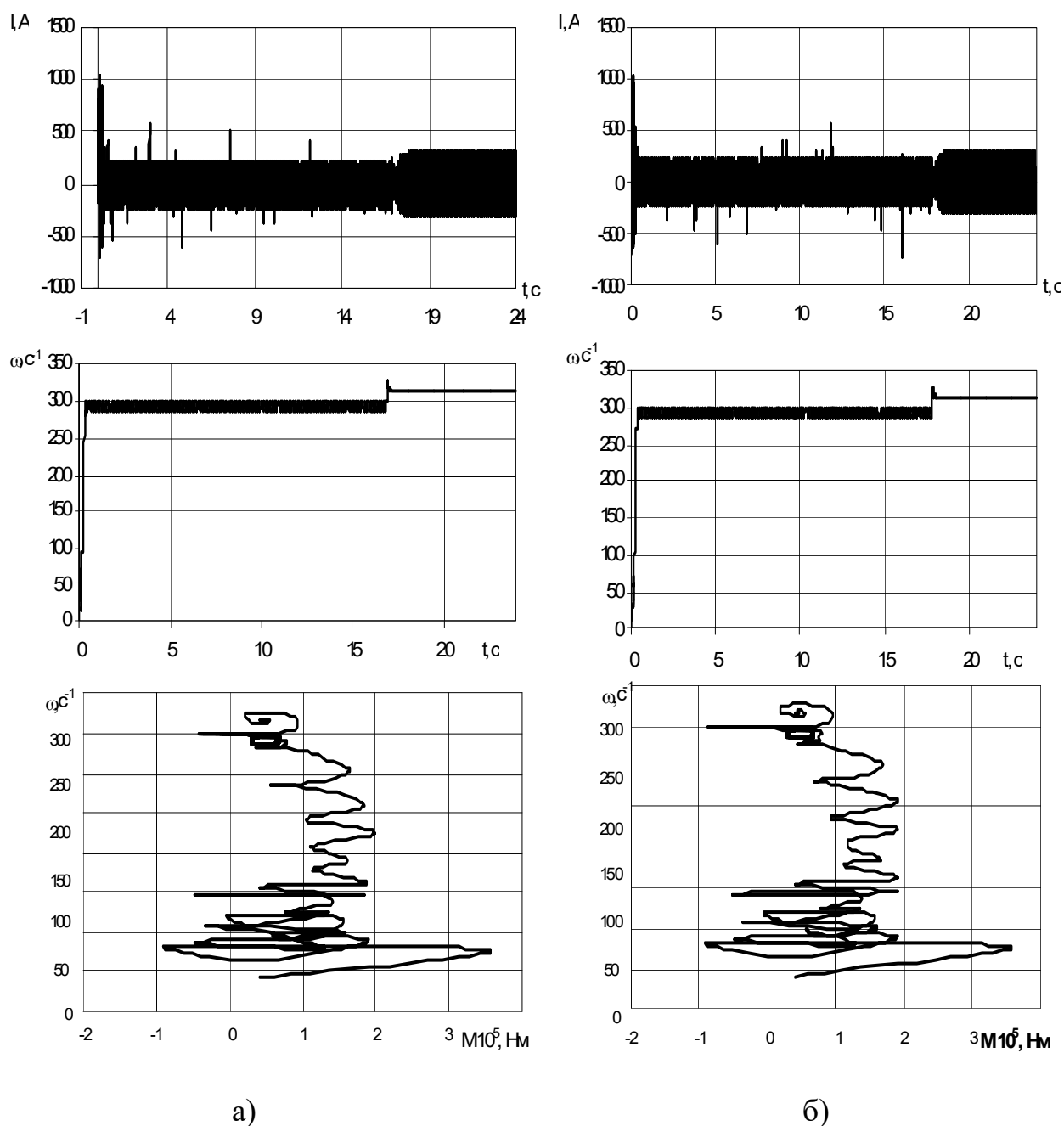


Рисунок 3.3 – Моделювання пуску СД при  $M = 20\ 000\ Nm$

а – при  $\nu = 2$ ; б – при  $\nu = 9$

На рис. 3.4 подано графік коливання швидкості в усталеному режимі при моменті  $M=0$ , а на рис. 3.5 а, б – графіки тривалості розгону двигуна до синхронної швидкості при різних моментах в залежності від  $\nu$ -ої гармонічної складової напруги.

Таким чином, наявність вищих гармонік напруги призводить до погіршення ефективності роботи електроприводу.

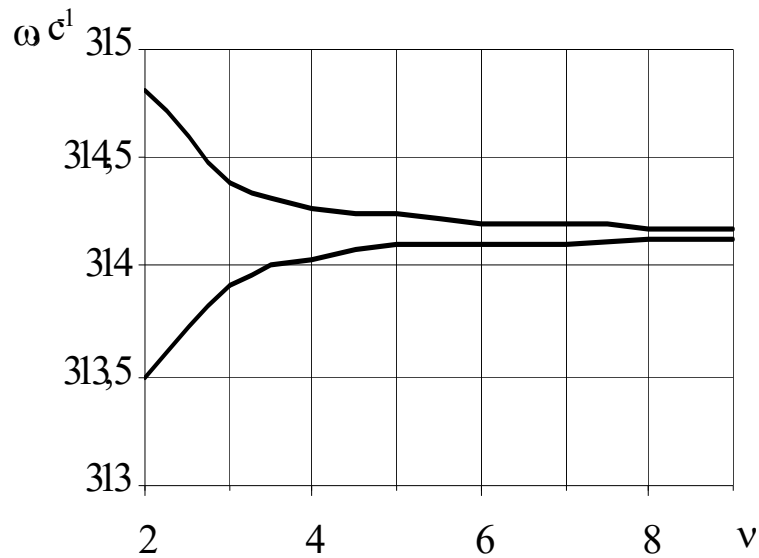


Рисунок 3.4 – Коливання швидкості в усталеному режимі при  $M=0$  Н·м

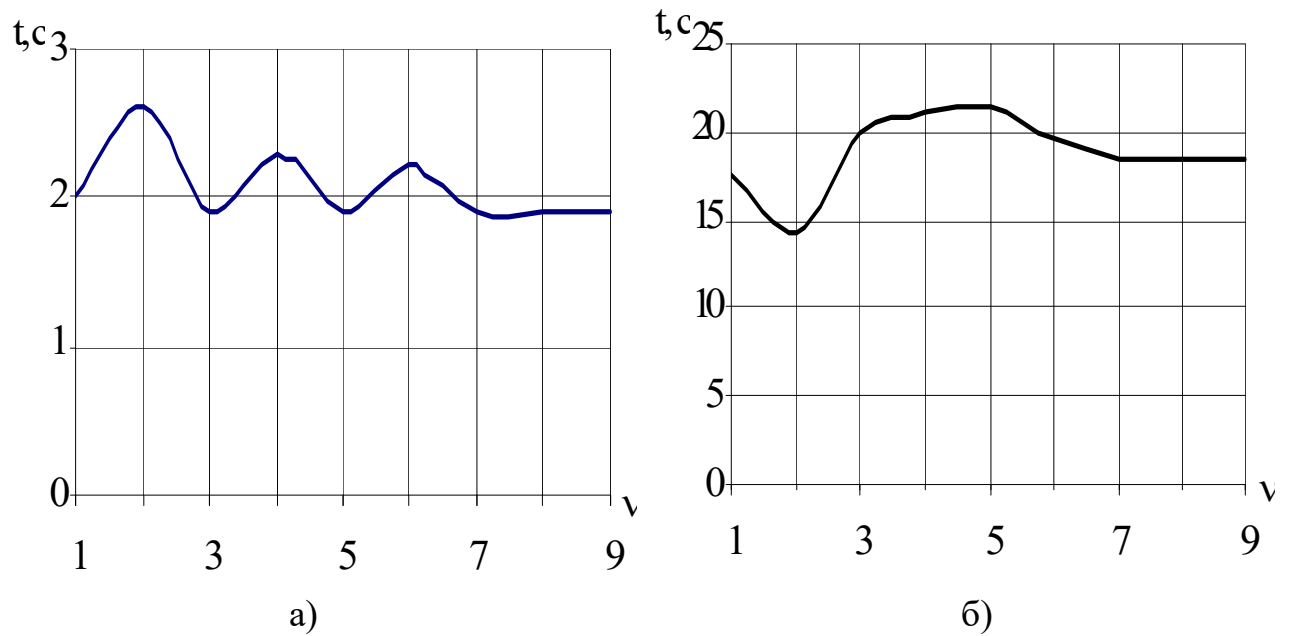


Рисунок 3.5 – Тривалість розгону двигуна до синхронної швидкості при різних навантаженнях

а – при  $M=2 \cdot M_{\text{ном}}=16072$  Н·м; б – при  $M=2,5 \cdot M_{\text{ном}}=20090$  Н·м

### 3.3 Моделювання компенсації реактивної потужності з використанням СД

Системи рівнянь, що характеризують електромагнітні перехідні процеси у синхронних двигунах, запишемо у матричному вигляді [31]

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{sf} & M_{sD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{sQ} \\ 1,5M_{sf} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ 1,5M_{sD} & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 1,5M_{sQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_f}{dt} \\ \frac{dI_D}{dt} \\ \frac{dI_Q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_d \\ -U_q \\ U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} -$$

$$- \begin{bmatrix} R_s & \omega L_q & 0 & 0 & \omega M_{sQ} \\ -\omega L_d & R_s & -\omega M_{sf} & -\omega M_{sD} & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix},$$

де  $R_s$  – активний опір обмотки статора;

$R_f$  – активний опір обмотки збудження;

$R_D$  – активний опір демпферної обмотки по осі  $D$ ;

$R_Q$  – активний опір демпферної обмотки по осі  $Q$ ;

$U_f$  – напруга обмотки збудження;

$U_d$  – напруга обмотки статора по осі  $d$ ;

$U_q$  – напруга обмотки статора по осі  $q$ ;

$L_d$  – індуктивність статорної обмотки по повздожній осі;

$L_q$  – індуктивність статорної обмотки по поперечній осі;

$M_{sf}$ ,  $M_{sD}$ ,  $M_{sQ}$ ,  $M_{fD}$  – взаємоіндуктивності між відповідними обмот-

ками синхронного двигуна.

У спрощеному вигляді дана система рівнянь має вигляд

$$\begin{aligned}\frac{dI_d}{dt} &= \alpha_{11}(-U \sin \theta + p\omega_r L_q I_q - R_s I_d) + \alpha_{12}(U_f - R_f I_f), \\ \frac{dI_q}{dt} &= \alpha_q(E - U \cos \theta - p\omega_r L_d I_d - R_s I_q), \\ \frac{dI_f}{dt} &= \alpha_{12}(-U \sin \theta + p\omega_r L_q I_q - R_s I_d) + \alpha_{22}(U_f - R_f I_f),\end{aligned}$$

де  $\alpha_{11} = L_f / (L_f L_d - M_{sf}^2)$ ;  $\alpha_{12} = M_{sf} / (L_f L_d - M_{sf}^2)$ ;

$\alpha_{22} = L_d / (L_f L_d - M_{sf}^2)$  – обернені індуктивності, що характеризують зв'язок між струмами та електрорушійної сили обмотки збудження та обмотки якоря по повздовжній осі;

$\alpha_q = 1 / L_q$  – обернена індуктивність статора по поперечній осі.

Зазначені рівняння доповнюються виразами, що характеризують електромеханічні процеси

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{-\frac{P(t)}{\omega_r} - M_n(t)}{J}; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_r - \frac{\omega}{p_0}.$$

У разі форсування струму збудження (рис. 3.6) синхронні двигуни володіють здатністю різкої зміни реактивної потужності (рис. 3.7). У даному випадку струм збудження змінюється з 260 А до 330 А, а реактивна потужність синхронного двигуна, який є номінально завантаженим, зменшується до 15 квар. Під час форсування струму збудження різко змінюється активна потужність (рис. 3.8), проте зниження напруг зменшується (рис. 3.9).

Таким чином, форсування збудження синхронних двигунів дає можливість зменшити зниження напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності.

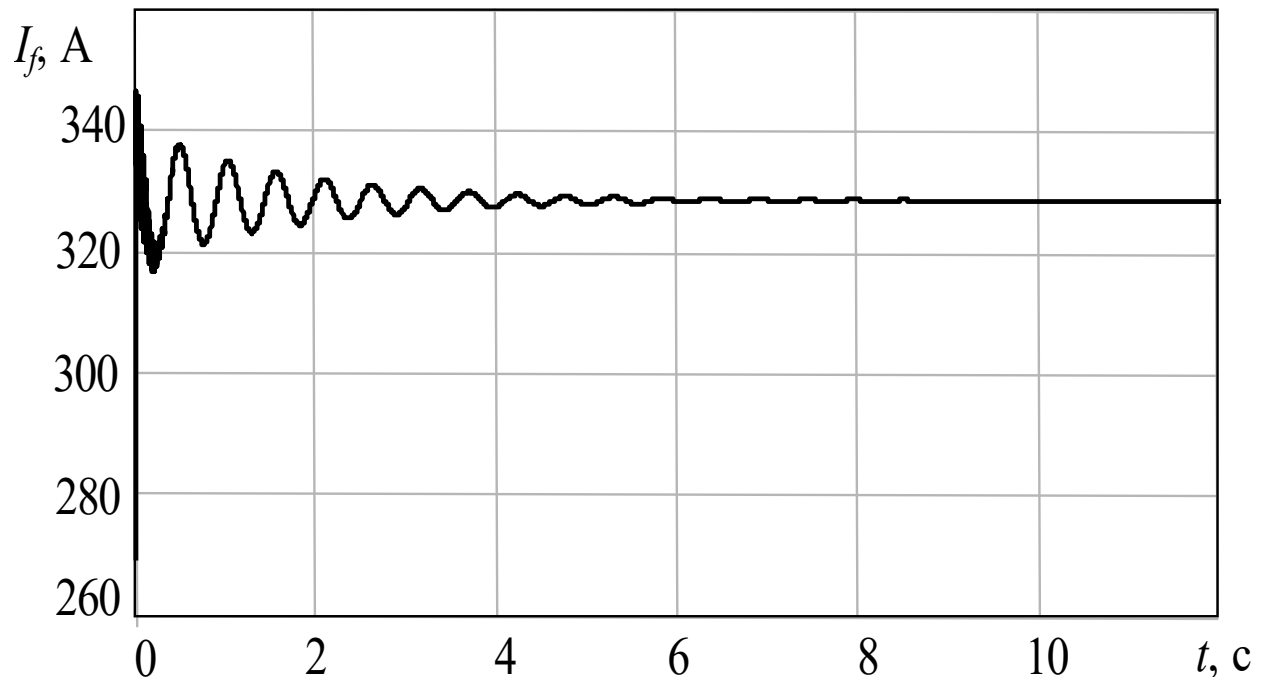


Рисунок 3.6 – Форсування струму збудження СД

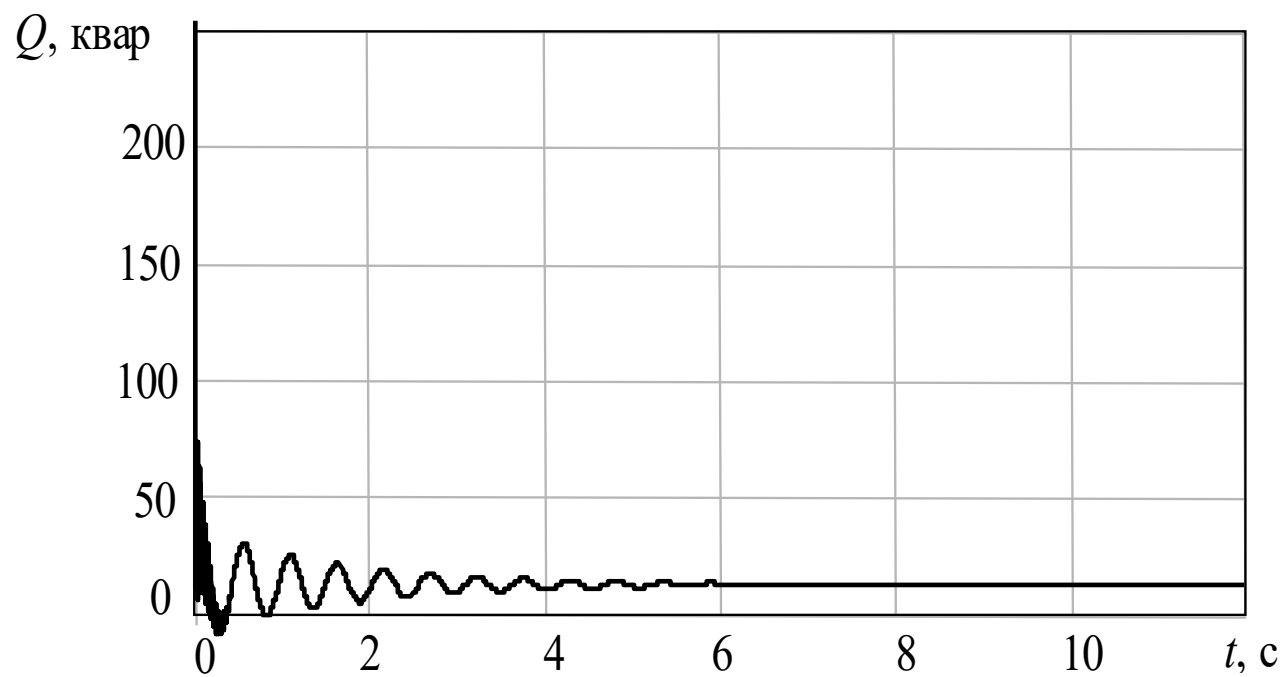


Рисунок 3.7 – Зменшення споживання реактивної потужності СД у разі форсування збудження

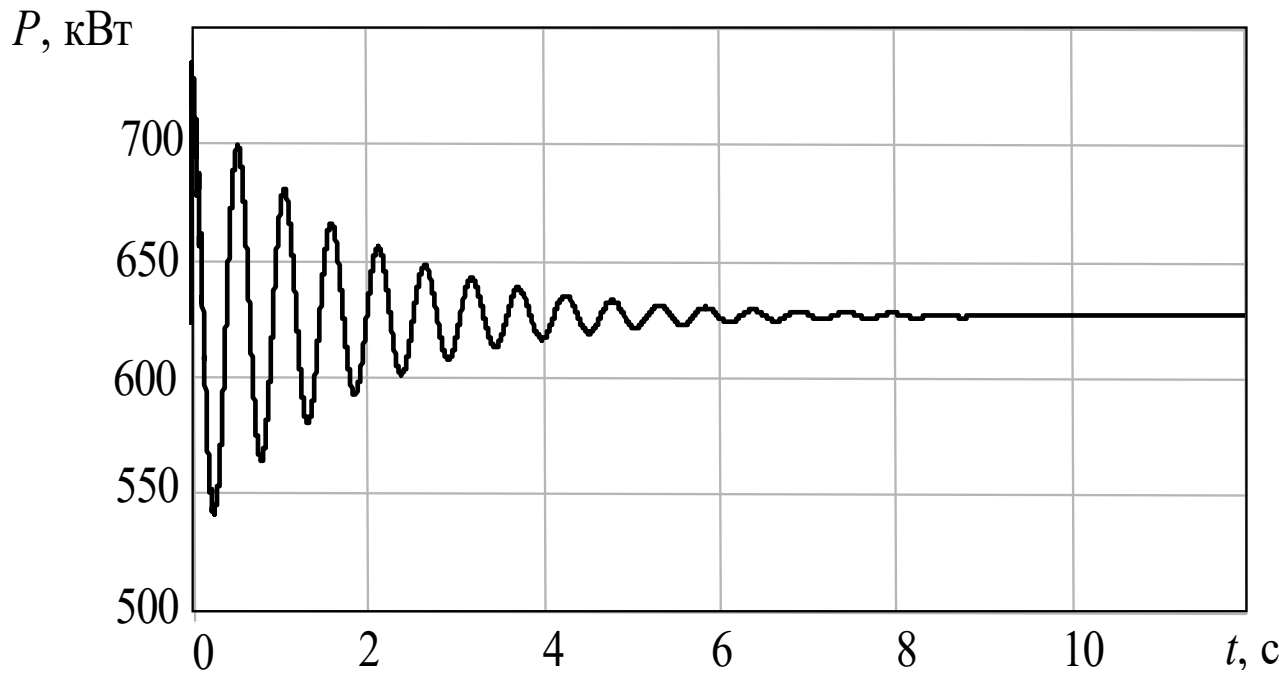


Рисунок 3.8 – Активна потужність СД у разі форсування збудження

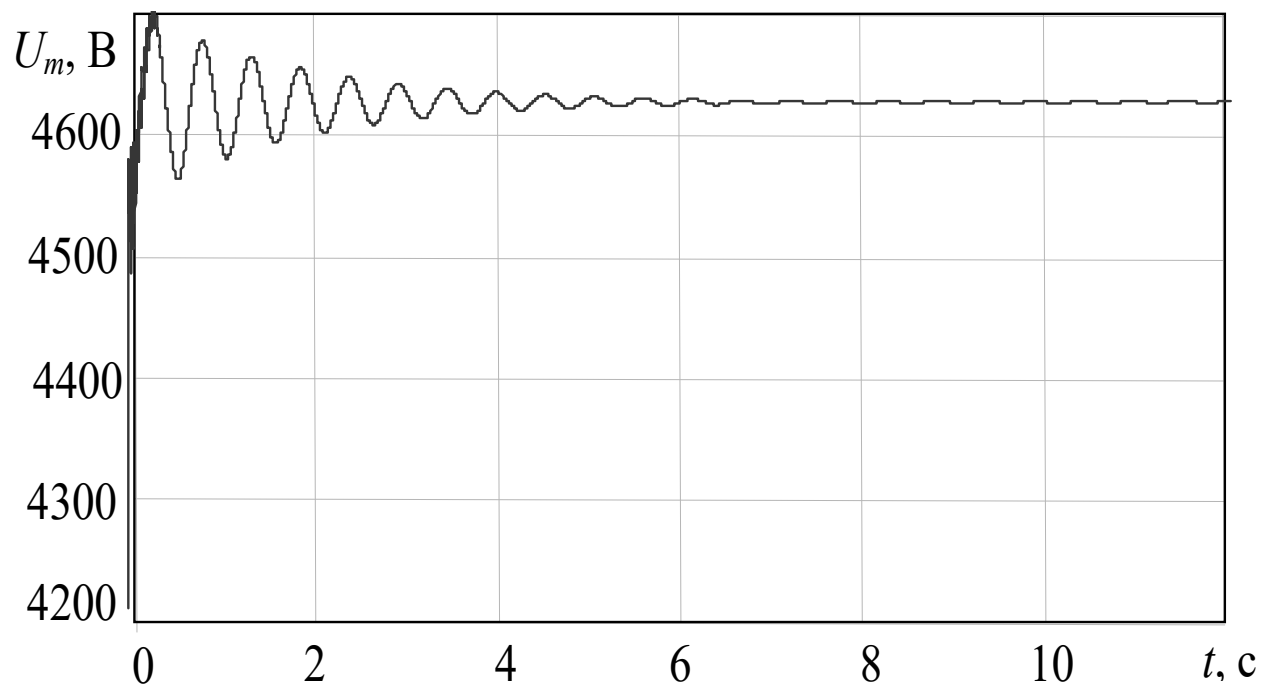


Рисунок 3.9 – Залежність амплітуди фазної напруги у разі форсування збудження СД



### **Висновки до розділу 3**

1. При роботі синхронних двигунів в мережах, у яких якість електричної енергії задовільна, збільшення механічного моменту на валу синхронного двигуна призводить до утворення двох циклів биття. При цьому мають місце великі струми.

2. Досліджено пускові режими синхронних двигунів в несинусоїдних режимах напруги живлення. Наявність вищих гармонік напруги призводить до погіршення ефективності роботи електроприводу.

3. Форсування збудження синхронних двигунів дає можливість зменшити знижень напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності, але при цьому має місце коливання активної потужності, яке вимагає її стабілізації.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Електробезпека та захисне заземлення електрообладнання

Експлуатація компенсаційних установок електроприводу неминуче пов'язана з використанням електричної енергії. Електробезпека – це система організаційних, технічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, спричиняє термічну, електролітичну і біологічну дію, викликає місцеві і загальні електротравми. Дія електричного струму на організм людини супроводжується зовнішнім ураженням тканин та органів у вигляді механічних ушкоджень, електричних знаків електрометалізації шкіри, опіків.

Для забезпечення умов безпечності людей від ураження електричним струмом, захисту електрообладнання і електроустановок від перенапруги, електропривод повинен мати заземлюючі пристрої, до яких надійно підключають металеві частини електроустановок та корпуси електрообладнання, які внаслідок порушення ізоляції можуть бути під напругою.

Заземлення електроустановок необхідно виконувати:

- при напрузі 500 В і вище змінного і постійного струму в усіх випадках;
- при напрузі змінного струму вище 42 В і постійного струму вище 110 В, у приміщеннях з підвищеною небезпечністю, особливо небезпечних і у зовнішніх електроустановках;
- при всіх напругах змінного і постійного струму у вибухонебезпечних приміщеннях.

До частин, які підлягають заземленню, відносяться:

- корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників тощо;
- вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів;
- каркasi розподільних щитів, щитів управління, щитів і шаф;
- металеві конструкції розподільних пристроїв, металеві кабельні

конструкції, металеві корпуси кабельних муфт, металеві оболонки проводів, сталеві труби електропроводки та інші металеві конструкції, що зв'язані з установкою електрообладнання;

- металеві корпуси пересувних і переносних електроприймачів;
- металеві опори повітряних ліній.

Кожний заземлюючий елемент установки повинен бути приєднаний до заземлювача або заземлюючої магістралі за допомогою окремого відгалуження. Послідовне включення у заземлюючий провідник декількох заземлюючих частин установки не дозволяється. Приєднання заземлюючих провідників до заземлювачів і заземлюючих конструкцій повинно бути виконано зваркою або надійним болтовим з'єднанням. При цьому у сирих приміщеннях контактні поверхні повинні мати захисні покриття. Кінці заземлюючих гнучких провідників, що використовуються для приєднання до корпусів апаратів, машин тощо, повинні мати наконечники.

При наявності струсу або вібрації потрібно прийняти заходи проти послаблення контакту (контргайки, контр-шайби тощо).

Заземлюючі провідники, які розміщені у приміщеннях, повинні бути доступні для огляду. Ці вимоги не відносяться до нульових жил і металевих оболонок кабелів, трубопроводів схованої електропроводки, металоконструкцій, що знаходяться у землі, а також провідників заземлення, що прокладені у трубах.

Кожний заземлюючий пристрій, що знаходиться в експлуатації, повинен мати паспорт, який вміщує схеми заземлення, його основні технічні дані про результати перевірки стану заземлюючого пристрою, про характер проведених ремонтів та змін, що внесені у пристрій заземлення.

В електроустановках з глухозаземленою нейтраллю при замиканні на заземлені частини необхідно забезпечити автоматичне виключення пошкоджених ділянок мережі з мінімальним часом підключення. Для цього в електроустановках з напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю повинен бути необхідний металевий зв'язок корпусу електрообладнання з заземленою нейтраллю установки.

## 4.2 Надзвичайні ситуації воєнного часу

Найбільш небезпечна ситуація може скластися при застосуванні зброї масового ураження, до якої можна включити ядерну, хімічну та бактеріологічну (біологічну) зброю.

Ядерна зброя – це сукупність ядерних боєприпасів, засобів їхньої доставки до цілі й засобів керування, що є зброєю масового ураження. Ядерні боєприпаси можуть виконуватися у вигляді боєголовок для ракет, авіабомб, артилерійських снарядів, мін, торпед і т.д. Їхня дія заснована на використанні внутрішньоядерної енергії, що виділяється при ланцюгових реакціях поділу деяких ізотопів урану й плутонію або при термоядерних реакціях синтезу легких ядер ізотопів водню у важкі.

При ядерному вибуху в атмосфері виникають такі уражаючі фактори:

1. Повітряна ударна хвиля – це різке стиснення повітря, що поширюється в усі сторони від центра вибуху з надзвуковою швидкістю. Джерелом виникнення є високий тиск у зоні вибуху й температура, що досягає мільйонів градусів. На відкритій місцевості дія ударної хвилі знижується різними заглибленнями, перешкодами. Рекомендується лягти на землю головою в напрямку до вибуху, краще в заглиблення або за складку місцевості.

2. Світлове випромінювання – це потік променистої енергії, що включає ультрафіолетову, видиму й інфрачервону зони спектра. Джерелом є світло вибуху, що складається з нагрітих до високої температури пар конструкційних матеріалів боєприпасів і повітря, а при наземних вибухах – і ґрунту, піднятого в повітря. Захистом від світлового випромінювання може служити будь-яка непрозора перешкода.

3. Проникна радіація – це гамма-випромінюванням та потік нейтронів, що випускаються із зони ядерного вибуху. Проникна радіація може викликати оборотні й необоротні зміни в матеріалах, елементах радіотехнічної, оптичної й іншої апаратури за рахунок порушень кристалічних решіток речовини, а також у результаті різних фізико-хімічних процесів під впливом іонізуючих випромінювань. Захистом служать різні матеріали, що послабляють гамма-випромінювання та потік нейтронів.

Хімічною зброєю називають отруйні речовини й засоби їхнього

застосування. До засобів застосування належать авіаційні бомби, касети, бойові частини ракет, артилерійські снаряди, хімічні міни, виливні авіаційні прибори, генератори аерозолів і т.д. Основу хімічної зброї складають отруйні речовини – токсичні хімічні сполуки, що уражають людей та тварин, а також заражають повітря, місцевість, водойми і різні предмети на місцевості.

При застосуванні хімічних боєприпасів утворюється первинна хмара отруйних речовин. Під дією мас повітря, що рухається, хмара поширюється на деякому просторі, утворюючи зону хімічного зараження. Захист від отруйних речовин досягається використанням засобів індивідуального захисту органів дихання й шкіри, а також колективних засобів.

Біологічною зброєю називають хвороботворні мікроби й засоби їхнього застосування. Основу уразливої дії складають хвороботворні мікроорганізми-бактерії, віруси, рикетсії, гриби та бактеріальні отрути (токсини). Біологічні засоби застосовуються у вигляді біологічних рецептур – сумішей біологічного агенту і спеціальних препаратів, що забезпечують сприятливі умови біологічному агенту в умовах збереження й застосування. Для запобігання поширення інфекційних захворювань устанавлюється карантин або обсервація.

Карантин – це система протиепідемічних і режимно-обмежувальних заходів, спрямованих на повну ізоляцію вогнища та ліквідацію в ньому інфекційних захворювань.

Обсервація – це система режимно-обмежувальних і лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на попередження поширення інфекційних захворювань. У зонах карантину та обсервації проводяться медичні профілактичні заходи, організуються й проводяться дезінфекція, дезінсекція (знищення комах) і дератизація (винищування гризунів). Проводиться профілактичний прийом антибіотиків та інших препаратів усім населенням. Усі хворі, а також підозрювані на захворювання, негайно госпіталізуються.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Покращено систему динамічної компенсації реактивної потужності, що дає підвищення швидкодії компенсування реактивних навантажень та зменшує провали напруг.

2. На основі аналізу пускових характеристик АД встановлено, що причиною пошкодження обмоток АД є пускові струми за завищеної напруги на їх затискачах. Рекомендовано знизити рівень напруги з одночасним використанням динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах АД.

3. Досліджено пускові режими синхронних двигунів в несинусоїдних режимах напруги живлення. Наявність вищих гармонік напруги призводить до погіршення ефективності роботи електроприводу.

4. Встановлено, що форсування збудження синхронних двигунів дає можливість зменшити спади напруги за рахунок динамічної компенсації реактивної потужності. Але тут має місце коливання активної потужності, що вимагає її демпфірування.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 166 с.
2. Трошин В. А. Об экономической целесообразности использования компенсирующей способности синхронного двигателя для автоматического регулирования напряжения / В. А. Трошин. – В сб.: Регулирование напряжения в электрических сетях. – М.: Энергия, 1968. – С. 315–319.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. – [Введ. с 1999-01-01]. – М.: Стандартинформ, 2006. – 35с.
4. Баркан Я. Д. Использование статистической информации о качестве напряжения в электрических сетях / Я. Д. Баркан, Н. С. Маркушевич. – М.: Энергия, 1972. – 120 с.
5. Аберсон М. Л. Оптимизация регулирования напряжения / М. Л. Аберсон. – М.: Энергия, 1975. – 160 с.
6. Дмитриева Е. Н. Расчет показателей качества напряжения с учетом взаимного влияния электроприемников через сеть / Е. Н. Дмитриева, И. В. Пушная. // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – №2. – С. 190–191.
7. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К.: Техника, 1981. – 160 с.
8. Саляк И. И. О компенсации реактивной энергии в системах электроснабжения ограниченной мощности / И. И. Саляк, Р. А. Селепина // Вестник Львовского политехн. ин-та Энергомеханические и электроэнергетические системы. – № 140. – Львов: Изд-во Львов.ун-та, 1980. – С. 81–83.

9. Трошин В. А. О выборе оптимального режима возбуждения синхронных двигателей / В. А. Трошин // Изв.вузов. Электромеханика. – 1969. – №5. – С.487-491.
10. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
11. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях предприятий / В. В. Красник. – М.: Энергия, 1975. – 113 с.
12. Айрапетян Г. А. Расчет на ЭЦВМ режима работы синхронного двигателя при изменении различных параметров режима / Г. А. Айрапетян, Г. А. Налчаджян. – В кн.: Научн.тр. – Ереван.политехн.ин-т, 1972. – №28. – С.152–159.
13. Баркан Я. Д. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности / Я. Д. Баркан. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
14. Князевский Б. А. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. А. Князевский, Б. Ю. Липкин. – М.: Высшая школа, 1986. – 400 с.
15. Блантер С. Г. Выбор параметра и закона регулирования возбуждения синхронных двигателей подъемных лебедок современных буровых установок / С. Г. Блантер, Л. И. Козлова // Машины и нефтяное оборудование. – М.: ВНИИОЭНГ, 1972. – №.5. – С. 3–5.
16. Зубков В. П. Модернизированный автоматический регулятор возбуждения синхронных двигателей буровых механизмов / В. П. Зубков, В. Г. Кузьмин, Р. А. Селепина // Автомат. и телемех. нефтяной промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ. – 1978. – №12. – С. 7-8.
17. Саляк И. И. Исследование автоматического регулятора возбуждения приводного синхронного двигателя буровой лебедки / И. И. Саляк, Р. А. Селепина, Г. С. Корниевич, В. Н. Холин // Машины и нефтяное оборудование. – М., 1975. – №8. – С. 30–35.
18. Глебов И. А. Система возбуждения и регулирования синхронных двигателей / И. А. Глебов, С. И. Логинов.– Л.: Энергия, 1972. – 112 с.



19. Способ автоматического регулирования напряжения и реактивной нагрузки нагрузочного узла группой синхронных двигателей: А.с. 434534 СССР / Я. Д. Баркан. – №4653258/21; Заявлено 23.03.73; Опубл. 30.03.74, Бюл. № 24. – 4с.

20. Литкенс И. В. Применение метода синтеза регуляторов возбуждения синхронных двигателей, повышающих качество электроэнергии в узлах резкопеременной нагрузки / И. В. Литкенс, Л. М. Погорелов, В. А. Строев // Моск. энерг.ин-та. М., 1974. – ч. II, вып. 171. – С.21-22.

21. Петелин Д. П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей / Д. П. Петелин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 104 с.

22. Петелин Д. П. Автоматическое управление синхронными электродвигателями / Д. П. Петелин. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.

23. Петелин Д. П. Динамика синхронного привода поршневых компрессорных установок / Д. П. Петелин. – М.: Машиностроение, 1976. – 159 с.

24. Системы управления электроприводами и синхронными двигателями с тиристорным возбуждением и автоматическим регулированием возбуждения / О. Ш. Вайнтруб, Б. Р. Гендельман, А. Ш. Вейнгер [и др.] // Сб. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергия. – 1980. – С. 180–185.

25. Zawirski K. Regulacja wzbudzenia silnika synchronicznego optymalna ze wzgledu na oddziaływanie na siec zasilajace / K. Zawirski // Arch. Elektrotechniki PRL, XXX. – N1. – s.177-188.

26. Важнов Р. К. Переходные процессы в машинах переменного тока / Р. К. Важнов. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

27. Аномальные режимы крупных синхронных машин / Е. Я. Казовский, Я. Б. Данилевич, Э. Г. Каширский, Г. В. Рубисов. – Л.: Наука, 1969. – 429 с.

28. Копылов И. П. Электромеханические переходные режимы при асинхронном пуске синхронного двигателя / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Л. Н. Васильев // Электротехника. – 1977. – №1. – С. 6–8.

29. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 551 с.

30. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л. П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.
31. Костюк О. М. Колебания и устойчивость синхронных машин / О. М. Костюк, М. И. Соломаха. – К.: Наукова думка, 1991. – 200 с.
32. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536с.
33. Блантер С. Г. Исследование колебаний ротора синхронного двигателя буровой лебедки / С. Г. Блантер, Ю. С. Жуков, И. И. Суд // Электричество. – 1966. – №11. – С. 66–68.
34. Гусейнова Г. Ф. Об одном методе расчета устойчивости и резонансного явления больших колебаний синхронного двигателя узла нагрузки / Г. Ф. Гусейнова // Изв. Вузов. Энергетика. – 1982. – №2. – С.90–93.
35. Коноплев К. Г. Включение нагрузки на синхронный двигатель / К. Г. Коноплев // Изв. Вузов. Энергетика. – 1982. – №2. – С.186–190.
36. Расулов М. М. К расчету переходных процессов в синхронном приводе с ЭМС / М. М. Расулов, Л. Ф. Алиев, Е. К. Гусейнов // Изв. вузов Энергетика. – 1975. – №2. – С. 109–112.
37. Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины / И. Д. Урусов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – 416 с.
38. Янко-Триницкий А. А. Новый метод анализа работы синхронных двигателей при резкопеременных нагрузках / А. А. Янко-Триницкий. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 103 с.
39. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних систем / В. Й. Чабан. – Львів: В-во Держун-т „Львівська політехніка”, 1997. – 342 с.
40. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
41. А.с. 1474794 СССР, МКИ<sup>5</sup> Н 02 J 3/18. Устройство для регулирования напряжения / В. Я. Чаронов, Б. Н. Абрамович, К. А. Анаев, Л. В. Макурова, П. М. Каменев и Ш. К. Якупов (СССР). — № 4046013/24–07; заявл. 19.09.86; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15.

42. А.с. 1677774 СССР, МКИ<sup>5</sup> Н 02 J 3/18. Устройство продольно-поперечного регулирования напряжения сети / К. А. Ананьев, О. В. Иванов, А. В. Гвоздев, Б. П. Коновалов, М. М. Малюшицкий, И. И. Столяров и С. В. Трухалева (СССР). — № 4729517/07; заявл. 18.08.89; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.

43. А.с. 1686597 СССР, МКИ<sup>5</sup> Н 02 J 3/18. Устройство продольно-поперечного регулирования напряжения / К. А. Ананьев, О. В. Иванов, В.П.Ганский, Б. П. Коновалов, С. В. Трухалева и Е. М. Проскуряков (СССР). — № 4765093/07; заявл. 02.11.89; опубл. 23.10.91, Бюл. № 39.

44. А.с. 1267532 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 J 3/18. Устройство для управления источником реактивной мощности / В. А. Горшечников, Г. М. Васильев, А. В. Манин и М. П. Рябов (СССР). — № 3858461/24-07; заявл. 22.02.85; опубл. 30.10.86, Бюл. № 40.

45. А.с. 1275641 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 J 3/18. Система электропитания нагрузки / Ю. Е. Варецкий, М. С. Сегеда и Ю. А. Кенс (СССР). — № 3888536/24-07; заявл. 24.04.85; опубл. 07.12.86, Бюл. № 45.

46. А.с. 1347118 СССР, МКИ<sup>4</sup> Н 02 J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / А. Л. Шитов и С. Н. Черевань (СССР). — № 4078485/24-07; заявл. 18.06.86; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39.