

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

Електротехнічний  
(факультет)

Кафедра Електропривода  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

дипломної роботи

магістра

(назва освітньо-кваліфікаційного рівня)

галузь знань 14 Електрична інженерія  
(шифр і назва галузі знань)

спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

освітній рівень магістр

(назва освітнього рівня)

Кваліфікація 2151.2 (Int) Інженер-електромеханік

(код і назва кваліфікації)

на тему: Паралельні активні фільтри в системах групового живлення частотно-регульованих електроприводів

Виконавець:

Студент 6 курсу, групи 141м-16-4

Глива М.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка	Підпис
проекту	Колб А.А.		
розділів:			
Розділ 1	Колб А.А.		
Розділ 2	Колб А.А.		
Розділ 3	Колб А.А.		
Розділ 4	Колб А.А.		
Розділ 5	Голінько В.І.		

Рецензент			
-----------	--	--	--

Нормоконтроль	Казачковський М.М.		
---------------	--------------------	--	--

Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
"Національний гірничий університет"

---

---

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

завідувач кафедри  
Електроприводу  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 року

**ЗАВДАННЯ**

на виконання кваліфікаційної роботи магістра  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва спеціальності)

(освітня програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»)

студенту 141М-16-4 Глива М.В.  
(група) (прізвище та ініціали)

Тема дипломної роботи : Паралельні активні фільтри в системах групового живлення частотно-регульованих електроприводів

**1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

Наказ ректора ДВНЗ "НГУ" від 31.10.2017 № 1806-л

**2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

Об'єкт досліджень Електромагнітні процеси, які відбуваються в системах групового живлення електроприводів з ємнісними накопичувачами.

Предмет дослідження Паралельні активні фільтри в системах групового живлення.

Мета НДР Розробка математичних моделей для дослідження впливу статичного і динамічного резерву напруги в ланці постійного струму на енергетичні показники силових активних фільтрів в системах групового живлення приводів.

Вихідні дані для проведення роботи Результати досліджень кафедри електроприводу в галузі систем групового живлення електроприводів.

**3 ОЧІКУВАНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ**

Наукова новизна Розробка математичної моделі для дослідження впливу резерву

напруги в ланці постійного струму на енергетичні характеристики паралельних активних фільтрів в режимі компенсації неактивних складових потужності.

Практична цінність Дослідження впливу напруги в ланці постійного струму на динамічні показники силового активного фільтру (швидкодія, рівень пульсацій струму, частота комутації ключів інвертора).

#### 4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

---

---

---

---

#### 5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Теоретичне дослідження електромагнітних процесів в системах групового живлення електроприводів з ємнісними накопичувачами	1.11.2017– 19.11.2017
Розробка математичної моделі для дослідження впливу динамічного та статичного резервів напруги в ланці постійного струму на енергетичні показники силових активних фільтрів	20.11.2017– 4.12.2017
Дослідження впливу динамічного резерву напруги на рівень пульсацій струму інвертора та частоту комутацій ключів інвертора.	5.12.2017– 19.12.2017

#### 6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект Від реалізації результатів роботи очікується завдяки покращенню якості електроенергії.

Соціальний ефект Від реалізації результатів роботи очікується у покращенні якості одержуваних послуг електропостачання.

#### 7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

---

---

---

---

Завдання видав \_\_\_\_\_

(підпис)

Колб А.А.

(прізвище, ініціали)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис)

Глива М.В.

(прізвище, ініціали)

Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_

Термін подання дипломної роботи до ЕК \_\_\_\_\_

## Реферат

Пояснительная записка стр.54, рис.30,источников 13.

**Объект исследований** – электромагнитные процессы в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями.

**Предмет исследований** – параллельные активные фильтры в системах группового питания.

**Цель дипломной работы** – разработка математической модели для исследования влияния статического и динамического резерва напряжения в звене постоянного тока на энергетические показатели силовых активных фильтров в системах группового питания электроприводов.

В данной работе исследовано влияние резерва (запаса) напряжения в звене постоянного тока на энергетические характеристики параллельных активных фильтров в системах группового питания электроприводов в режиме компенсации неактивной составляющей полной мощности, а также на частоту коммутации ключей инвертора и быстродействие системы.

**Практическая ценность** результатов заключается в:

- разработке методики выделения и непрерывного контроля мгновенных значений реактивной мощности на основе  $I_x$ ,  $I_y$  теории мгновенной мощности с помощью обобщенных (результатирующих) векторов напряжения и тока;

- исследовании влияния напряжения в звене постоянного тока на динамические показатели силового активного фильтра (быстродействие, уровень пульсаций тока, частота коммутации ключей инвертора)

**Экономический эффект** от реализации результатов работы ожидается положительным, благодаря улучшению качества электроэнергии.

**СИЛОВЫЕ АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ЕМКOSTНЫЕ НАКОПИТЕЛИ.**

## Реферат

Пояснювальна записка стор.54, рис.30,джерел 13.

**Об'єкт досліджень** – електромагнітні процеси в системах групового живлення електроприводів з ємнісними накопичувачами.

**Предмет досліджень** – паралельні активні фільтри в системах групового живлення.

**Мета дипломної роботи** – розробка математичної моделі для дослідження впливу статичного й динамічного резерву напруги в ланці постійного струму на енергетичні показники силових активних фільтрів у системах групового живлення електроприводів.

У даній роботі досліджений вплив резерву (запасу) напруги в ланці постійного струму на енергетичні характеристики паралельних активних фільтрів у системах групового живлення електроприводів у режимі компенсації неактивної складової повної потужності, а також на частоту комутації ключів інвертора й швидкодії системи.

**Практична цінність** результатів полягає в:

- розробці методики виділення й безперервного контролю миттєвих значень реактивної потужності на основі  $I_x$ ,  $I_y$  теорії миттєвої потужності за допомогою узагальнених (результуючих) векторів напруги й струму;

- дослідженні впливу напруги в ланці постійного струму на динамічні показники силового активного фільтра (швидкодія, рівень пульсацій струму, частота комутації ключів інвертора)

**Економічний ефект** від реалізації результатів роботи очікується позитивним, завдяки поліпшенню якості електроенергії.

**СИЛОВІ АКТИВНІ ФІЛЬТРИ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ, ЄМНІСНІ НАКОПИЧУВАЧІ.**

## Abstract

Explanatory note pages 54, Fig.30, sources 13.

**The object of research** - the electromagnetic processes in the electric power systems group with capacitive storage.

**The object of research** - the parallel active filters in power systems group.

**The purpose of the thesis** - development of a mathematical model for research effect of static and dynamic voltage reserve in the DC link on the energy parameters of the power active filters in the system of power supply of group electric drives.

In this work investigated the effect of reserve (stock) voltage in DC link on the energy characteristics of parallel active filters in the system of power supply of group electric drives in the mode of compensation an inactive component of full power, frequency of inverter commutation keys and system performance.

**The practical value** of the results is:

- development of methods selection and continuous control of the instantaneous values of reactive power based on  $I_x$ ,  $I_y$  theory of instantaneous power with generalized (resulting) vectors of voltage and current.

- investigation the influence of voltage in DC link on the dynamic indices of the power active filter(performance, magnitude of pulsations, frequency of inverter commutation)

**Economic effect** from the implementation of results of the work is expected to be positive due to improved power quality.

**POWER ACTIVE FILTER, ELECTROMAGNETIC PROCESSES, CAPACITOR STORAGE**

## Введение.

Асинхронные двигатели (АД) в настоящее время являются одними из самых распространенных и составляют приблизительно 90% от всего парка машин, и приблизительно 55% от установленной мощности. Это определяется рядом преимуществ АД в сравнении с двигателями постоянного тока: простота конструкции и надежность в эксплуатации из-за отсутствия коллектора; меньшие габариты, вес и стоимость; меньшая затрата цветных металлов; лучшие энергетические показатели, и др.

Появление надежных и экономичных преобразователей частоты с ШИМ на полностью управляемых полупроводниковых приборах открывает широкие возможности для замены регулируемого электропривода постоянного тока частотно-регулируемым асинхронным приводом.

Хотя техническая реализация САУ электроприводами с векторным управлением значительно сложнее, чем со скалярным, тенденция развития частотно-регулируемых приводов такова, что область их применения будет расширяться. Возможность регулирования мгновенных значений потокосцеплений и момента двигателя позволяет реализовать быстродействующие приводы с высокой точностью регулирования координат в установившемся и переходном режимах. Существенное отличие скалярного и векторного управления заключается в том, что векторное управление позволяет контролировать регулируемые переменные (из ортогональные проекции) также в переходных режимах, и тем самым формировать заданное значение и положение обобщенного вектора и, следовательно, желаемое качество электромеханических переходных процессов. Поэтому основной областью применения векторного управления являются электроприводы с напряженными динамическими режимами работы, которые требуют широкий диапазон регулирования скорости и высокого быстродействия с желаемыми показателями качества переходного процесса.

В современном электроприводе переменного тока силовой преобразователь частоты в большинстве случаев выполняется в виде двухзвеньевого преобразователя с неуправляемым выпрямителем на входе и АИН с ШИМ. Это позволяет управлять частотой и амплитудой напряжения в одном инверторе и наиболее просто реализовать необходимые законы управления асинхронным электроприводом. Для обмена энергией между двигателем и сетью параллельно инвертору включается конденсатор. Но такое построение силовой схемы преобразователя не позволяет реализовать рекуперацию энергии в сеть. Излишняя энергия генераторного торможения рассеивается в виде теплоты на разрядном сопротивлении, которое включено параллельно емкости на входе инвертора, что приводит к большим потерям энергии в электроприводах с напряженными динамическими режимами и большими инерционными массами.

Для реализации рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть приходится усложнять силовую схему, заменяя входной выпрямитель инвертором с двусторонней проводимостью, такой же конфигурации как и

инвертор для питания двигателя. Однако и в этом случае через двустороннюю циркуляцию энергии между сетью и двигателем и пиковых нагрузках возрастают потери в подводящих кабелях, входном инверторе и трансформаторе.

Очень перспективным направлением повышения энергетической эффективности электромеханических систем есть питание регулируемых приводов на основе АИН от общих шин постоянного тока с емкостным накопителем.

Применение группового питания от общих шин постоянного тока и емкостного накопителя позволяет реализовать обмен энергии между отдельными приводами или группой приводов, которые работают в разных режимах. Вследствие этого нужна значительно меньшая емкость накопителя для аккумуляции энергии в режимах генераторного торможения, чтобы исключить циркуляцию энергии от двигателя в сеть переменного тока. Это также уменьшает потери и исключает негативное влияние пиковых нагрузок на питательную сеть. Более того, применение на входе инвертора с двусторонней проводимостью и емкостного фильтра, которые создают силовой (параллельный) активный компенсатор (САУ), позволяет:

- гибко управлять потоками энергии;
- уменьшить потери электроэнергии во входящих преобразователях и линии;
- минимизировать высшие гармоники и достичь практически синусоидального тока сети, исключив при этом их негативное влияние на энергосистему и другие потребители;
- кратковременно компенсировать провалы напряжения при коротких замыканиях, используя накопленную энергию;
- перераспределять, в случае необходимости, активную мощность между фазами, и обеспечить симметричность нагрузки.



## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Реферат .....	6
Введение .....	9
1 Структура частотно-регулируемых приводов .....	10
2 Формирование управляющего параметра ПАФ для компенсации реактивной мощности и мощности искажения .....	14
3 Формирование функции управления ПАФ в режиме компенсации мощности асимметрии .....	21
4 Энергетические характеристики силовых активных компенсаторов в системах группового питания электроприводов.....	36
4.1 Энергетические свойства и режимы работы силовых активных компенсаторов.....	36
4.2 Предельные характеристики параллельных силовых активных компенсаторов с релейным управлением.....	44
5 Охрана труда и безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	56
5.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов в рабочей зоне.....	56
5.2 Расчетная часть.....	57
5.2.1 Расчет искусственного освещения.....	57
5.3 Инженерно технические мероприятия по охране труда.....	60
5.3.1 Разработка мероприятий по ОТ.....	60
5.3.2 Пожарная профилактика .....	60
5.3.3 Безопасность при чрезвычайных ситуациях.....	62
Литература .....	65

## 1. СТРУКТУРА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ

В частотно-регулируемом асинхронном электроприводе, чтобы избежать усложнения входной цепи, силовой преобразователь в большинстве случаев состоит из АИН с ШИМ и неуправляемого диодного выпрямителя. Последний шунтируется конденсаторной батареей для обеспечения двухстороннего обмена энергией между двигателем и входным звеном постоянного тока. Такое построение силовой схемы позволяет управлять амплитудой и частотой выходного напряжения в одном инверторе и избежать усложнения входной цепи.

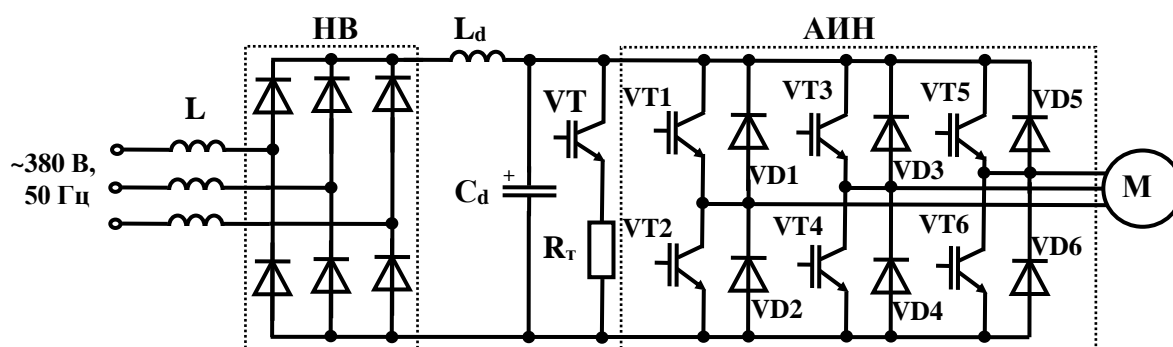


Рис.1 Частотно-регулируемый электропривод с диодным выпрямителем

Однако при этом можно реализовать лишь инверторное торможение без рекуперации энергии в сеть, что приводит к дополнительным потерям в разрядных резисторах в электроприводах с напряжёнными динамическими режимами и большими инерционными насосами, а также в подъёмно-транспортных установках. Реализация рекуперативного торможения требует усложнения силовой схемы: параллельно неуправляемому выпрямителю подключать управляемый (рекуператор) с предельными углами регулирования или вместо диодного выпрямителя использовать преобразователь с двухсторонней проводимостью на основе АИН с ШИМ. При этом образуется симметричная схема силовой цепи с двумя управляемыми преобразователями, выполненными по идентичной схеме с использованием принципов ШИМ для

регулирования напряжения. Это обеспечивает циркуляцию энергии в двух направлениях: от сети к двигателю и наоборот. В двигательном режиме работы

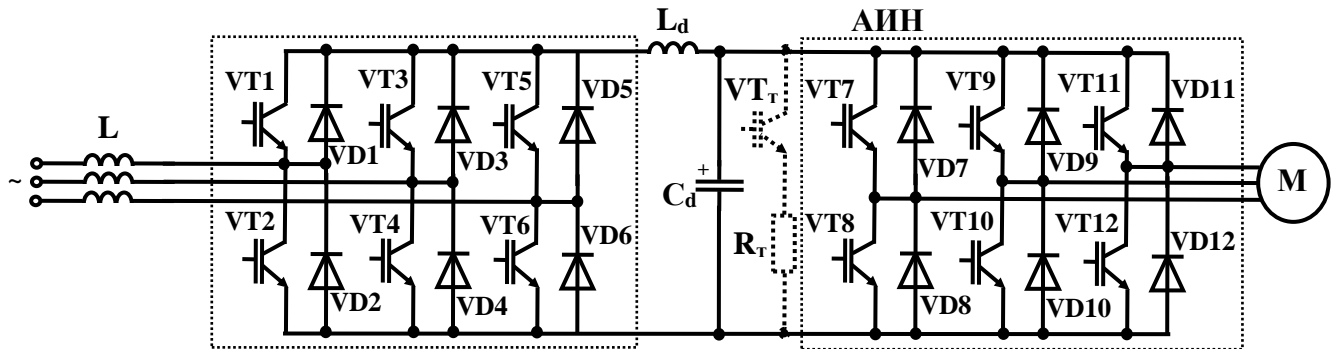


Рис.2 Частотно-регулируемый электропривод с активным выпрямителем

первый преобразователь выполняет функции управляемого выпрямителя, а второй – автономного инвертора напряжения. При торможении привода режим работы преобразователей изменяется на противоположный. Однако и в этом случае, вследствие двухсторонней циркуляции энергии между электродвигателем и сетью, возникают дополнительные потери в линии, трансформаторе и входном преобразователе.

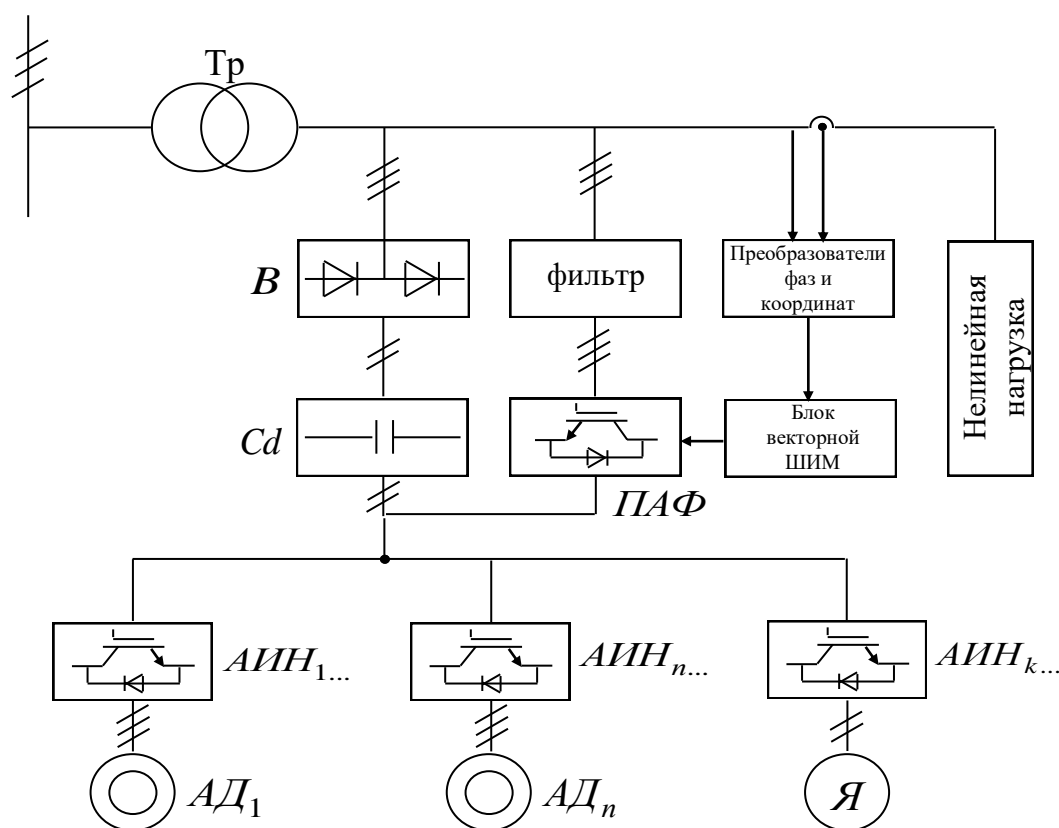


Рис.3. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов

Одним из направлений устранения отмеченных недостатков и решения проблемы нормализации качества электроэнергии на основе современных полностью управляемых преобразователей с ШИМ является применение группового питания электроприводов от общих шин постоянного тока с емкостными накопителями энергии [2-4].

В схеме рис. 1 исключается двухсторонняя циркуляция энергии между сетью и двигателями, так как энергия торможения одного или группы электродвигателей передаётся (минуя сеть) через емкостной накопитель на другие электропривода двигательного режима. Групповое питание электроприводов с емкостными накопителями обладает также рядом других преимуществ: гибкая конфигурация силовых блоков и модулей управления и их унификация; снижаются динамические нагрузки (частично воспринимаются емкостным накопителем) и потери энергии в силовых элементах на входе системы. Существенно, что запасённая энергия в емкостном накопителе

повторно используется для управления качеством электроэнергии с помощью обращённого АИН с ШИМ, который совместно с системой релейно-векторного управления, образуют так называемый параллельный (силовой) активный фильтр (ПАФ). Это позволяет с высоким быстродействием и точностью компенсировать набросы реактивной мощности сдвига, компенсировать мощность искажения и обеспечить практически синусоидальный ток даже при сложном характере амплитудного спектра гармоник, симметризовать нагрузку и др. Проблема стабилизации напряжения в сетях с небольшими токами короткого замыкания может быть также решена с помощью ПАФ варьированием коэффициента мощности относительно требуемого значения.

Таким образом, система группового питания приводов от общих шин постоянного тока с емкостным накопителем энергии, дополненная ПАФ, позволяет реализовать независимое и отдельное управление движением электроприводов и качеством электроэнергии, что непосредственно связано с проблемой энергосбережения.

Применение ПАФ для управления качеством электроэнергии обуславливает необходимость развития методов и средств выделения (идентификации) и непрерывного контроля мгновенных значений неактивных составляющих полной (кажущейся) мощности, подлежащих компенсации. Формирование управляющего параметра для оптимизации энергетических процессов и минимизации потерь в нелинейных и несимметричных системах с реактивной нагрузкой обуславливает необходимость оперировать с мгновенной мощностью, которая однозначно характеризует энергообменные процессы, происходящие в нелинейных системах [5]. Эта задача может быть решена на основе метода  $I_x, I_y (I_d, I_q)$  теории мгновенной мощности [6] с использованием обобщённых (результатирующих) векторов тока и напряжения сети в синхронно вращающейся системе координат  $x, y$ , ориентированной по вектору напряжения сети [7]. При этом реальные трёхфазные переменные напряжений и токов представляются уже соответствующими им постоянными

величинами, что упрощает реализацию и синтез регуляторов САУ качеством электроэнергии, работающих на постоянном, а не переменном токе.

### 3. ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПАФ В РЕЖИМЕ КОМПЕНСАЦИИ МОЩНОСТИ АСИММЕТРИИ

Мгновенные значения составляющих  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  можно рассматривать как вещественные составляющие комплексных временных векторов,  $i_\alpha$  и  $i_\beta$ , определяемые подстановкой в (2.4) и (2.5) комплексов мгновенных значений фазных токов [7]:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3} \cdot \left( i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right); \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_B - i_C). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Подставляя в (3.1) значения фазных токов, выраженные через симметричные составляющие прямой  $I_1$ , обратной  $I_2$  и нулевой  $I_0$  последовательностей с помощью известных соотношений :

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{3} \cdot \left( i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \alpha^2 \cdot i_C \right); \\ i_2 &= \frac{1}{3} \cdot \left( i_A + \alpha^2 \cdot i_B + \bar{\alpha} \cdot i_C \right); \\ i_0 &= \frac{1}{3} \cdot (i_A + i_B + i_C), \end{aligned} \quad (3.2)$$

получим зависимость  $i_\alpha$  и  $i_\beta$  от симметричных составляющих:

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot \left( i_1 + i_2 + i_0 - \frac{\alpha^2 i_1 + \bar{\alpha} i_2 + i_0 + \bar{\alpha} i_1 + \alpha^2 i_2 + i_0}{2} \right) = i_1 + i_2; \quad (3.3)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( \alpha^2 i_1 + \bar{\alpha} i_2 + i_0 - \bar{\alpha} i_1 - \alpha^2 i_2 - i_0 \right) = -j \cdot (i_1 - i_2), \quad (3.4)$$

так как  $\bar{\alpha} = -0,5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ ;  $\alpha^2 = -0,5 - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ .

Согласно (3.4)

$$j i_\beta = -j^2 i_1 + j^2 i_2 = i_1 - i_2; \quad (3.5)$$

С учётом (3.3) и (3.5) имеем:

$$i_\alpha + j \cdot i_\beta = i_1 + i_2 + i_1 - i_2 = 2 \cdot i_1; \quad i_\alpha - j \cdot i_\beta = 2 \cdot i_2,$$

откуда

$$i_1 = \frac{i_\alpha + j i_\beta}{2}; \quad i_2 = \frac{i_\alpha - j i_\beta}{2}. \quad (3.6)$$

Согласно второго уравнения системы (3.2), сопряжённый вектор обратной последовательности:

$$I_2^* = \frac{1}{3} \cdot \left( I_A^* + \bar{\alpha} I_B^* + \bar{\alpha}^2 I_C^* \right). \quad (3.7)$$

При этом

$$i_1 + i_2^* = \frac{1}{3} \cdot \left[ \left( i_A + i_A^* \right) + \bar{\alpha} \left( i_B + i_B^* \right) + \bar{\alpha}^2 \left( i_C + i_C^* \right) \right] = \bar{I}, \quad (3.8)$$

так как для любой фазы, например, А

$$\operatorname{Re} \left( i_A + i_A^* \right) = 2 \cdot \operatorname{Re} \left( i_A \right) = 2 \cdot i_A.$$

Таким образом, в случае несимметричной системы фазных токов, результирующий вектор тока сети  $\bar{I}_S$  образуется как сложением результирующих векторов токов прямой и обратной последовательности

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{S2}, \quad (3.9)$$

так и согласно (3.8) комплексов прямой последовательности  $i_1$  тока фазы А и сопряжённого с обратной последовательностью  $i_2^*$  того же тока. Из приведенных выражений (3.8) и (3.9) следует тождественность временных векторов  $i_1$  и  $i_2^*$  пространственным обобщённым векторам  $\bar{I}_{S1}$  и  $\bar{I}_{S2}$ , т.е.  $i_1 = \bar{I}_{S1}$ ,  $i_2^* = \bar{I}_{S2}$ . Поэтому, для графического построения обобщённого вектора сети  $\bar{I}_S$  строятся, согласно (3.2), векторы симметричных составляющих  $i_1$  и  $i_2$  (рис. 6). Оба эти временные векторы вращаются в положительном направлении с угловой скоростью  $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ . Затем строится вектор  $i_2^*$ , сопряжённый с  $i_2$ , который, как уже отмечалось, соответствует пространственному результирующему вектору  $\bar{I}_{S2}$  тока сети обратной последовательности и вращается со скоростью  $\omega_1$  в отрицательном направлении. При этом конец результирующего вектора  $\bar{I}_S = \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{S2} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2^*$  описывает эллипс. На рис. 6



построены также по (3.3) и (3.4) комплексные временные векторы  $\dot{I}_\alpha$  и  $\dot{I}_\beta$ , проекции которых на ось  $\alpha$  дают мгновенные значения токов  $I_\alpha$  и  $I_\beta$ .

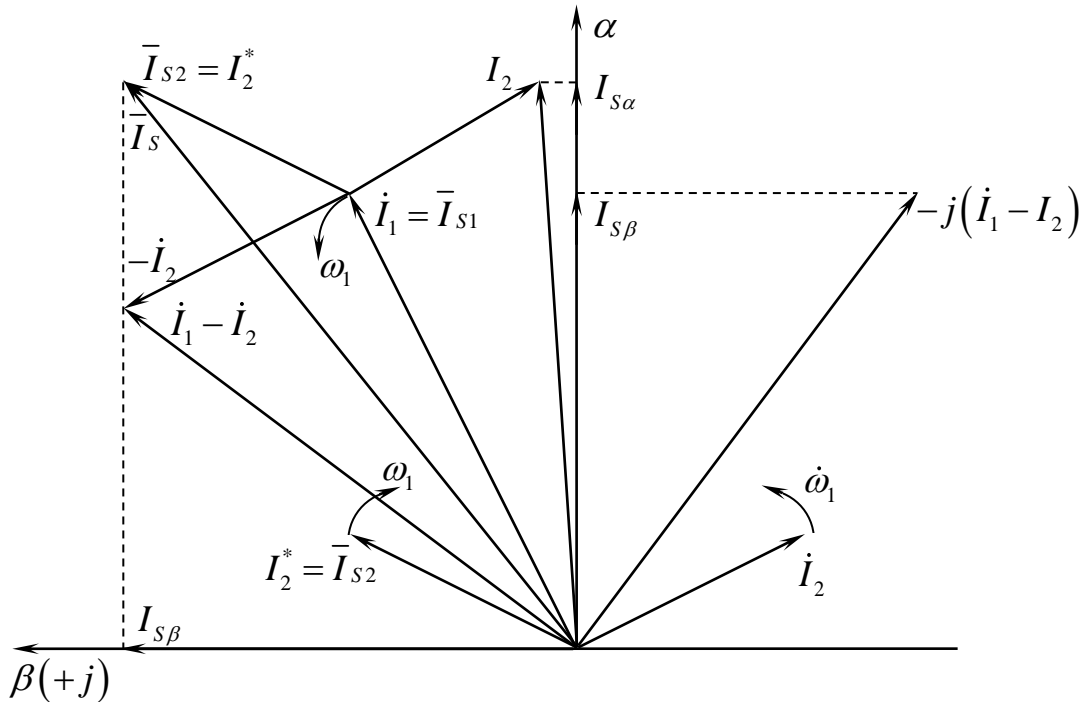


Рис. 6. Построение обобщённого (результатирующего) вектора тока сети  $\bar{I}_S$  при несимметричной нагрузке в виде  $\bar{I}_S = \dot{I}_1 + I_2^*$  или  $\bar{I}_S = \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{S2}$

При отсутствии нулевой составляющей тока мгновенное значение мощности несимметричной системы определяется как скалярное произведение обобщённого вектора напряжения  $\bar{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2^*$  на сопряжённый вектор тока сети  $I = \dot{I}_1^* + \dot{I}_2$  [3].

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U} \cdot \bar{I}^*] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[(\dot{U}_1 + \dot{U}_2^*) \cdot (\dot{I}_1^* + \dot{I}_2)] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* + \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_2^* \cdot \dot{I}_1^* + \dot{U}_2^* \cdot \dot{I}_2], \quad (3.10)$$

Так как

$$\operatorname{Re}[\dot{U}_2^* \dot{I}_2] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{I}_2^*]; \quad \operatorname{Re}[\dot{U}_2^* \dot{I}_1^*] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{I}_1],$$

то

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* + \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2^* + \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_2], \quad (3.11)$$

В приведенном выражении составляющие

$$\frac{3}{2}\operatorname{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_1^*] = P_1, \quad \frac{3}{2}\operatorname{Re}[\dot{U}_2\dot{I}_2^*] = P_2 \quad (3.12)$$

соответствуют средней мощности прямой и обратной последовательностей, а составляющая

$$\frac{3}{2}\operatorname{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_2 + \dot{U}_2\dot{I}_1] \quad (3.13)$$

представляет собой переменную мощность, пульсирующую с двойной частотой около нулевого среднего значения. Амплитуду этой нулевой составляющей называют мощностью несимметрии.

При наличии тока нулевой последовательности, обобщённый пространственный вектор тока, определяемый в соответствии с (2.1) как

$$\bar{I} = \frac{2}{3}[(i_A + i_0) + \bar{\alpha}(i_B + i_0) + \bar{\alpha}^2(i_C + i_0)] = \frac{2}{3}(i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \bar{\alpha}^2 \cdot i_C), \quad (3.14)$$

не зависит от  $i_0$ , так как  $i_0(1 + \bar{\alpha} + \bar{\alpha}^2) = 0$ .

Следовательно, нулевую составляющую тока нужно учитывать отдельно при расчете мощности асимметричной системы с помощью обобщённых векторов согласно (3.10).

Из изложенного следует, что мгновенная мощность несимметричной трёхфазной системы без нулевой последовательности содержит постоянную составляющую

$$P = \frac{3}{2}\operatorname{Re}(\dot{U}_1\dot{I}_1^*) + \frac{3}{2}\operatorname{Re}(\dot{U}_2\dot{I}_2^*), \quad (3.15)$$

на которую накладывается пульсирующая с двойной частотой переменная составляющая (3.13) (рис. 7).

$$p_{\sim} = \frac{3}{2}\operatorname{Re}[\dot{U}_1\dot{I}_2 + \dot{U}_2\dot{I}_1] = 3U_1I_2 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_2) + 3U_2I_1 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_1). \quad (3.16)$$

Таким образом, в трёхфазных системах с изолированной нейтралью, где отсутствуют токи нулевой последовательности, симметрирование нагрузки адекватно компенсации пульсирующей с двойной частотой мощности [10,11].

Безынерционное измерение и непрерывный контроль мгновенных значений переменной составляющей мощности двойной частоты в координатах

А, В, С требует применения сложных измерительных устройств [12], что значительно затрудняет управление ПАФ для симметрирования нагрузки. Погрешности, возникающие при этом, становятся причиной неполного симметрирования нагрузки и необоснованной перегрузки АИН. Следовательно, использование обобщённых векторов тока и напряжения в синхронно вращающейся системе координат позволяет значительно упростить процедуру формирования обобщённого параметра управления для компенсации как отдельных так и всех неактивных составляющих полной мощности в нелинейных и несимметричных системах с реактивной нагрузкой.

Таким образом, в линейных симметричных системах ортогональные составляющие  $I_x$  и  $I_y$  в уравнениях (3.10), пропорциональные активной и реактивной мощности, содержат только постоянные составляющие при любом фазовом сдвиге между напряжением и током. В нелинейных и несимметричных системах в обоих ортогональных составляющих появляются переменные составляющие. При этом перемещённые составляющие двойной частоты пропорциональны мощности асимметрии, а более высоких частот – мощности искажения.

На основании изложенного и с учётом [13] на рис. 8 представлена функциональная схема замкнутой САР для компенсации мощности несимметрии в электроприводах с общими питающими шинами постоянного тока и накопителями энергии с помощью конденсаторных батарей. В приведенной схеме преобразователи фаз ПФ1 и ПФ2, реализованные на основании выражений (2.4, 2.5), осуществляют переход от трёхфазной системы А, В, С к двухфазной  $\alpha, \beta$ .

Преобразователь фаз ПФ3, реализующий зависимость (2.6)

$$i_A = I_\alpha; \quad i_B = -\frac{I_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta; \quad i_C = -\frac{I_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta,$$

предназначен для обратного перехода осей двухфазной системы к трёхфазной.

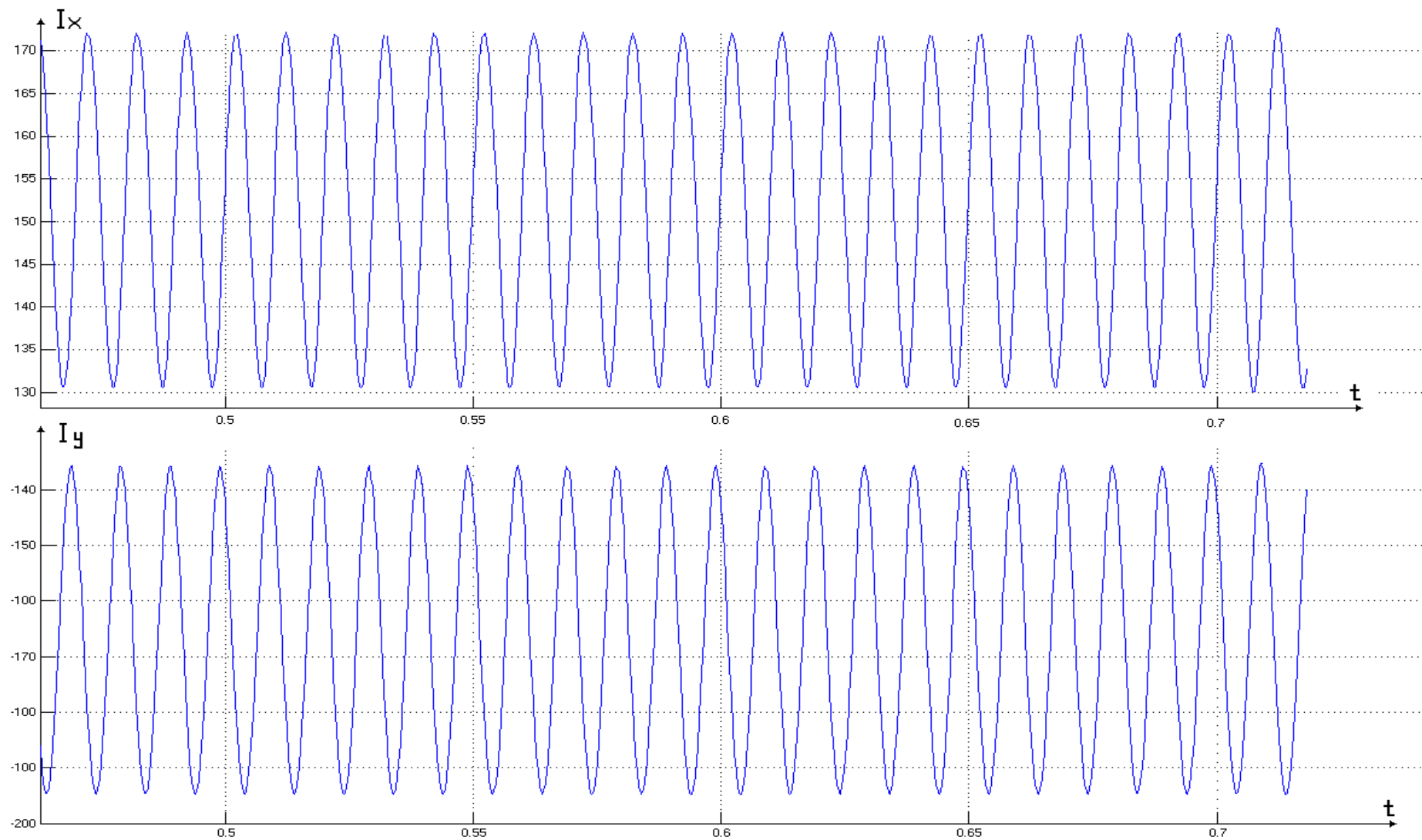


Рис. 7. Ортогональные составляющие  $I_x$ ,  $I_y$  обобщённого вектора тока при несимметричной нагрузке во вращающейся системе координат

Преобразователи координат ПК1 и ПК2, используя зависимости (2.17) и (18), реализует переход осей неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся  $x, y$  и наоборот. Фильтры  $\Phi_2$  и  $\Phi_{\sim}$  выделяют переменную составляющую двойной частоты и более высоких частот из ортогональных составляющих  $I_x$  и  $I_y$  обобщённого вектора тока трёхфазной системы, которые с

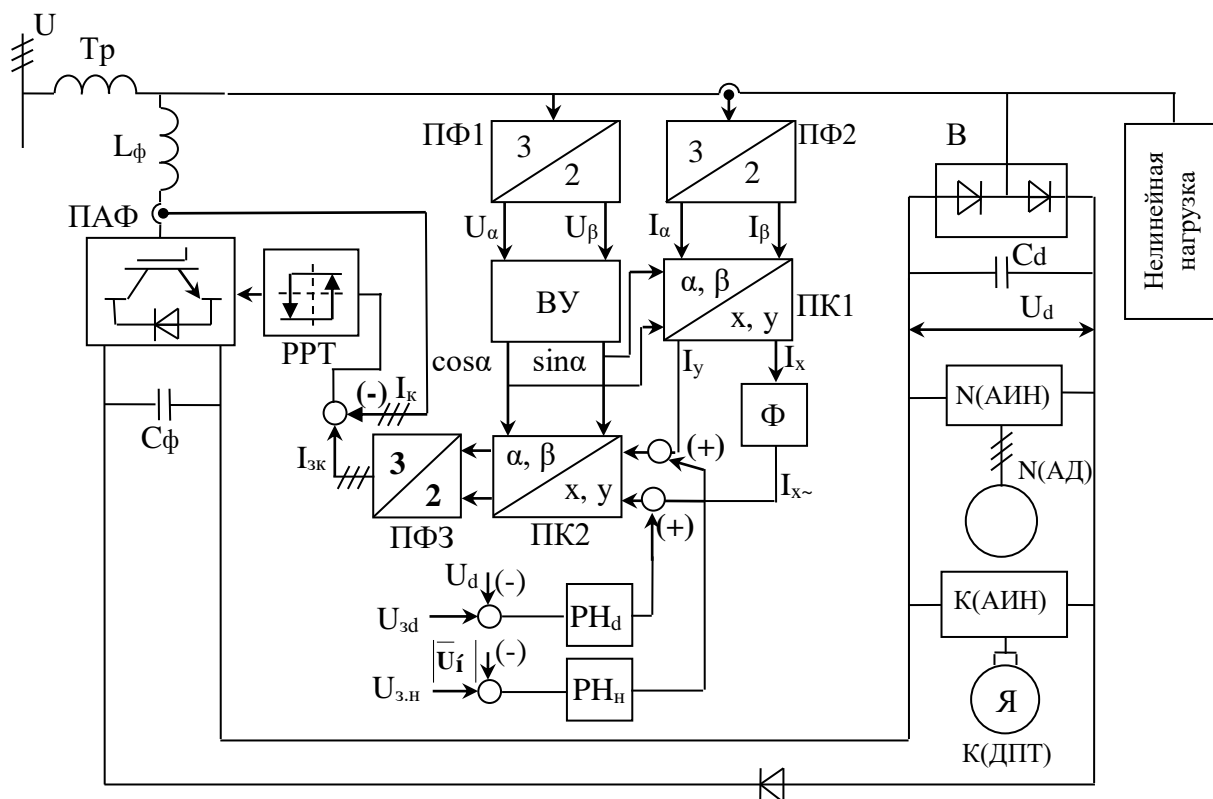


Рис. 8. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями (ПФ, ПК – преобразователи фаз и координат; РРТ – релейный регулятор тока;  $\Phi_2, \Phi_{\sim}$  – фильтры для выделения переменной составляющей двойной частоты ортогональных составляющих результирующего вектора тока нагрузки; В – неуправляемый выпрямитель;  $L_{\phi}$  – фильтр на выходе АИН;  $C_d$  – накопительный конденсатор)

помощью преобразователей координат ПК2 и фаз ПФ3 трансформируются в трёхфазные задающие токи компенсации  $I_{кз}$  и поступают на вход релейных регуляторов тока. Последние, как известно, позволяют с высокой точностью и предельно возможным быстродействием обрабатывать управляющие воздействия, компенсируя неактивную составляющую мощности. При чём, если на вход преобразователя координат ПК2 поступает лишь постоянная

составляющая  $I_y$ , то имеет место компенсация только реактивной мощности сдвига фаз первых гармоник.

На рис. 9 приведены графики тока и напряжения сети, полученные в пакете программ MatLab при отсутствии (а) и наличии (б) системы управления качеством электроэнергии в режиме компенсации только реактивной мощности сдвига. Как видно из рисунка, предлагаемая система практически без запаздывания компенсирует реактивную мощность. Это обусловлено наличием релейных регуляторов тока и использованием в качестве управляющего сигнала непосредственно неактивной составляющей тока, подлежащего компенсации. В случае подачи на вход ПК2 только переменных составляющих без компонент двойной частоты, имеет место компенсация только мощности искажения (подавление гармоник тока).

На рис. 10 приведены результаты компьютерного моделирования компенсации пятой гармоники, на рис. 11 – седьмой, а на рис. 12 – пятой и седьмой.

При подаче на вход ПК2 указанных выше переменных компонент ортогональных составляющих  $I_x$  и  $I_y$  и постоянной составляющей  $I_y$  реализуется компенсация реактивной мощности сдвига и мощности искажения (рис. 13).

Режим симметрирования нагрузки с помощью ПАФ реализуется при подаче на вход ПК2 только переменных составляющих  $I_x$  и  $I_y$  двойной частоты. Результаты компьютерного моделирования для этого режима приведены на рис. 14. При работе ПАФ в режиме симметрирования нагрузки происходит передача энергии из менее загруженных фаз в фазу с большей нагрузкой. При этом энергия из менее загруженных фаз передаётся вначале в звено постоянного тока с емкостным накопителем энергии, а затем из этого звена в более загруженную фазу.

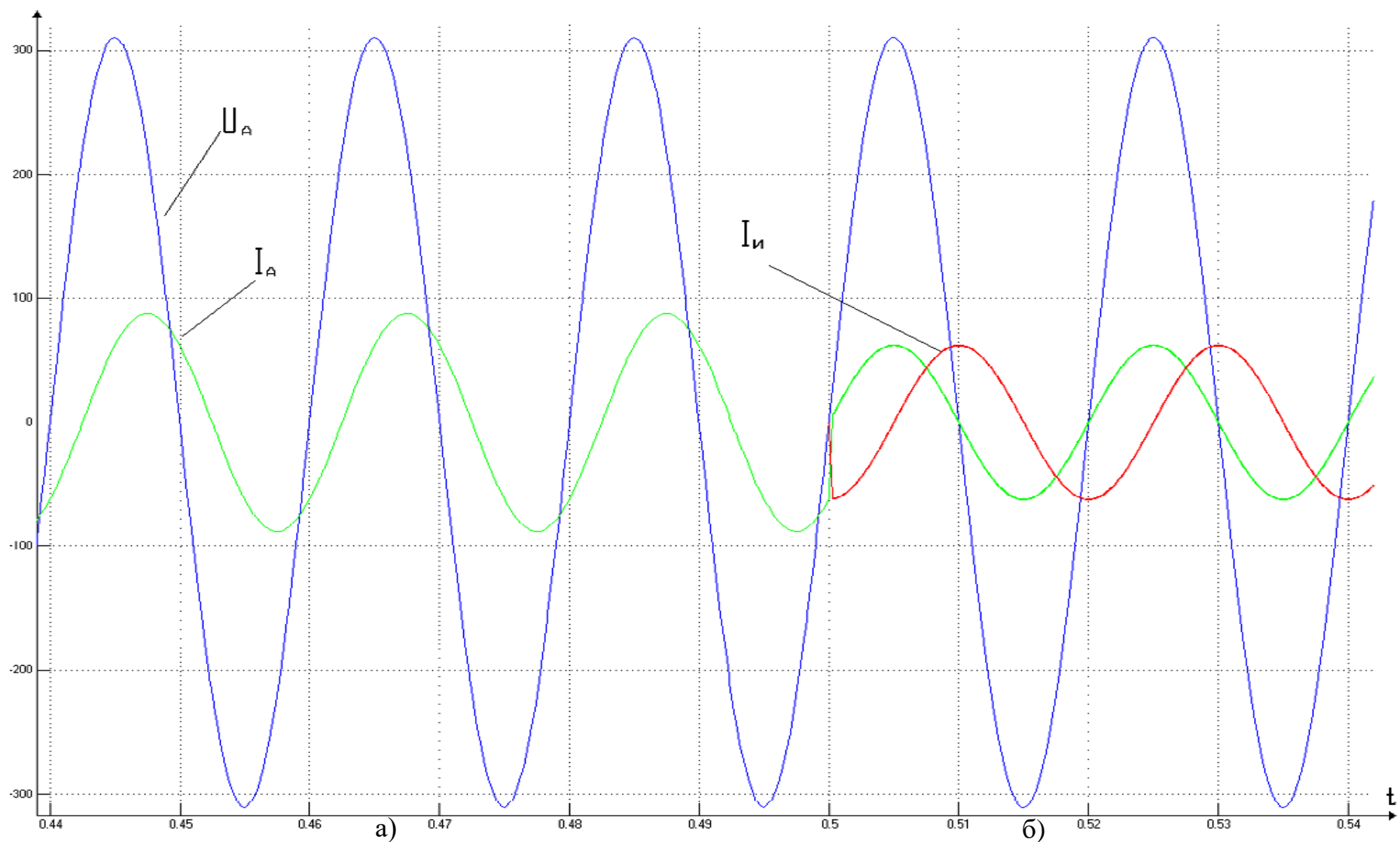


Рис. 9. Графики напряжения ( $U_c$ ) и тока сети ( $I_c$ ) и тока инвертора ( $I_{и}$ ) в режиме компенсации реактивной мощности с помощью ПАФ

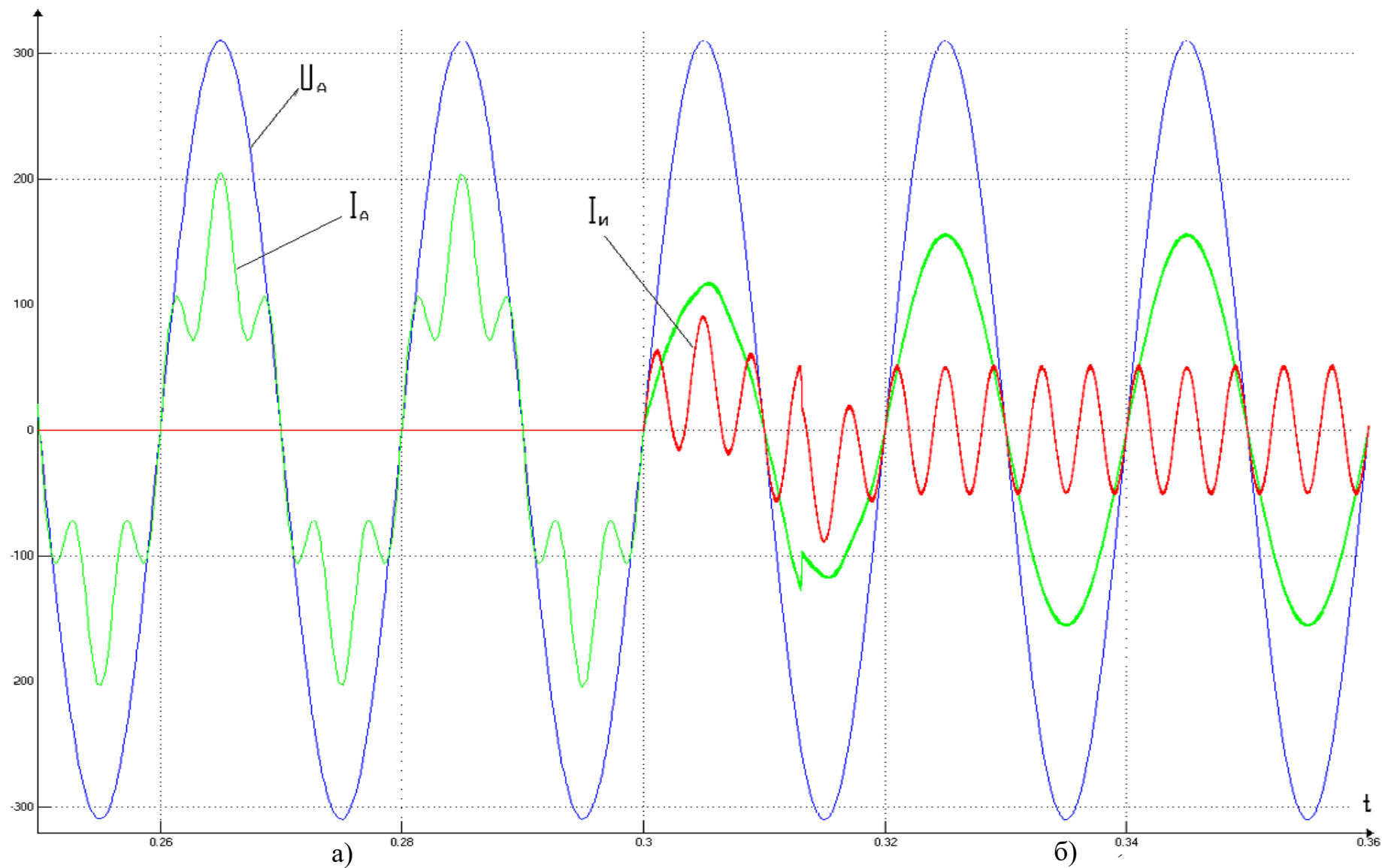


Рис. 10. Графики напряжения ( $U_C$ ), тока сети ( $I_C$ ) и тока инвертора ПАФ в режиме подавления 5 гармоника (компенсация мощности искажения)



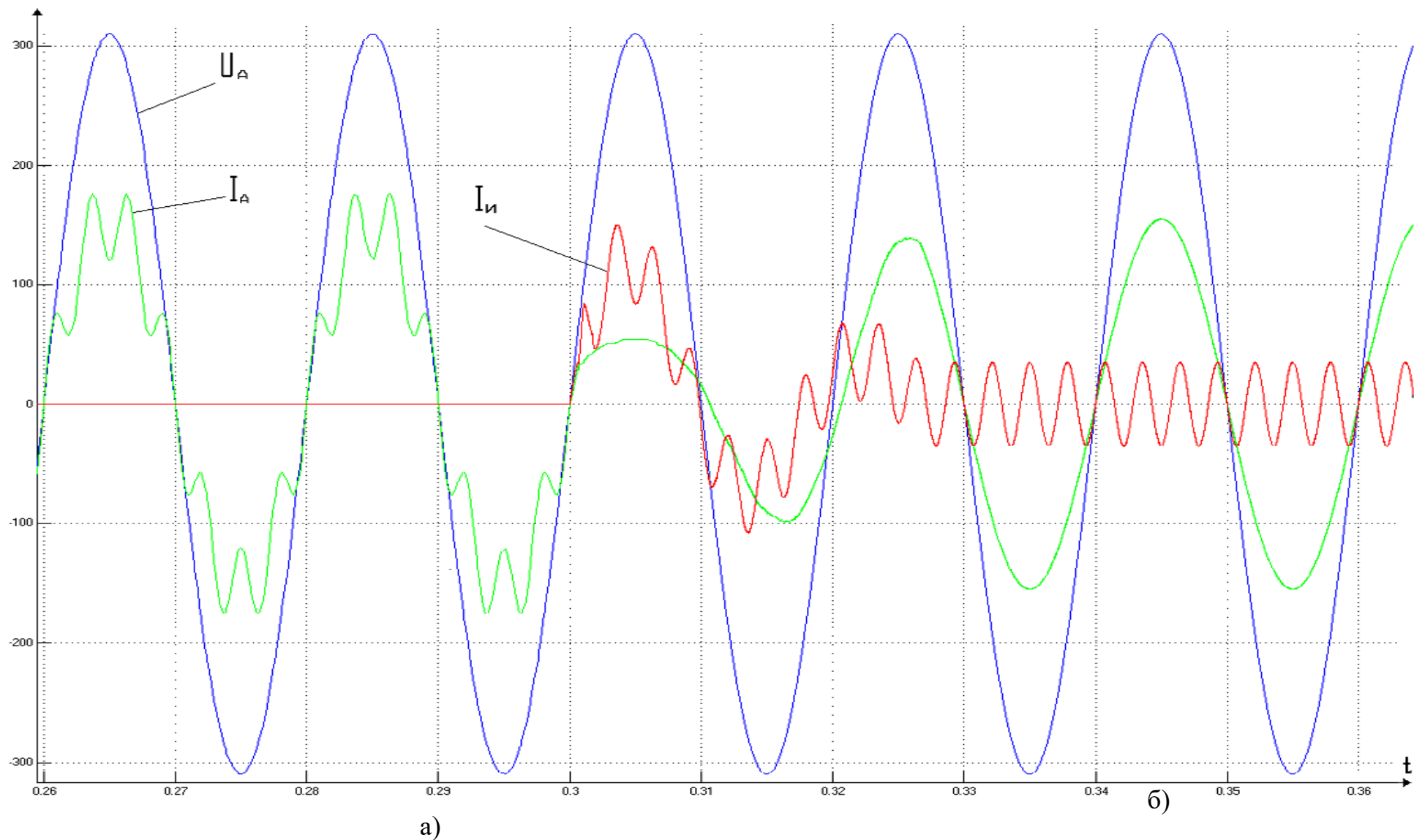


Рис. 11. Графики напряжения ( $U_c$ ), тока сети ( $I_c$ ) и тока инвертора ПАФ в режиме подавления 7 гармоник  
(компенсация мощности искажения)

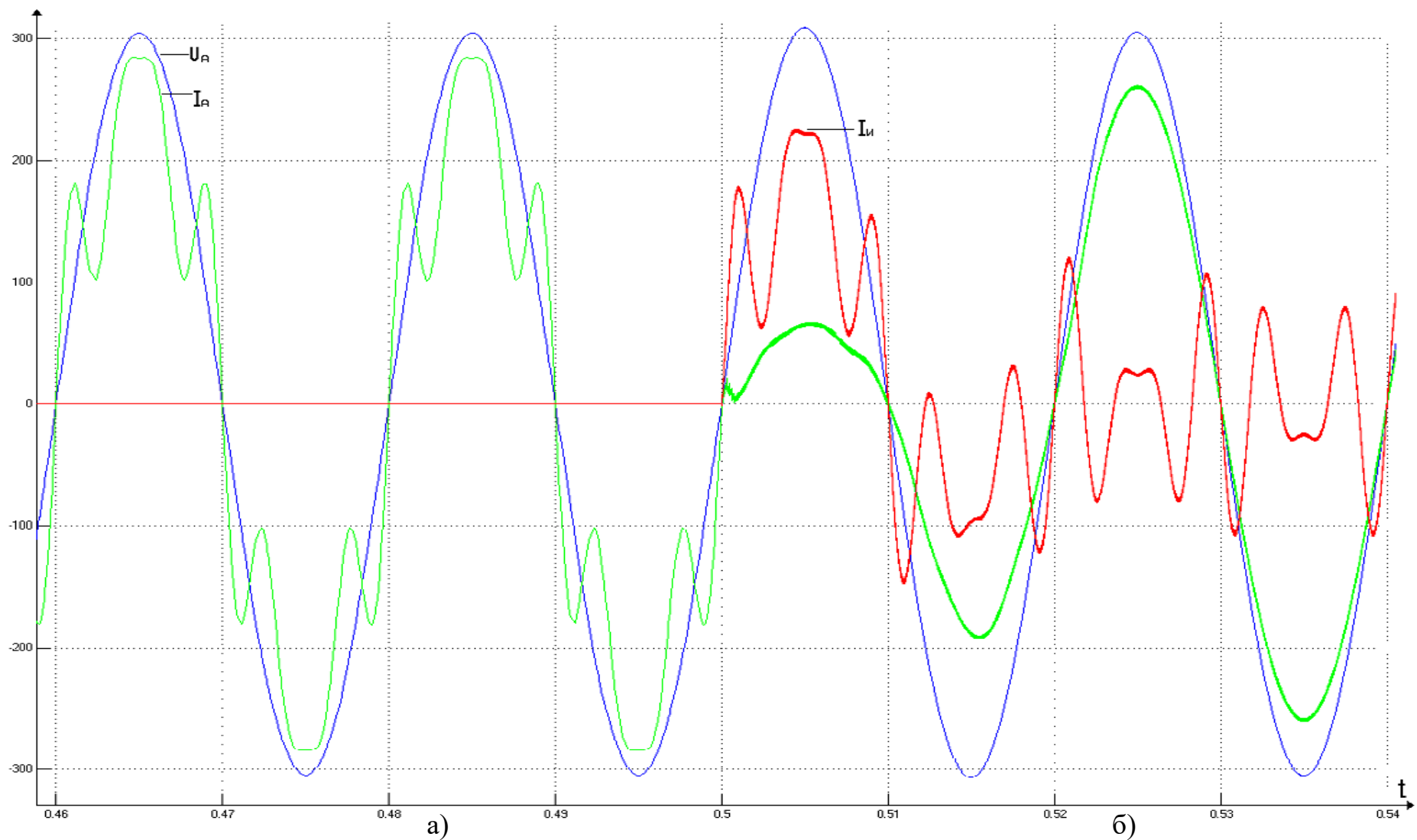


Рис. 12. Графики напряжения ( $U_c$ ), тока сети ( $I_c$ ) и тока инвертора ПАФ в режиме подавления 5 и 7 гармоник (компенсация мощности искажения)

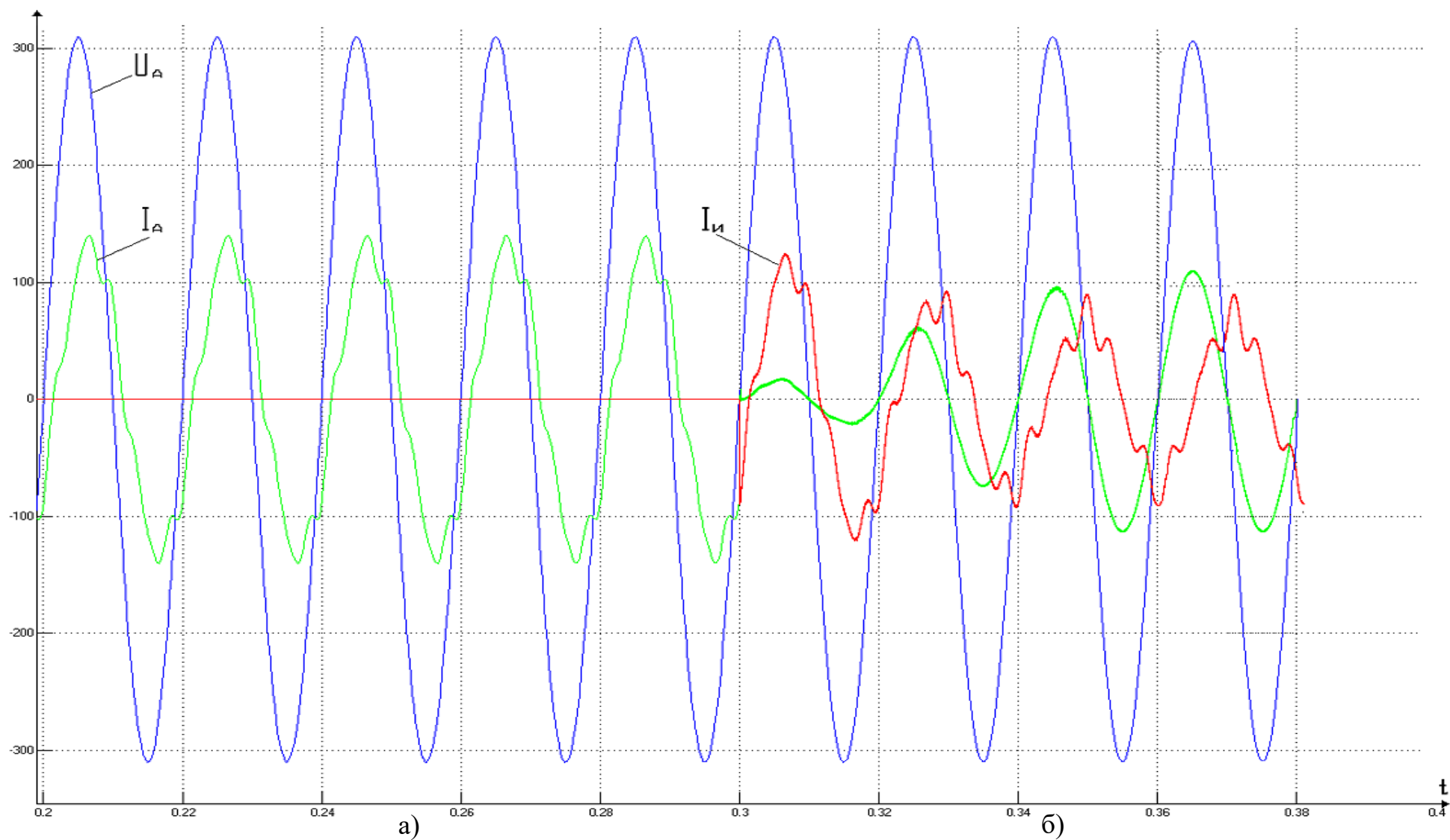


Рис. 13. Графики напряжения ( $U_c$ ), тока сети ( $I_c$ ) и тока инвертора ПАФ в режиме подавления 5 и 7 гармоник (компенсация мощности искажения) при наличии активно-индуктивной нагрузки

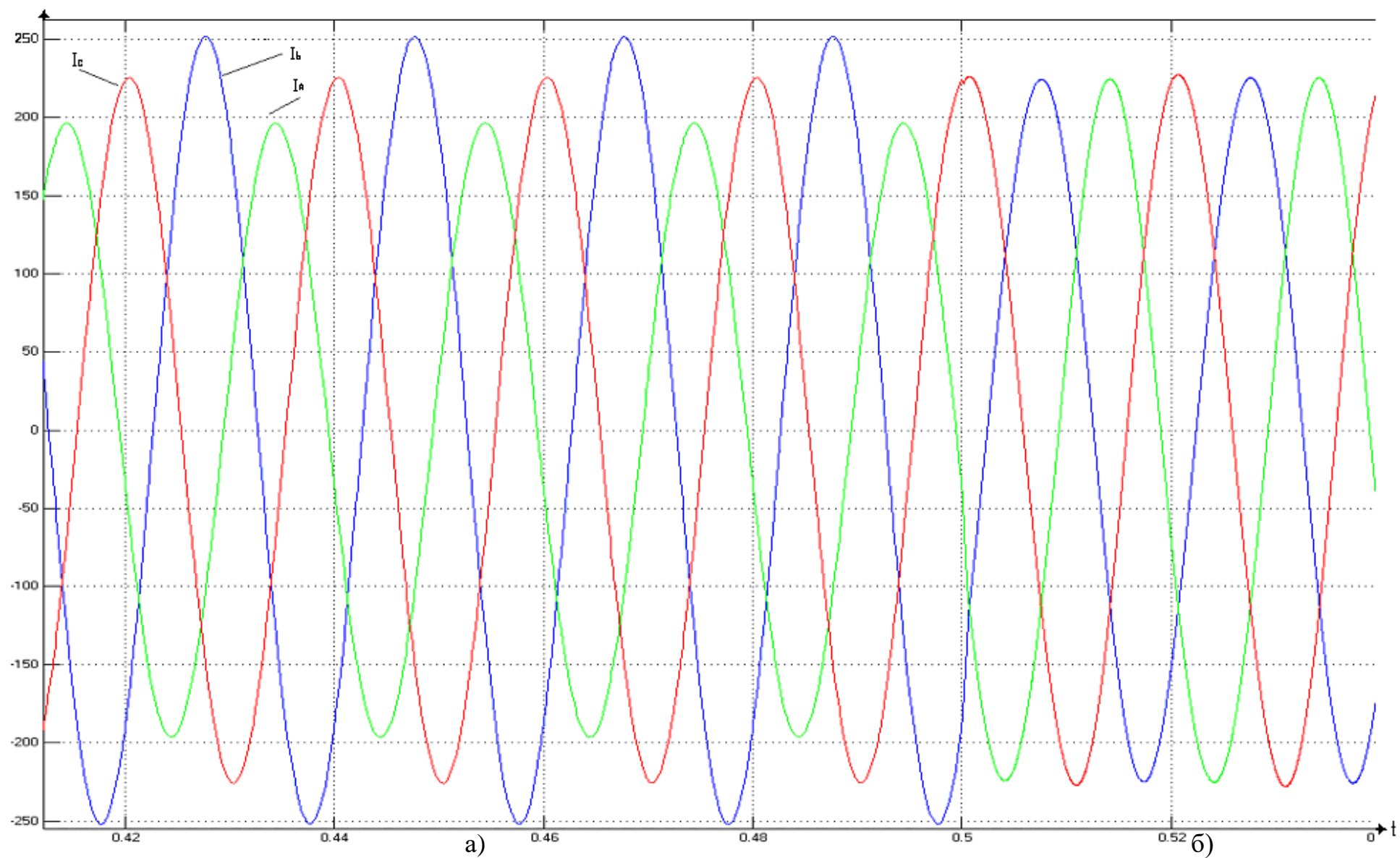


Рис. 14. Токи трёхфазной нагрузки при отсутствии (а) и наличии (б) устройства симметрирования на основе ПАФ

Как показывают результаты компьютерного моделирования режимов работы ПАФ с релейными регуляторами тока и формированием параметра управления на базе теории мгновенной мощности, использование обобщённых векторов тока и напряжения позволяет с предельно возможным быстродействием компенсировать как отдельные, так и все неактивные составляющие полной мощности в нелинейных и несимметричных системах с резкопеременной реактивной нагрузкой. В результате этого резко уменьшаются потери энергии в линии и входных силовых устройствах, повышается эффективность передачи и потребления электроэнергии, а также электромагнитная совместимость потребителей, связанных общей сетью.

Для стабилизации напряжения на нагрузке используется внешний контур регулирования напряжения с П- или ПИ-регулятором (рис. 8), в функции выходного сигнала которого происходит регулирование постоянной составляющей ортогональной компоненты  $I_y$  обобщённого вектора тока. При этом варьируется характер (индуктивный или ёмкостной) реактивной составляющей тока, а коэффициент мощности изменяется относительно выбранного оптимального значения. Поскольку в случае ёмкостного характера реактивного тока напряжение на нагрузке может превзойти напряжение источника, то указанный выше способ регулирования постоянной составляющей  $I_y$  позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке.

Для стабилизации напряжения  $U_d$  в звене постоянного тока применен также внешний контур с регулятором напряжения  $PHd$  (рис. 8). Если энергия рекуперативного торможения группы приводов превышает потребляемую двигателями двигательного режима, то напряжение в звене постоянного тока может превысить допустимое. При этом на выходе  $PHd$  появится сигнал, который воздействуя на компоненту  $I_x$ , пропорциональную активной мощности, переводит АИН в режим компенсации активно-реактивной мощности и энергия возвращается в сеть.

## 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ АКТИВНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ В СИСТЕМАХ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

### 4.1 Энергетические свойства и режимы работы силовых активных компенсаторов

Как уже отмечалось, одним из направлений энергосбережения средствами промышленного электропривода и повышения их электромагнитной совместимости является применение систем группового питания электроприводов с емкостными накопителями, снабженных силовыми активными компенсаторами (САК) на основе АИН с ШИМ, которые уже давно используются в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе. Регулируя величину и фазу входного напряжения АИН методом высокочастотной ШИМ с использованием обобщенных (пространственных) векторов тока и напряжения и теории мгновенной мощности для формирования параметра управления можно с высокой точностью и быстродействием компенсировать как все неактивные составляющие полной мощности (сдвига, искажения, несимметрии), так и отдельные составляющие. Однако энергетические характеристики и компенсирующие свойства САК зависят от напряжения в звене постоянного тока.

В системах группового питания электроприводов от общих силовых шин постоянного тока накопительные конденсаторы  $C_d$  (рис. 15) позволяют аккумулировать энергию торможения одного или группы двигателей и по цепи постоянного тока (минуя сеть и входной преобразователь) передать другим двигателям, работающим режиме потребления энергии.

При этом накопленная энергия в звене постоянного тока повторно используется также для управления качеством электроэнергии с помощью САК, включенного параллельно диодному выпрямителю (В).

Энергетические характеристики и режимы работы САК можно

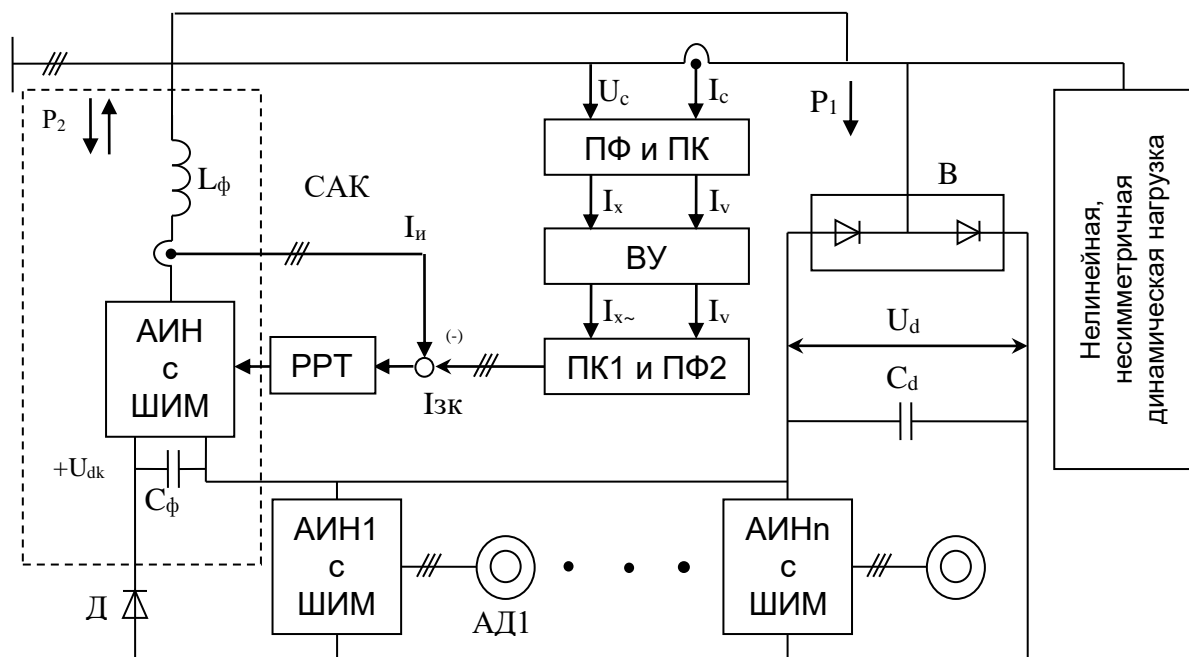


Рис. 15. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с диодным выпрямителем (В) и емкостным накопителем (Cd)

проанализировать с помощью расчетной схемы рис. 16, представленной в обобщенных (результатирующих) векторах напряжения и тока. На рисунке обозначено:  $\overline{U}_S, \overline{U}_u, \overline{I}_K$  – обобщенные вектора напряжений сети и инвертора, тока компенсации, модули которых равны амплитудным значениям;  $X, R$  – суммарное индуктивное и активное сопротивления контура компенсации.

Для компенсации только реактивной мощности сдвига первых гармоник напряжение сети и инвертора должны действовать друг относительно друга встречно. Причем напряжение инвертора должно быть по абсолютной величине больше напряжения сети (рис. 17). При этом, под действием разности напряжений  $\Delta\overline{U}$ , ток компенсации  $I_k$  протекает в противоположных направлениях относительно соответствующих напряжений (по разному ориентированных относительно напряжений): отстает от  $\Delta\overline{U} = \overline{U}_S + \overline{U}_u$  без учета активного сопротивления контура на  $90^\circ$ , и по отношению к напряжению сети является чисто емкостным, а по отношению к напряжению инвертора – индуктивным.

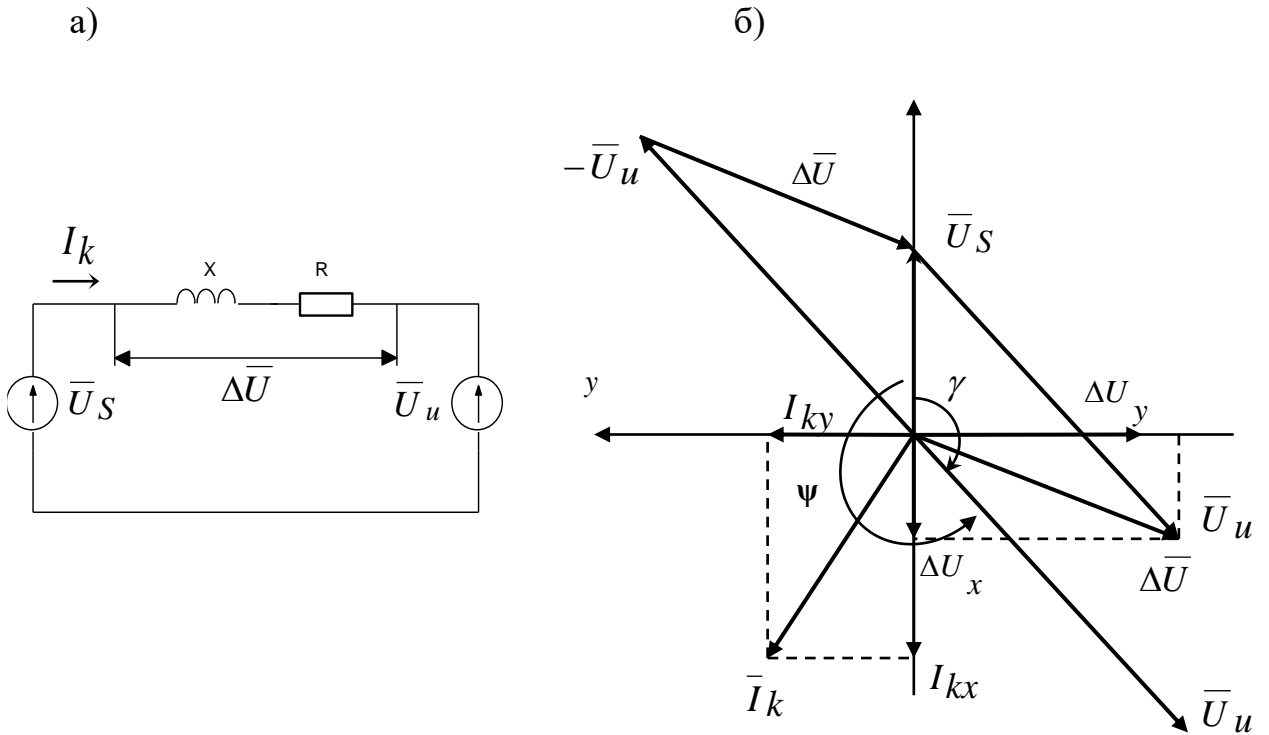


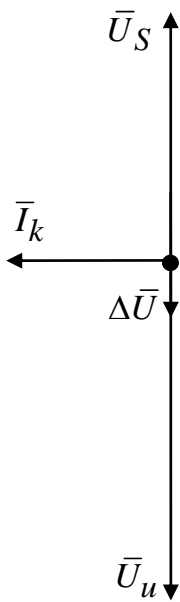
Рис. 16. Эквивалентная расчетная схема САК в обобщенных векторах (а) и векторная диаграмма (б) без учета потерь в контуре компенсации

В общем случае, когда требуется с помощью САК не только компенсировать реактивную мощность сдвига первых гармоник, но и возвратить избыточную энергию в сеть из звена постоянного тока, обусловленной тормозными режимами группы приводов, то требуется регулирование величины и ориентации вектора  $\bar{U}_u$  (рис. 16, б).

При этом гладкая составляющая результирующего вектора тока компенсации (в обозначениях рис. 16, б) определяется как

$$\begin{aligned} \bar{I}_k &= \frac{\Delta \bar{U}}{ze^{j\varphi_k}} = \frac{U_s e^{j0^\circ} + U_u e^{j\psi}}{ze^{j\varphi_k}} = \\ &= \frac{U_s e^{-j\varphi_k} + U_u e^{j(\psi - \varphi_k)}}{z}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

Рис. 17. Компенсация мощности сдвига первых гармоник





или

$$\begin{aligned}\bar{I}_k &= \frac{1}{Z} [U_c \cos \varphi_k - jU_c \sin \varphi_k + U_u \cos(\psi - \varphi_k) + jU_u \sin(\psi - \varphi_k)] = \\ &= I_{kx} + jI_{ky};\end{aligned}\quad (4.2)$$

$$I_{kx} = \frac{1}{Z} [U_c \cos \varphi_k + U_u \cos(\psi - \varphi_k)]; \quad (4.3)$$

$$I_{ky} = \frac{1}{Z} [U_c \sin(\psi - \varphi_k) - U_c \sin \varphi_k], \quad (4.4)$$

где  $I_{kx}$ ,  $I_{ky}$  – ортогональные составляющие тока компенсации соответственно по оси  $x$  и  $y$  вращающейся системы координат, ориентированной по вектору напряжения сети;  $\bar{U}_S$ ,  $\bar{U}_u$ ,  $U_S$ ,  $U_u$ ,  $\psi$  – обобщенные вектора напряжения сети и инвертора, их модули и фазовый сдвиг между векторами, отсчитываемый в положительном направлении против часовой стрелки;  $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$  – сопротивление контура компенсации;  $\varphi_k = \arctg X/R$  – фазовый сдвиг между векторами  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_S + \bar{U}_u$  и  $\bar{I}_k$ .

Под действием напряжения  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_S + \bar{U}_u$  возникает ток компенсации  $\bar{I}_k$  (рис. 16, б.), который для рассматриваемого взаимного расположения векторов отстает от  $\Delta\bar{U}$  почти на  $90^\circ$ . Ортогональная составляющая  $I_{ky}$  этого тока является чисто емкостной по отношению к напряжению сети  $\bar{U}_c$  и тем самым реализуется режим компенсации реактивной мощности сдвига. При этом другая ортогональная составляющая  $I_{kx}$  находится в противофазе с  $\bar{U}_c$ , что свидетельствует о возврате энергии из звена постоянного тока САК в сеть. Таким образом, в рассматриваемом случае (рис. 16, б) реализуется режим компенсации реактивной мощности и возврата энергии в сеть.

В синхронно вращающейся системе координат, ориентированный по вектору напряжения сети, активная и реактивная мощность, потребляемая (генерируемая) САК, определяется согласно (4.3) и (4.4) как:

$$P = \frac{3}{2} U_S I_{kx}; \quad Q = \frac{3}{2} U_S I_{ky}, \quad (4.5)$$

где  $U_S$  – модуль обобщенного вектора напряжения сети;  $I_{kx}$ ,  $I_{ky}$  – ортогональные составляющие обобщенного вектора тока компенсации  $I_k$ ;  $3/2$  – согласующий коэффициент.

С учетом выражений (4.3) и (4.4) получим из (4.5):

$$P = \frac{3}{2} U_S \frac{U_S \cos \varphi_k + U_u \cos(\psi - \varphi_k)}{Z}; \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_S \frac{U_u \sin(\psi - \varphi_k) - U_S \sin \varphi_k}{Z}. \quad (4.7)$$

Пренебрегая потерями в контуре компенсации ( $R=0$ ;  $\varphi_k = 90^\circ$ ), что не вносит большой погрешности, имеем из (4.6) и (4.7):

$$P = \frac{3}{2} U_S \frac{U_u \cos(\psi - \pi/2)}{X}; \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_S \frac{U_u \sin(\psi - \pi/2) - U_S}{X}. \quad (4.9)$$

Анализ полученных выражений показывает:

1. Компенсация реактивной мощности сдвига с помощью САК возможно лишь тогда, когда абсолютное значение проекции обобщенного вектора напряжения инвертора (компенсатора) на ось  $X$  вращающейся системы координат  $X, Y$ , ориентированной по вектору напряжения, больше  $\text{mod } \bar{U}_C$ , а фазовый сдвиг  $\psi$  между векторами  $\varphi_k < \psi < (\pi + \varphi_k)$ .

Причем если  $\varphi_k < \psi < (\frac{\pi}{2} + \varphi_k)$  имеет также место потребление активной мощности из сети, а при  $(\frac{\pi}{2} + \varphi_k) < \psi < (\pi + \varphi_k)$  – активная мощность из звена постоянного тока возвращается в сеть. Первый случай используется для компенсации потерь в компенсаторе, а второй – для возврата в сеть избыточной энергии рекуперативного торможения группы приводов (векторные диаграммы рис. 18, а и 18, б соответственно).

2. Максимально возможная реактивная мощность емкостного характера по отношению к напряжению сети генерируется САК в случае когда модуль вектора напряжения сети  $\text{mod}\bar{U}_u > \text{mod}\bar{U}_s$ , а фазовый сдвиг между ними без учета потерь  $\psi = \pi$ .
3. Если модули обобщенных векторов напряжений сети и инвертора равны, то при любом фазовом сдвиге между ними нельзя реализовать режим компенсации реактивной мощности сдвига (реактивная составляющая тока компенсации  $I_{ky}$  (рис. 19) отстает от  $\bar{U}_s$ ). При этом: если фазовый сдвиг  $\psi$  между векторами меньше  $\pi$  ( $\psi < \pi$ ) то из сети потребляется как активная (составляющая  $I_{kx}$  рис. 19, а совпадает с  $\bar{U}_c$ ), так и реактивная мощность; в случае если  $\pi < \psi < 2\pi$  из сети потребляется реактивная мощность, а активная мощность из звена постоянного тока возвращается в сеть (составляющая  $I_{kx}$  рис. 19, б находится в противофазе с  $\bar{U}_c$ ). Следовательно, изменяя величину и пространственное положение вектора  $\bar{U}_u$  можно реализовать режимы как потребления так и генерации в сеть реактивной энергии, а также потребления и возврат активной мощности.

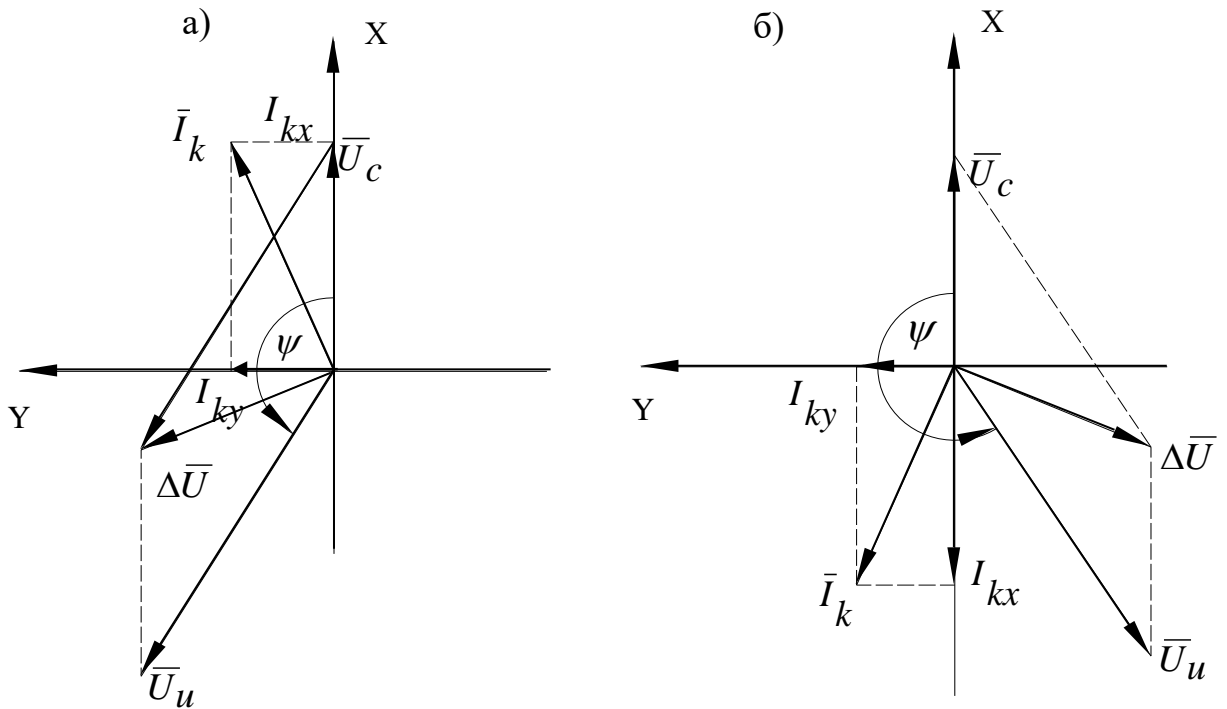


Рис. 18. Векторные диаграммы напряжений и токов в случае  $|\bar{U}_u| > |\bar{U}_S|$ :

а – компенсация реактивной мощности и потребление активной;  
 б – компенсация реактивной мощности и возврат в сеть активной.

Таким образом, для реализации режима компенсации реактивной мощности с помощью САК необходимо, чтобы напряжение инвертора (основная гармоника) было больше амплитудного значения линейного напряжения сети. Поэтому, зная максимальную реактивную мощность, подлежащую компенсации, можно с помощью (4.9) определить требуемое напряжение на входе инвертора:

$$U_u = \frac{1,5U_S^2 + Q_{\max} X}{1,5U_S \sin(\psi - \pi/2)}, \quad (4.10)$$

Амплитуда основной гармоники фазного напряжения трехфазного АИН с синусоидальной ШИМ при соединении нагрузки в звезду составляет (43, 58)

$$U_{u.\max} = \mu U_d / 2, \quad (4.11)$$

где  $\mu$  – коэффициент (глубина) модуляции;  $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока.

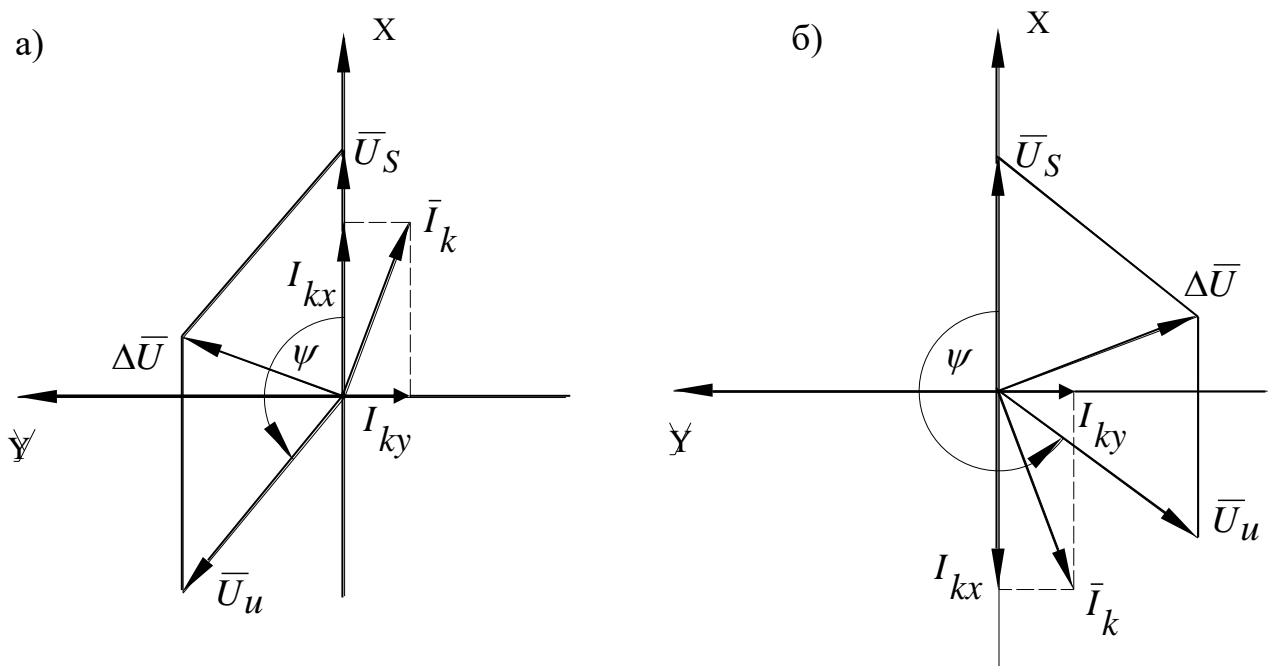


Рис. 19. Векторные диаграммы напряжений и токов когда  $|\bar{U}_S| = |\bar{U}_u|$

Поскольку модули обобщенных векторов равны амплитудным значениям соответствующих фазных величин, то согласно (4.10) и (4.11) можно определить требуемое значение напряжения  $U_d$  в функции реактивной мощности, подлежащей компенсации с помощью САК:

$$U_d = \frac{2(1,5U_{\phi.\max}^2 + Q_{\max} X)}{1,5\mu U_{\phi.\max} \sin(\psi - \pi/2)}. \quad (4.12)$$

**Выводы.** Высокое быстродействие САК, его функциональные возможности и точность компенсации неактивных составляющих полной мощности при любых значениях коэффициента мощности (отстающего и опережающего) и практически синусоидальном токе сети могут быть достигнуты лишь в случае, когда напряжение в звене постоянного тока значительно больше амплитудного значения линейного напряжения сети.

## 4.2. Предельные характеристики параллельных силовых активных компенсаторов с релейным управлением

Применение релейных регуляторов тока (РРТ) позволяет реализовать предельно допустимое быстродействие системы. Для этого система должна обладать необходимым статическим  $\Delta U_{ст}$  и динамическим  $\Delta U_{д}$  резервом (запасом) напряжения как на силовых входах АИН ( $U_{ab}$  рис. 20), так и в звене постоянного тока  $U_d$  для формирования указанного напряжения.

РРТ обладает петлей гистерезиса, ширина которой выбирается как компромиссное решение между амплитудой пульсаций тока и частотой переключения ключей инвертора, непосредственно характеризующей динамические потери мощности и быстродействия системы

Целью работы является определение предельных характеристик для физической реализуемости режима компенсации неактивных составляющих полной мощности с заданным быстродействием и частотой коммутации ключей инвертора.

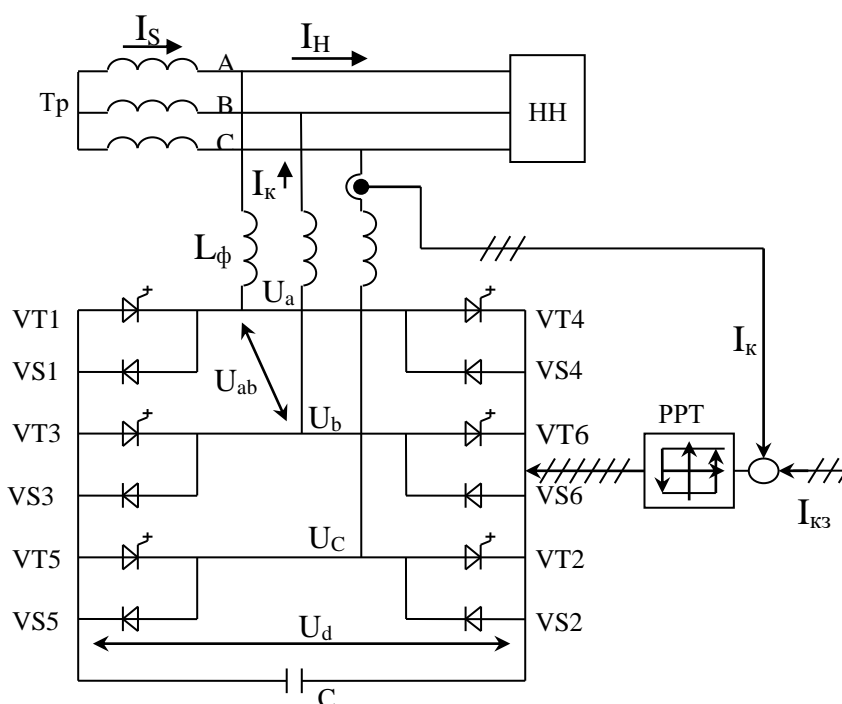


Рис. 20. Функциональная схема параллельного САК с релейным управлением (НН - нелинейная нагрузка;  $I_{к3}$  – задание тока компенсации)

В схеме рис. 20 в любой момент времени замкнуто три ключа. При замыкании, например, ключей К6, К1, К2 вследствие симметричности системы к фазе А приложено положительное напряжение  $2U_d / 3$ , а к фазам В и С вдвое меньшее отрицательное, так как они соединены параллельно и включены последовательно с фазой А (рис. 21). При этом обобщенный (результатирующий) вектор напряжения инвертора  $\bar{U}_u$  совпадает с осью  $\alpha$  неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  (рис. 22). При очередной коммутации ключей инвертора обобщенный вектор скачком изменяет фазу на  $60^\circ$ , занимая шесть фиксированных положений за период выходного напряжения, определяемых как [28,59].

$$\bar{U}_u = \frac{2}{3} U_d e^{j(n-1)\pi/3},$$

где  $U_d$  - напряжение в звене постоянного тока;  $n=1\dots 6$  – номер интервала продолжительностью  $60^\circ$ , причем  $n=1$ , когда замкнуты ключи К6, К1, К2 и  $n=2$  – замкнуты К1, К2, К3 и т.д.

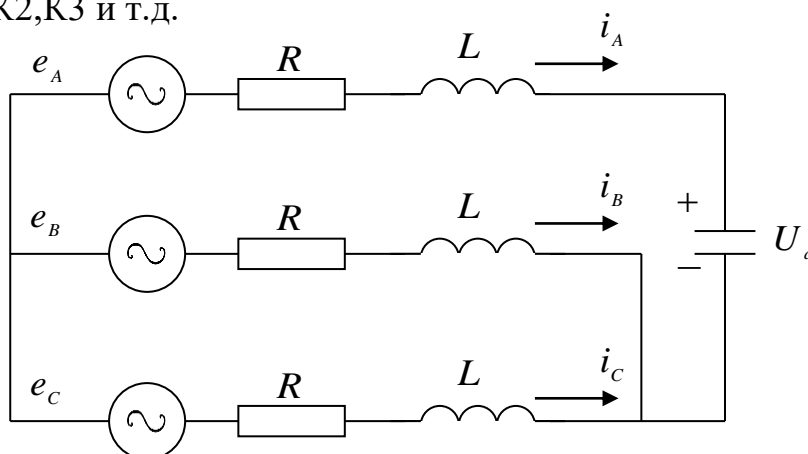


Рис. 21. Эквивалентная расчетная схема для состояния 612 ( $n=1$ , замкнуты ключи К6, К1, К2)

Причем результирующий вектор напряжения инвертора всегда совпадает с осью той фазы, которая включена последовательно с двумя другими параллельно соединенными.

Поскольку напряжение на силовых входах АИН ( $U_a, U_b, U_c$  рис. 20) формируется инвертированием напряжения на емкости, то в межкоммутационный период модуль обобщенного вектора напряжения

инвертора  $\bar{U}_u$  остается неизменным. Однако емкость при этом участвует в энергообменных процессах с сетью и напряжение на ней изменяется (внутренняя обратная связь). Степень изменения напряжения на емкости зависит как от длительности межкоммутационного интервала, который в переходных режимах в системах с РРТ значительно больше, чем в установившихся, так и от пространственного положения результирующих векторов напряжения сети и инвертора. Поэтому расчетная схема САК в обобщенных векторах может быть представлена колебательным контуром R,L,C (рис. 23) с нулевым начальным напряжением на емкости в момент коммутации ключей инвертора. Накопленное на емкости напряжение в течение межкоммутационного интервала, вследствие электромагнитных переходных процессов, должно учитываться при определении модуля  $\bar{U}_u$  при очередной коммутации ключей. Этим объясняется рост напряжения в звене постоянного тока САК [60]. Если напряжение в звене постоянного тока САК регулируется независимым быстродействующим регулятором, поддерживающим с высокой точностью напряжение  $U_d$  на требуемом уровне, а резонансная частота системы меньше угловой частоты напряжения сети, то при высокой частоте коммутации ключей можно в установившемся периодическом режиме пренебречь изменением напряжения на емкости.

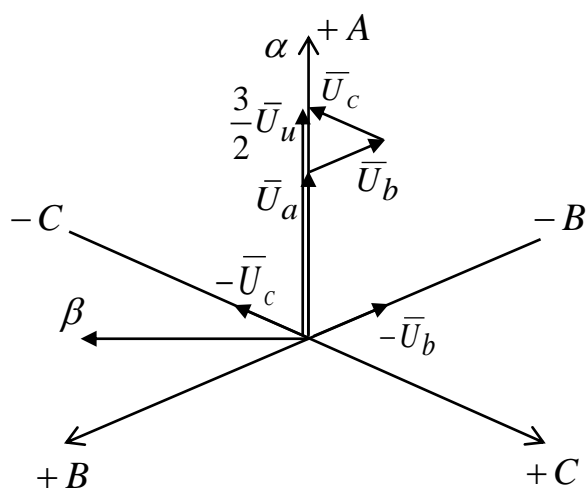


Рис. 22. Обобщенный вектор напряжения инвертора при замкнутых ключах К6, К1, К2



При этом в системах с релейным управлением расчетная схема может быть представлена лишь R,L контуром для установившегося периодического режима.

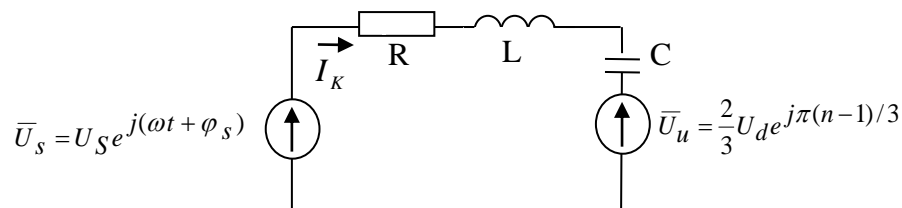


Рис. 23. Расчетная схема САК с релейным управлением в переходных режимах

( $U_s, \varphi_s$  - модуль и аргумент результирующего вектора напряжения сети)

Для анализа установившихся и переходных режимов в системе при высокой частоте коммутации ключей инвертора целесообразно использовать эквивалентную модель, полученную в результате непрерывной аппроксимации его дискретной коммутационной функции. При этом в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  уравнение напряжений САК описывается в обобщенных векторах управлением

$$\bar{U}_{u(\alpha, \beta)} + \bar{U}_{S(\alpha, \beta)} = \bar{I}_{k(\alpha, \beta)} R + L \frac{d\bar{I}_{k(\alpha, \beta)}}{dt}, \quad (4.13)$$

где  $\bar{U}_{u(\alpha, \beta)}$ ,  $\bar{U}_{S(\alpha, \beta)}$ ,  $\bar{I}_{k(\alpha, \beta)}$  - обобщенные вектора напряжений инвертора, сети и тока компенсации в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ ;  $R$  - суммарное сопротивление контура компенсации, включающее сопротивление фильтра, обмоток трансформатора и потери в ключах;  $L$  - результирующая индуктивность, включающая индуктивности фильтра  $L_\phi$  и рассеяния обмоток трансформатора.

Переход к вращающейся системе координат  $x, y$  дает дополнительные преимущества, упрощая анализ режимов и синтез регуляторов, так как при этом гармонические переменные трансформируются в эквивалентные им постоянные ортогональные составляющие. Переход от одной системы координат к другой реализуется на основании известных соотношений

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(x,y)} e^{j\varphi_k} ; \bar{U}_{(x,y)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} e^{-j\varphi_k} , \quad (4.14)$$

где  $\varphi_k$  - угол между координатными осями.

На основании (4.14) имеем из (4.13) в синхронно вращающейся системе координат (индексы x,y-опущены)

$$\bar{U}_u e^{j\varphi_k} + \bar{U}_s e^{j\varphi_k} = R\bar{I}_k e^{j\varphi_k} + L \frac{d(\bar{I}_k e^{j\varphi_k})}{dt} , \quad (4.15)$$

где  $\omega_k = d\varphi_k / dt$  - угловая скорость координатных осей, равная угловой частоте  $\omega = \omega_k = 2\pi f$  питающего напряжения.

Дифференцируя (4.15) и сокращая на  $e^{j\varphi_k}$ , получим уравнение системы в векторной форме в синхронно вращающейся системе координат x,y

$$\bar{U}_u + \bar{U}_s = R\bar{I}_k + L \frac{d\bar{I}_k}{dt} + j\omega L\bar{I}_k . \quad (4.16)$$

Переходя к ортогональным составляющим, имеем в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети

$$U_{ux} + U_{sx} = RI_{kx} + L \frac{dI_{kx}}{dt} - L\omega I_{ky} ; \quad (4.17)$$

$$U_{uy} + U_{sy} = RI_{ky} + L \frac{dI_{ky}}{dt} + L\omega I_{kx} . \quad (4.18)$$

В установившемся периодическом режиме (постоянство компенсируемой реактивной мощности) производные токов в (4.17) и (4.18) равны нулю и статический резерв напряжения по осям x, и y для гладкой составляющей тока определяется как

$$\begin{aligned} \Delta\bar{U}_x &= U_{ux} + U_{sx} = I_{kx}R - \omega_k L I_{ky} ; \\ \Delta\bar{U}_y &= U_{uy} + U_{sy} = I_{ky}R + \omega_k L I_{kx} . \end{aligned} \quad (4.19)$$

На основании (4.19) можно для гладких составляющих тока (непрерывная модель) сформулировать условие физической реализуемости режима компенсации реактивной мощности Q в виде статического резерва (запаса) напряжения на входе АИН (напряжение  $U_{ab}$  рис. 20), модуль которого

$$\Delta U_{cm} = \sqrt{(I_{kx}R - \omega L I_{ky})^2 + (I_{ky}R + \omega L I_{kx})^2} = I_k Z \approx I_{sy} Z , \quad (4.20)$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  - полное сопротивление контура компенсации;  $I_{sy} \approx I_k$  (без учета потерь в контуре) - реактивная составляющая тока сети.

Пространственное положение  $\Delta\psi$  вектора  $\Delta\bar{U}_{cm}$  согласно (4.19) определяется как

$$\Delta\psi = \operatorname{arctg} \frac{I_{ky}R + \omega LI_{kx}}{I_{kx}R - \omega LI_{ky}}. \quad (4.21)$$

Как правило,  $I_{kx}R \ll \omega LI_{ky}$  и поэтому знаменатель в (4.21) будет отрицательным и, следовательно, угол  $\Delta\psi$  находится в пределах  $\pi/2 < \psi < \pi$ , так как  $\sin \Delta\psi > 0$ , а  $\cos \Delta\psi < 0$ .

На основании приведенных соотношений на рис. 24 построена векторная диаграмма напряжений и токов САК в режиме компенсации реактивной мощности и потребления активной для восполнения потерь в системе. Из приведенного рисунка следует, что результирующий вектор напряжения инвертора  $\bar{U}_u = \bar{U}_s - \Delta\bar{U}_{\tilde{n}\delta}$ , повернутый на  $180^\circ$ , в этом режиме отстает от  $\bar{U}_s$  на угол  $\varphi_u$ , равный

$$\varphi_u = \operatorname{arctg} \frac{I_{ky}R + \omega LI_{kx}}{U_s + I_{kx}R - I_{ky}\omega L}. \quad (4.22)$$

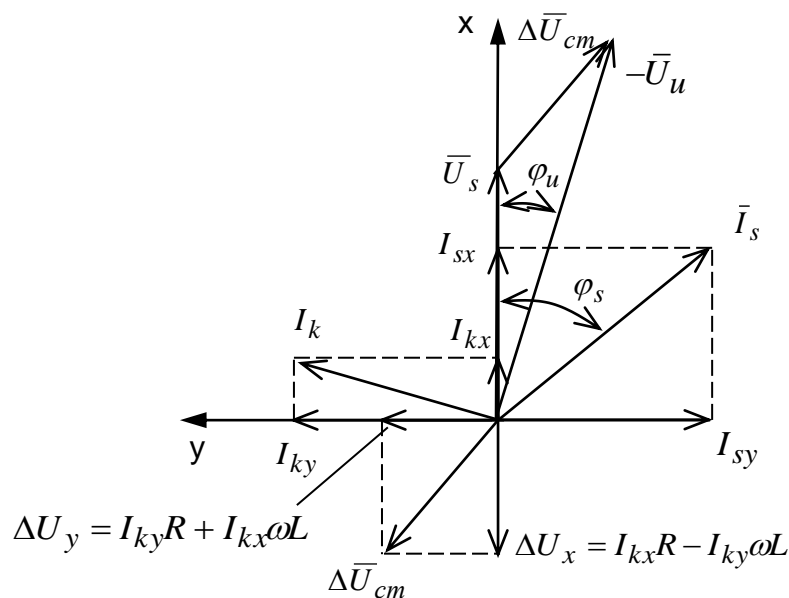


Рис. 24. Векторная диаграмма напряжений и токов в режиме компенсации реактивной мощности и потребления активной.

Составляющие токов  $I_{ky}$  и  $I_{kx}$  в (4.10) и (4.12) можно выразить через реактивную мощность  $Q$ , подлежащую компенсации. В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору напряжения сети,  $Q = \frac{3}{2}U_s I_{sy}$ . Откуда без учета потерь в системе

$$I_{sy} = I_{ky} = 2Q/3U_s \quad (4.23)$$

Приравнивая суммарные потери в системе  $\Delta P = \frac{3}{2}I_k^2 R$  и мощность, потребляемую из сети для компенсации этих потерь  $\Delta P_s = \frac{3}{2}U_s I_{kx}$ , находим

$$I_{kx} = I_k^2 R / U_s \approx I_{sy}^2 R / U_s \quad (4.24)$$

Согласно (4.20)-(4.24) имеем

$$\Delta U_{cm} = \frac{2QZ}{3U_s};$$

$$\varphi_u = \arctg \frac{U_s I_{sy} R + \omega L I_{sy}^2 R}{U_s^2 + R^2 I_{sy}^2 - U_s I_{sy} \omega L}. \quad (4.25)$$

Динамический резерв напряжения  $\Delta U_d$ , необходимый для реализации требуемой частоты коммутации ключей при заданной амплитуде пульсаций тока, может быть определен на основании анализа кривых изменения тока компенсации  $i_k$  при несимметричном периодическом режиме (рис. 25), описываемых отрезками экспонент.

Для промежутка времени  $0 \leq t \leq T_1$  можно записать

$$i_{k1} = \frac{U_\Sigma}{R} \left(1 - e^{-t/T}\right) - \left(i_3(t) - \frac{\Delta i}{2}\right) e^{-t/T}, \quad (4.26)$$

для промежутка времени  $0 \leq t \leq T_2$

$$i_{k2} = -\frac{U_\Sigma}{R} \left(1 - e^{-t/T}\right) + \left(i_3(t) + \frac{\Delta i}{2}\right) e^{-t/T}, \quad (4.27)$$

где  $T=L/R$  – электромагнитная постоянная времени контура,  $\Delta i$  - ширина петли гистерезиса релейного регулятора тока; (уровень пульсаций тока компенсации)

$U_\Sigma$  - модуль вектора результирующего напряжения  $\bar{U}_\Sigma = U_u e^{j\varphi_u} - U_s e^{j\varphi_s}$ .

Полупериод  $T_1$  заканчивается, когда ток компенсации  $i_k$  достигает значения  $i_k = i_\zeta + \Delta i / 2$ , а полупериод  $T_2$  при  $i_k = i_\zeta - \Delta i / 2$ . Подставляя в (4.26) и (4.27) соответственно  $t = T_1$   $t = T_2$ , с учетом приведенных соотношений, получим

$$i_\zeta(t) + \Delta i / 2 = \frac{U_\Sigma}{R} \left( 1 - e^{-T_1/T} \right) - \left( i_\zeta(t) - \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-T_1/T} ; \quad (4.28)$$

$$i_\zeta(t) - \Delta i / 2 = -\frac{U_\Sigma}{R} \left( 1 - e^{-T_2/T} \right) + \left( i_\zeta(t) + \frac{\Delta i}{2} \right) e^{-T_2/T} ; \quad (4.29)$$

Частота коммутации ключей инвертора САК зависит как от параметров схемы, так и от мгновенного значения тока задания и его производной. Аналитическое определение периода коммутации согласно (4.28) и (4.29) в этом случае сопряжено с большими трудностями и может быть исследовано численными методами. В случае  $i_\zeta(t) = I_\zeta = const$ , то согласно (4.28) и (4.29) уравнение периода коммутации  $T_k$  определяется как

$$T_k = T_1 + T_2 = T \ln \frac{I_m + \Delta i - I_\zeta^2 / I_m}{I_m - \Delta i - I_\zeta^2 / I_m} = T \ln \left( 1 + \frac{\Delta i}{I_m} - \frac{I_\zeta^2}{I_m^2} \right) / \left( 1 - \frac{\Delta i}{I_m} - \frac{I_\zeta^2}{I_m^2} \right) \quad (4.30)$$

или

$$T_k = T \ln \left( \frac{I_m + \Delta i}{I_\zeta} - \frac{I_\zeta}{I_m} \right) / \left( \frac{I_m - \Delta i}{I_\zeta} - \frac{I_\zeta}{I_m} \right), \quad (4.31)$$

где  $I_m = U_\Sigma / R$ . – установившееся значение тока.

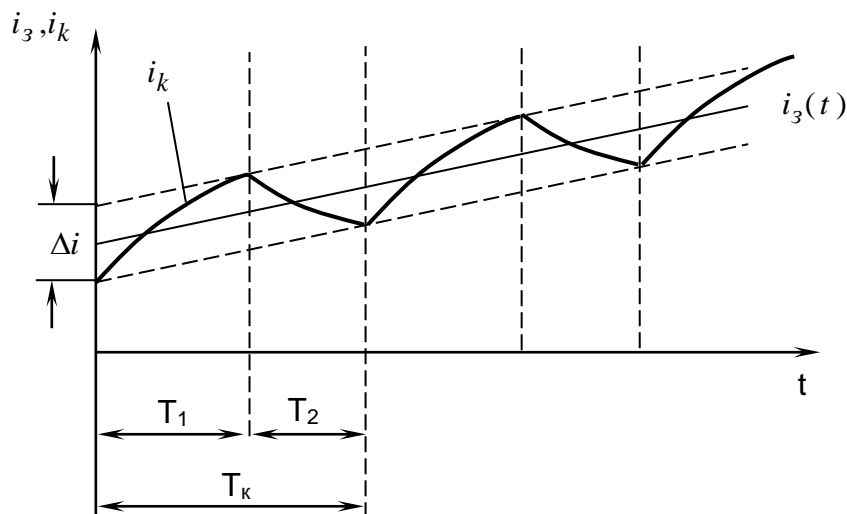


Рис. 25. Графики изменения тока компенсации  $i_k$  в системах с релейным управлением.

Графики функций  $T_k / T = f(I_m / I_{\zeta.m})$  для различных значений коэффициента пульсаций тока  $K_i = \Delta i / I_{\zeta.m}$ , построенные по (4.31), приведены на рис 26.

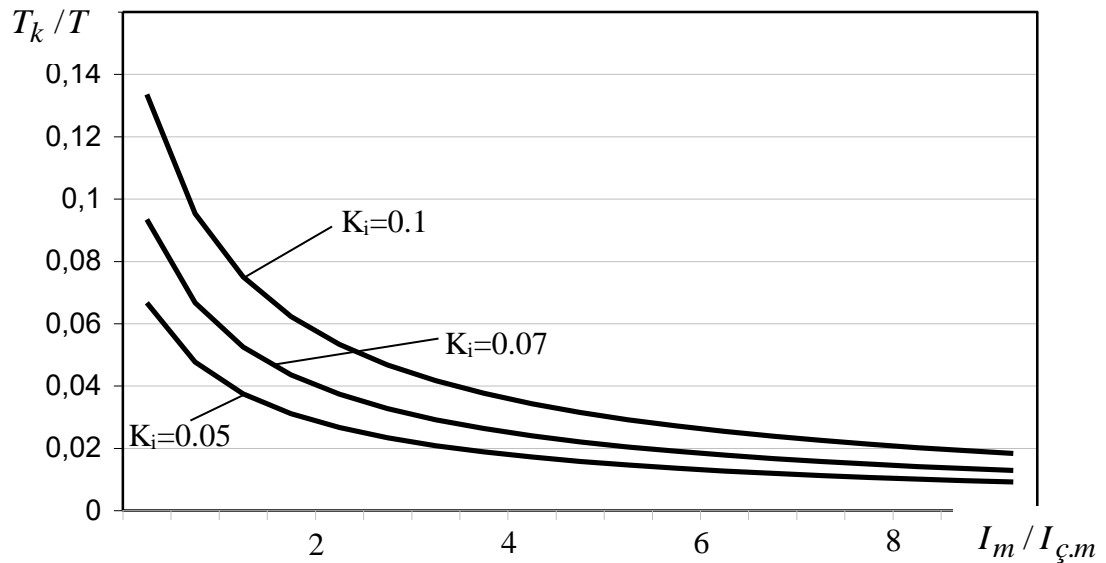


Рис. 26. Зависимость  $T_k / T = f(I_m / I_{\zeta.m})$  для различных значений коэффициента  $K_i$  пульсаций тока САК

При синусоидальном токе задания  $i_3 = I_{\zeta.m} \sin \omega t$ , что имеет место в системах, управляемых по мгновенным значениям неактивных составляющих полной мощности, период коммутации без большой погрешности определяется на основании (4.31) соотношением

$$T_k = T \ln \frac{\frac{I_m}{I_{\zeta.m}} + \frac{\Delta i}{I_{\zeta.m}} - \frac{I_{\zeta.m} \sin^2 \psi}{I_m}}{\frac{I_m}{I_{\zeta.m}} - \frac{\Delta i}{I_{\zeta.m}} - \frac{I_{\zeta.m} \sin^2 \psi}{I_m}}, \quad (4.32)$$

где  $\psi$  - начальная фаза тока задания.

Ограничиваясь в (4.30) двумя членами ряда, получим приближенное выражение периода коммутации ключей инвертора при  $I_{\zeta} = const$

$$T_k = \frac{2T\Delta i}{I_m} \left( 1 + \frac{I_{\zeta}^2}{I_m^2} \right) = \frac{2TK_i I_{\zeta}}{I_m} \left( 1 + \frac{I_{\zeta}^2}{I_m^2} \right), \quad (4.33)$$

для синусоидального тока задания

$$T_k = \frac{2TK_i I_{3,\max}}{I_m} \left( 1 + \frac{I_{3,m}^2 \sin^2 \psi}{I_m^2} \right). \quad (4.34)$$

Приведенное выражение (4.33) позволяет определить минимальный коэффициент пульсаций тока инвертора  $K_i = \Delta i / I_{3,m}$ , а следовательно, и максимальную ширину зоны гистерезиса  $\Delta i_{\max}$  релейного регулятора тока с учетом допустимой частоты коммутации ключей инвертора при заданных параметрах контура компенсации.

$$K_i = \frac{T_k}{2T \frac{I_{c,m}}{I_m} \left( 1 + \frac{I_{c,m}^2}{I_m^2} \right)}; \quad \Delta i = \frac{T_k I_m}{2T \left( 1 + \frac{I_{c,m}^2}{I_m^2} \right)}. \quad (4.35)$$

Преобразовав выражение (4.33) с учетом  $I_m = U_\Sigma / R$ ,  $T = L / R$ , имеем

$$U_\Sigma^2 (T_k U_\Sigma - 2LK_i I_{c,m}) = 2LK_i I_{c,m}^3 R^2 \quad (4.36)$$

выражение в скобках должно быть положительным и, следовательно, минимальный динамический запас напряжения на входе АИН, обеспечивающий воспроизведение тока задания с требуемой амплитудой пульсаций, составляет

$$\Delta U_{\partial,\min} > \frac{2LK_i I_{3,m}}{T_k} > \frac{2L\Delta i}{T_k}, \quad (4.37)$$

т.е. при заданной индуктивности контура  $\Delta U_{\partial,\min}$  пропорционально ширине петли гистерезиса РРТ и частоте коммутации  $f_k = 1 / T_k$  ключей инвертора.

Динамический резерв напряжения, необходимый для реализации требуемого время первого согласования  $t_p$  в замкнутой системе при набросе реактивной нагрузки определяется третьими составляющими правых частей уравнений (4.16) и (4.17). С учетом заданного времени первого согласования эти составляющие в осях  $x, y$  составляют с учетом (4.23) и (4.24)

$$\Delta U'_{\partial x} = L \frac{dI_{kx}}{dt} = \frac{LI_{kx}}{t_p} = \frac{RLI_{sy}^2}{U_S t_p}; \quad (4.38)$$

$$\Delta U'_{\partial y} = L \frac{dI_{ky}}{dt} = \frac{LI_{ky}}{t_p} = \frac{LI_{sy}}{t_p}. \quad (4.39)$$

На основании этих выражений модуль динамического резерва напряжения на входе инвертора, необходимого для реализации заданного быстродействия обеспечивающего время первого согласования  $t=t_p$

$$\Delta U'_\partial = \sqrt{\Delta U'_{\partial x}{}^2 + \Delta U'_{\partial y}{}^2} = \frac{LI_{sy}}{t_p} \sqrt{1 + \frac{RI_{sy}}{U_s}} = \frac{2LQ}{3U_s t_p} \sqrt{1 + \frac{RI_{sy}}{U_s}}. \quad (4.40)$$

Суммарный резерв напряжения  $U_\Sigma$  определяется геометрической суммой напряжений, найденных по (4.20), (4.37) и (4.40), составляет

$$\bar{U}_\Sigma = U_\Sigma x + jU_\Sigma y = \left( I_{kx}R - \omega LI_{sy} - \frac{2L\Delta i}{T_k} + \frac{LI_{kx}}{t_p} \right) + j \left( I_{ky}R + \omega LI_{kx} + \frac{2L\Delta i}{T_k} + \frac{LI_{sy}}{t_p} \right) \quad (4.41)$$

Используя соотношения (4.23) и (4.24) составляющие  $I_{sy}$  и  $I_{kx}$  в выражении (4.41) можно заменить соответствующей им реактивной мощностью, подлежащей компенсации.

Для синтеза системы замкнутый контур тока с релейными регуляторами может быть представлен аperiodическим звеном

$$W_{T(p)} = \frac{I_k(p)}{I_\zeta(p)} = \frac{1}{T_\zeta p + 1} \quad (4.42)$$

с эквивалентной постоянной времени

$$T_\zeta = T\Delta U_{cm} / \Delta U'_\partial + \Delta U_{cm}, \quad (4.43)$$

где  $U_{\tilde{n}\partial}$  и  $\Delta U'_\partial$  определяются по (4.20) и (4.40).

Постоянная времени  $T_\zeta$  найдена из анализа упрощенного выражения изменения тока в цепи R,L, которое имеет вид

$$i = (\Delta U'_\zeta + \Delta U_{\tilde{n}\partial})t / L \quad (4.44)$$

с учетом того, что постоянная времени интегрирующего звена соответствует времени, в течении которого выходная величина достигает задания.



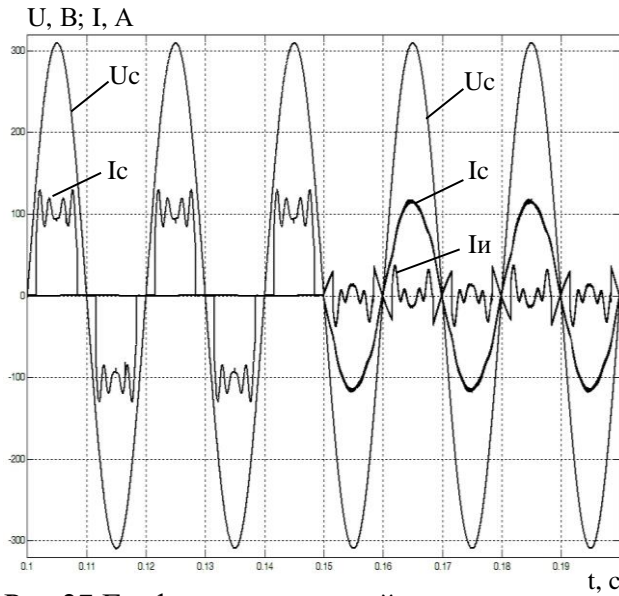


Рис.27. Графики напряжений и токов в режиме компенсации реактивной мощности диодного выпрямителя ( $U_c$ ,  $I_c$ ,  $I_i$  – соответственно напряжение и ток сети, ток инвертора САК)

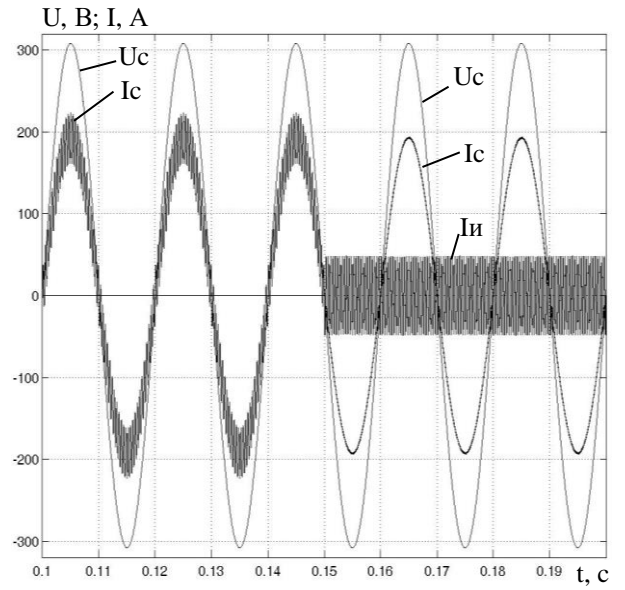


Рис. 28. Графики напряжения и токов в режиме фильтрации 49-й гармоники

## 5. ОХРАНА ТРУДА И БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

### 5.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов в рабочей зоне

Характеристика производственного помещения по категории выполняемых обслуживающим персоналом в них, в зависимости от характеристики работы.

Работа: легкая, физическая. Производимая сидя, стоя или связанная с ходьбой, но не требующая систематического физического напряжения или поднятия и переноски тяжестей.

Операторы станков, электромонтеры, слесаря, обслуживающие данное оборудование и другие работники в рабочей зоне сталкиваются с воздействием таких физически опасных и вредных производственных факторов как:

- повышенный уровень шума
- повышенная температура внешней среды
- отсутствие или недостаток естественного света
- недостаточная освещенность рабочей зоны
- электрический ток
- статическое электричество

Основными источниками теплоты в помещениях участка станков с ЧПУ являются:

- микропроцессорная техника;
- электродвигатели приводов и вспомогательное оборудование;
- печи нагрева заготовок;
- приборы освещения.

Вибрация, действующая на персонал, относится к категории III. Вибрация оказывает на организм человека следующие воздействия: нарушения центральной нервной системы, заболевания сосудов и суставов, головные боли, головокружение.

Помещение согласно требованиям «Правил устройства электроустановок» относится к помещению с особой опасностью, так как имеется токопроводящая пыль, влажность и возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлическим конструкциям технологического оборудования с одной стороны и к металлическим проводам электроустановок или токоведущим частям, с другой. Исходя из требований ПУЭ наличие пыли в помещениях участка станков с ЧПУ не должно превышать – 2 мг/м<sup>3</sup>.

Норма освещенности рабочей поверхности IV разряда средней точности.

## 5.2 Расчетная часть

### 5.2.1 Расчет искусственного освещения

В связи с недостатком освещения в цеху, целесообразно провести расчет искусственного освещения.

**Цель расчета** – выбрать систему освещения, источник света и светильник, определить количество светильников для обеспечения нормируемой освещенности и расположить их на плане помещения.

**Исходные данные:** цех представляет собой прямоугольник 60x100м с высотой 10м; норма освещенности рабочей поверхности принимается для IV разряда средней точности, размер объекта 0,5 – 1мм, фон средний при контрасте объекта с фоном средним E=150лк.

Расчет искусственного освещения выполняется методом коэффициента использования по формуле:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot z}{N \cdot \eta};$$

где  $\Phi$  – необходимый световой поток ламп в каждом светильнике, лм; E – минимальная освещенность 150лк; S=60x100=6000м<sup>2</sup> – освещаемая площадь; z – коэффициент минимальной освещенности, выбирается для лампы ДРЛ равным 1,15; k – коэффициент запаса выбирается равным 1,5; N – число светильников в помещении;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Выбираем систему общего освещения, создающую более равномерную освещенность рабочих поверхностей. Источник света – лампы ДРЛ.

Расчетная высота подвеса светильников  $h$  задается размерами помещения. Наиболее выгодное соотношение расстояния между светильниками к расчетной

высоте подвеса  $\lambda = \frac{L}{h}$  принимается в зависимости от типовой кривой силы света светильника

$$h = H - h_{ce} - h_{pn} = 10 - 0,215 - 0,8 = 8,985 \approx 9 \text{ м};$$

$\lambda=1,0$  – наиболее выгодного соотношения расстояния между светильниками до расчетной высоты подвеса, для светильников типа РСПО 08/Г03 с глубокой типовой кривой света.

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1 \cdot 9 = 9 \text{ м};$$

Расстояние между крайними светильниками и стеной выбираем для рабочих мест отделенных от стены проходом:

$$l = 0,4 \cdot L = 0,4 \cdot 9 = 3,6 \text{ м};$$

Определяем количество светильников для установки в помещении;

$$N = \frac{S}{L^2} = \frac{6000}{9^2} = 72,07;$$

Количество светильников принимаем  $N=72$ .

Для определения коэффициента использования  $\eta$  находим индекс помещения;

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} = \frac{60 \cdot 100}{9(60 + 100)} = 4,17;$$

где  $A$  и  $B$  – длина и ширина помещения, м;  $h$  – расчетная высота подвеса, м.

Оцениваются коэффициенты отражения поверхностей помещения:

Потолка –  $\rho_{п} = 50$ , стен  $\rho_{с} = 30$ , рабочей поверхности -  $\rho_{р} = 10$ . По полученным значениям  $i$  и  $\rho$  определяем величину коэффициента использования светового

потока для выбранного светильника  $\eta = 73$ . По ранее приведенной формуле определяем световой поток ламп в каждом светильнике:

$$\Phi = \frac{150 \cdot 6000 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{74 \cdot 0,73} = 27490 \text{ лм};$$

Выбираем лампы ДРИ400 мощностью 400 Вт, напряжение 220 В. Световой поток после 100 часов горения 32000 лм.

Общая потребляемая мощность составит

$$P = 72 \cdot 0,4 = 28,8 \text{ кВт}$$

Отклонение фактической освещенности от заданной будет равно

$$\Delta = \frac{32000 - 27490}{27490} 100\% = +16\% \quad (\text{допустимо})$$

План размещения светильников представлен на рис.29

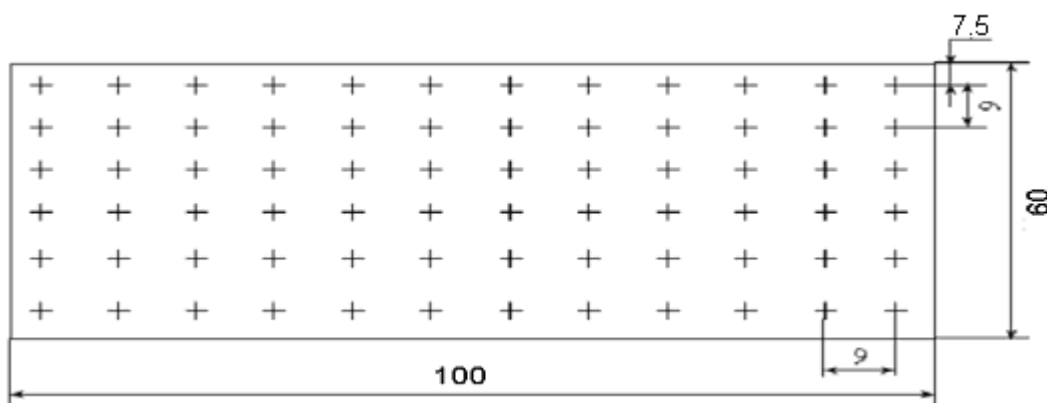


Рис.29 – План размещения светильников

В следствии применения меньшего количества светильников, значение  $l$  будет равно 7,5 м.

Нормируемая аварийная освещенность рабочих мест для обслуживания должна составлять не менее 5% освещенности, нормируемой для рабочего освещения и быть в пределах 2 – 30 лк внутри зданий и 1 – 5 лк на площадках предприятия.

## **5.3 Инженерно технические мероприятия по охране труда**

### **5.3.1 Разработка мероприятий по ОТ**

При работе на станках несчастный случай с человеком может произойти в результате захвата его одежды или волос различными выступающими вращающимися частями станка (шкивы, муфты, валы, шестерни, шпиндели и др.). Чтобы избежать этого, применяется спецодежда и различные ограждения. Большую опасность в отношении травмы представляет стружка, отлетающая в горячем состоянии из-под резца металлорежущих станков. Во время работы станка стружка должна отбрасываться в специальное корыто или ящик. При ручной уборке стружки нужно пользоваться специальными крючками и металлическими щетками. Во время работы станка не допускается уборка стружки вблизи движущихся частей. На токарных станках применяют защитные экраны для предотвращения возможности ранения рабочего отлетающей стружкой.

### **5.3.2 Пожарная профилактика**

Помещение, в котором установлен станок с ЧПУ по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности, относится к помещениям категории «Д», так как в них находятся негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Здание цеха имеет II степень огнестойкости (кирпич, раствор, бетон, металлоконструкции, стекло). Пожарная безопасность объекта обеспечивается системой предотвращения пожара, системой пожарной защиты и мерами организационного характера. При всех условиях должна быть обеспечена пожарная безопасность объекта и безопасность людей.

Пожар может возникнуть в результате:

- возгорания электрооборудования при перегрузках, перегревах и коротких замыканиях;
- возгорания горюче-смазочных материалов при попадании в них искр электрического или механического происхождения;

- самовозгорание промасленной ветоши.

Обеспечение помещений средствами пожаротушения.

Категория помещений	Граничная защищаемая площадь, м <sup>2</sup>	Класс пожара	Пенная станция пожаротушения	Порошковые огнетушители емкостью, л			Хладоновые огнетушители ОХ – 2(3)	Углекислотные огнетушители, л	
				ОП-2	ОП-5	ОП-10		ОУ-2(3)	ОУ-(8)
Г	800	В	1	-	2	1	-	-	-
	1800	Е	-	2	2	1	1	4	2

Для исключения и снижения возможности пожара предусматриваются следующие мероприятия:

- электрооборудование снабжено тепловыми реле, плавкими предохранителями, автоматами токовой защиты, размыкающими цепь в случае их срабатывания;

- на гидравлической станции и разводке не допускаются утечки масла, путем своевременного их устранения;

- промасленная ветошь собирается в специальных металлических ящиках с откидной крышкой.

Согласно «норм первичных средств пожаротушения для предприятий и организаций системы министерства металлургии» на участке станков предусмотрены первичные средства пожаротушения, расчет которых приведен в таблице.

### 5.3.3 Безопасность при чрезвычайных ситуациях

Оценивая возможность чрезвычайных ситуаций, можно сказать что ЧС природного характера такие как:

- извержения вулканов;
- оползни;
- сели;
- землетрясения;
- наводнения;
- ураганы

не грозят рассматриваемому персоналу, работающему в данном цеху т.к. работы проводятся в укрепленном здании, что уменьшает риск для жизни во время возможных ураганов. Территория завода находится выше уровня реки, это исключает возможность наводнения. Сейсмической, а так же вулканической активности не наблюдалось, что исключает землетрясения и извержение лавы. Сели и оползни присущи горной и скалистой местности.

Следовательно можно сказать, что возможность возникновения ЧС природного характера крайне мала.

Возможность возникновения ЧС техногенного характера значительно больше. К ЧС техногенного характера относятся:

- пожары;
- взрывы;
- аварии при работе со СДЯВ, и химическими веществами;
- радиацией;
- электричеством;
- транспортом

Из перечисленных выше ЧС наиболее возможными для нашего случая являются ЧС связанные с поражением электрическим током, и пожарами.

**При поражении электрическим током.** В тех случаях, когда человек оказался под напряжением и не может самостоятельно освободиться от



действия электрического тока, ему необходимо незамедлительно оказать помощь. В первую очередь следует освободить его от действия тока путем отключения подачи электричества. Если это не удалось, пострадавшего необходимо оторвать от токоведущих проводов или приборов. Делать это необходимо за одежду, если она сухая. Провод с пострадавшего снимают сухими подручными средствами: шест, палка, доска. После освобождения пострадавшего от действия электрического тока ему необходимо обеспечить полный покой до прибытия врача, согревание, приток свежего воздуха. Можно дать понюхать нашатырный спирт. При необходимости провести искусственное дыхание и непрямой массаж сердца, быстро доставить его в ближайшее лечебное учреждение.

**Пожар.** Не смотря на то что наше помещение относится к классу «Д» и характеризуется как пожаробезопасное, нельзя исключать возможность возникновения возгорания. Пожар может возникнуть из-за возгорания электрооборудования при перегрузках, перегревах и коротких замыканий; перегрева и воспламенения, последующего выхода из строя изоляции линий снабжения; возгорания горюче-смазочных материалов при попадании в них искр электрического или механического происхождения; самовозгорание промасленной ветоши; детонация или возгорание пыли присутствующей в цеху; вылет искр.

Если возгорание не удалось ликвидировать на начальной стадии, весь персонал цеха должен покинуть помещение. Здание цеха покидается через 2 эвакуационных выхода ширина прохода которых 7м, либо через главный вход ширина прохода 20м, смотря в каком месте находится очаг возгорания.



Рис.30 – План размещения эвакуационных выходов

Аварийное освещение для эвакуации людей должно составлять наименьшую освещенность на полу проходов в помещениях 0.5 лк, на открытых площадках 0.2 лк.

Помогают эвакуировать людей так называемые знаки эвакуационной безопасности, как то:

- стрелки;
- указатели;
- обозначения главного и запасных выходов

Систему автоматического пожаротушения выбираем на основе автоматического извещателя, который работает с датчиком тепла. Датчики тепла вмонтируем в стены на высоте 0.5-1м от пола, и в пол, в места где датчики будут ограждены от попадания прямого солнечного света. Систему автоматического пожаротушения так же стоит снабдить и ручным запуском. Характерно что система пожаротушения является сразу же и пожарной сигнализацией.

Огнетушащее вещество в системе порошок, газ либо аэрозоль. Вода или пена не подходит ввиду того что в цехе используется оборудование, находящееся под напряжением.

### *Список использованной литературы*

1. Милях А.Н., Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трёхфазных цепях. – Киев: Наук. думка, 1973. – 219 с.
2. Волков А.В. Анализ электромагнитных процессов и совершенствование регулирования активного фильтра // Электротехника, 2002, №12, с. 40-48.
3. Колб А.А. Энергосберегающая система группового питания электроприводов с общим преобразователем с двухсторонней проводимостью и емкостным накопителем энергии. // Вестник Кременчугского политехнического университета, вып. 1, 2003, с. 135-143.
4. Белов И.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Сумников А.А. Автоматизированный электропривод – современная основа автоматизации технологических процессов // Электротехника, 2003, №5, с. 12-16.
5. Баланс энергий в электрических цепях // Тонкаль В.Е., Новосельцев А.В., Денисюк С.П. и др. / Под ред. И.В. Волкова. – К.: Наук. думка, 1992.-312 с.
6. V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques An instantaneous active and reactive current component method for active filters. IEEE Trans. Power Electr., vol.15, p.p. 660-669, July, 2000.
7. Ковач К.П., Рац Н. Переходные процессы в машинах переменного тока: пер. с нем. – И. – Л.; Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
8. H. Akadi, V. Kanazawa, A. Nabae. Generalized theory of the instantaneous reactive in three phase circuits. IPEC'83-Int.Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp 1375-1386.
9. A. Nabae, T. Tanake. A new definition of instantaneous active reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three phase circuits. IEEE/PES Winter Meeting, Paper 96, WM227-9PWRD, 1996.
10. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. – Киев: Наук. думка, 1985. – 208 с.

11. Шидловский А.К., Москаленко Г.А. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами. – Киев: Наук. думка, 1981. – 204 с.
12. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
13. Колб А.А. Релейно-векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2004. – вып. 3, с. 61-68.