

Міністерство освіти і науки України  
 Національний технічний університет  
 «Дніпровська політехніка»

Інститут Електроенергетики  
 (інститут)

Електротехнічний факультет  
 (факультет)

Кафедра електропривода  
 (повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**кваліфікаційної роботи ступеню магістра**

(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Стоярова Владислава Олеговича \_\_\_\_\_

(ПІБ)

академічної групи 141М-17-4 \_\_\_\_\_

(шифр)

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації

та електропривод

(офіційна назва)

на тему Обґрунтування параметрів ємнісних накопичувачів в системах групового живлення електроприводів

(назва за наказом ректора)

| Керівники                 | Прізвище,<br>ініціали | Оцінка за шкалою |               | Підпис |
|---------------------------|-----------------------|------------------|---------------|--------|
|                           |                       | рейтингов<br>ою  | інституційною |        |
| кваліфікаційної<br>роботи | Колб А.А.             |                  |               |        |
| розділів:                 |                       |                  |               |        |
| Спеціальна<br>частина     | Колб А.А.             |                  |               |        |
| Економіка                 | Тимошенко Л.В.        |                  |               |        |
|                           |                       |                  |               |        |
|                           |                       |                  |               |        |
|                           |                       |                  |               |        |
| <b>Рецензент</b>          |                       |                  |               |        |
| <b>Нормоконтролер</b>     | Казачковський<br>М.М. |                  |               |        |

Дніпро  
 2018

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
електропривода  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Казачковський М.М.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

Студенту Столярову Владиславу Олеговичу академічної групи 141М-17-4  
(прізвище та ініціали) (шифр)

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

спеціалізації \_\_\_\_\_

за освітньо-професійною програмою Електромеханічні системи автоматизації та електропривод

(офіційна назва)

на тему Обґрунтування параметрів ємнісних накопичувачів в системах групового живлення електроприводів

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

| Розділ                              | Зміст  | Термін виконання |
|-------------------------------------|--|------------------|
| Технологічний                       | Обґрунтування вибору ємності накопичувальних компенсаторів в системах групового живлення електроприводів |                  |
| Автоматизований електропривод       | Енергетичні характеристики силових активних компенсаторів в електроприводах з ємнісними накопичувачами   |                  |
| Дослідження динаміки електроприводу | Розробка Matlab - моделі керованого компенсатора   |                  |
| Економічний                         | Провести розрахунки капітальних затрат та експлуатаційних витрат при модернізації системи                |                  |

Завдання видано \_\_\_\_\_ Колб А.А.  
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі 15 жовтня 2018

Дата подання до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_

Прийнято до виконання \_\_\_\_\_ Столяров В.О.  
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

## Реферат

Объект исследований – системы группового питания электроприводов с ШИМ с емкостными накопителями электроэнергии.

Предмет исследований – параметры емкостных накопителей энергии в системах группового питания электроприводов с ШИМ.

Цель дипломной работы – обеспечение требуемых энергетических показателей электроприводов группового питания от общих шин постоянного тока путем обоснованного выбора параметров и исследования емкостных накопителей энергии, для аккумулирования энергии рекуперативного торможения приводов и ее повторного использования для питания приводов двигательного режима и управление качеством электроэнергии с помощью САК на основе АИН с ШИМ.

В данной работе исследовано влияние емкостей накопительных конденсаторных батарей на энергообменные процессы между приводами и сетью в режиме аккумулирования энергии, а так же компенсации неактивных составляющих полной мощности.

Практическая ценность результатов состоит в разработке структуры систем электропривода с общими питающими шинами постоянного тока и накопительными конденсаторами, позволяющая уменьшить потери мощности и энергии в силовых элементах электропривода. При этом компенсация неактивных составляющих полной мощности повышает качество электроэнергии, уменьшает потери энергии в линиях электропередач, что увеличивает их пропускную способность.

Экономический эффект от реализации результатов работы ожидается положительным, благодаря экономии электроэнергии быстродействующих приводов с напряженными динамическими режимами при рекуперативном торможении и повторном ее использовании для управления качеством электроэнергии, а именно: компенсация реактивной мощности; компенсации мощностей искажения (обеспечение синусоидальностей кривых тока и напряжения сети); симметрирование режима работы сети.

**СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО ПИТАНИЯ ПРИВОДОВ С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ, ПАРАМЕТРЫ ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ, ЭНЕРГООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ МЕЖДУ СЕТЬЮ И ПРИВОДАМИ, КОМПЕНСАЦИЯ НЕАКТИВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ.**

## Реферат

Об'єкт досліджень - системи групового живлення електроприводів з ШІМ е ємнісними накопичувачами електроенергії.

Предмет досліджень - параметри ємнісних накопичувачів енергії в системах групового живлення електроприводів з ШІМ.

Мета дипломної роботи - забезпечення необхідних енергетичних показників електроприводів групового харчування від загальних шин постійного струму шляхом обґрунтованого вибору параметрів і дослідження ємнісних накопичувачів енергії, для акумулювання енергії рекуперативного гальмування приводів і її повторного використання для харчування приводів рухового режиму і управління якістю електроенергії за допомогою САК на основі АІН з ШІМ.

У даній роботі досліджено вплив ємностей накопичувальних конденсаторних батарей на енергообміну процесі між приводами і мережею в режимі акумулювання енергії, а так само компенсації неактивних складових повної потужності.

Практична цінність результатів полягає в розробці структури систем електроприводу з загальними живлять шинами постійного струму і накопичувальними конденсаторами, що дозволяє зменшити втрати потужності і енергії в силових елементах електроприводу. При цьому компенсація неактивних складових повної потужності підвищує якість електроенергії, зменшує втрати енергії в лініях електропередач, що збільшує їхню пропускну здатність.

Економічний ефект від реалізації результатів роботи очікується позитивним, завдяки економії електроенергії швидкодіючих приводів з напруженими динамічними режимами при рекуперативному гальмуванні і повторному її використанні для управління якістю електроенергії, а саме: компенсація реактивної потужності; компенсації потужностей спотворення (забезпечення синусоїдальної кривих струму і напруги мережі); симетрування режиму роботи мережі.

СИСТЕМИ ГРУПОВОГО ХАРЧУВАННЯ ПРИВОДІВ З ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА, ПАРАМЕТРИ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА, енергообміну ПРОЦЕСИ МІЖ МЕРЕЖЕЮ І ПРИЗВОДИТЬ, КОМПЕНСАЦІЯ НЕАКІТВНИХ СКЛАДОВИХ ПОВНІЙ ПОТУЖНОСТІ.

## **Abstract**

The object of research is the group power supply systems for electric drives with PWM e capacitive energy storage.

The subject of research is the parameters of capacitive energy storage in systems of group powering of electric drives with PWM.

The aim of the thesis is to provide the required energy performance of group-driven electric drives from common DC buses through the reasonable choice of parameters and research of capacitive energy storages, for storing regenerative braking of drives and reusing it to power the drives of the motor mode and power quality control using the NAO on the basis AIN with PWM.

In this work, the effect of capacitive storage capacitor batteries on the energy exchange processes between the drives and the network in the energy storage mode, as well as compensation of the inactive components of full power is investigated. The practical value of the results consists in the development of the structure of electric drive systems with common supply DC busbars and storage capacitors, which allows reducing power and energy losses in the power components of the electric drive. At the same time, the compensation of inactive components of total power improves the quality of electricity, reduces energy losses in power lines, which increases their throughput.

The economic effect from the implementation of the results of work is expected to be positive, due to the energy savings of high-speed drives with intense dynamic modes during regenerative braking and its reuse to control power quality, namely: reactive power compensation; compensation of distortion power (providing sinusoidal curves of current and voltage of the network); balancing network mode.

**GROUP POWER SUPPLY SYSTEMS WITH CAPACITIVE DRIVE, CAPACITIVE DRIVE PARAMETERS, ENERGY-EXCHANGE PROCESSES BETWEEN NETWORK AND DRIVES, COMPENSATION OF INACTIVE COMPONENTS OF FULL POWER.**

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| РЕФЕРАТ.....   | 3  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 7  |
| 1. Обоснование выбора емкости накопительных компенсаторов в системах группового питания электроприводов.....                                     | 12 |
| 2. Формирование управляющего параметра ПАФ для компенсации реактивной мощности и мощности искажения.....   | 18 |
| 2.1. Формирование функции управления ПАФ в режиме компенсации мощности асимметрии.....   | 25 |
| 3. Влияние неактивных составляющих полной мощности на качество электроэнергии.....   | 34 |
| 3.1. Компенсация реактивной мощности.....  | 37 |
| 3.2. Влияние высших гармоник на качество электроэнергии в сети.....  | 37 |
| 3.3. Искажение синусоидальности питающего напряжения.....  | 39 |
| 3.4. Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах.....  | 42 |
| 3.5. Сокращение срока службы электрооборудования возникает из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции.....                | 44 |
| 3.6. Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей.....  | 44 |
| 3.7. Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены в относительной близости..... | 45 |
| 4. Энергетические характеристики силовых активных компенсаторов в электроприводах с емкостными накопителями.....                                 | 45 |
| 5. Разработка MATLAB - модели управляемого компенсатора.....   | 51 |
| 6. Технеко-экономическое обоснование.....  | 67 |
| 7. Список использованной литературы.....   | 77 |

## Введение

В частотно-регулируемом асинхронном электроприводе, чтобы избежать усложнения входной цепи, силовой преобразователь в большинстве случаев

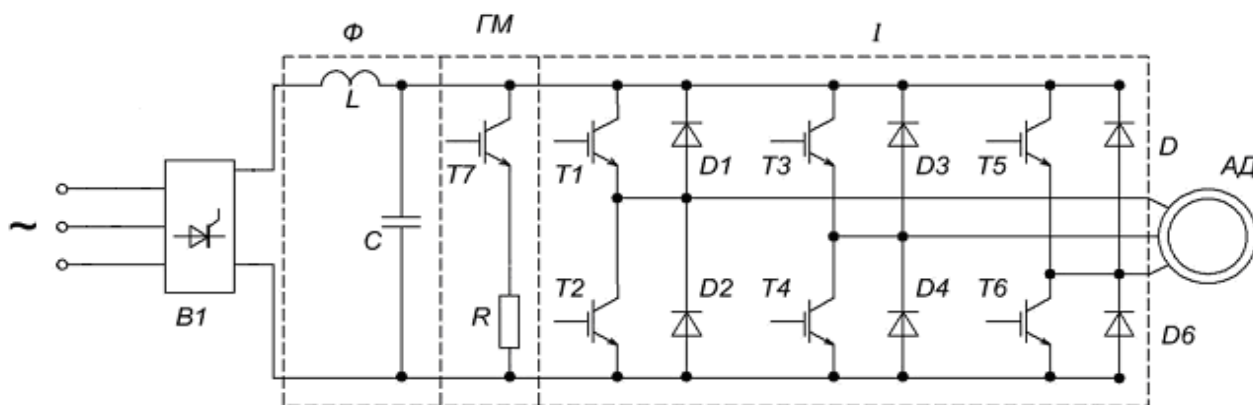


Рис.1. Схема части АИН с ШИМ

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. 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 и вместо диодного выпрямителя использовать преобразователь с двухсторонней проводимостью на основе АИН с ШИМ.

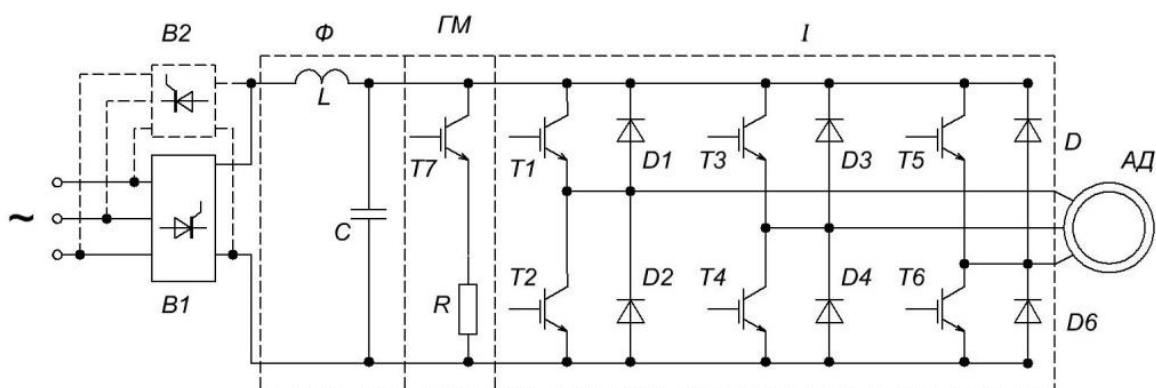


Рис.2. Схема силовой части АИН с ШИМ

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 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.

Двухсторонний обмен энергии между двигателем и сетью в преобразователях частоты на основе АИН с ШИМ может достигаться применением вместо реверсивного управляемого выпрямителя (мосты В1 и В2 рис. 2) активного выпрямителя (АВ), который исполняется по идентичной схеме с АИН с ШИМ.(рис.3)

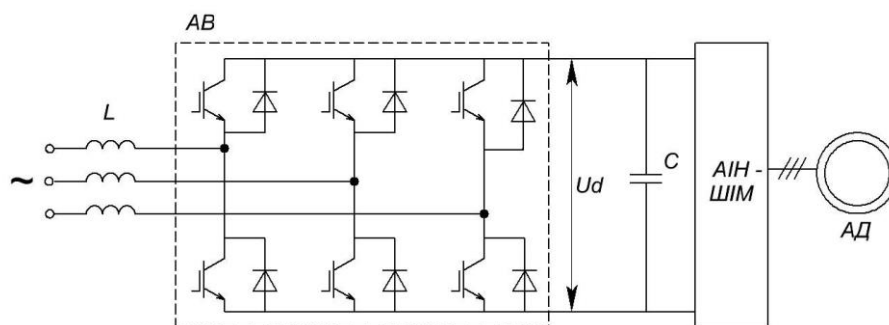


Рис.3. Схема силовой части двухзвенного преобразователя частоты на основе АИН с ШИМ с активным выпрямителем АВ



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].

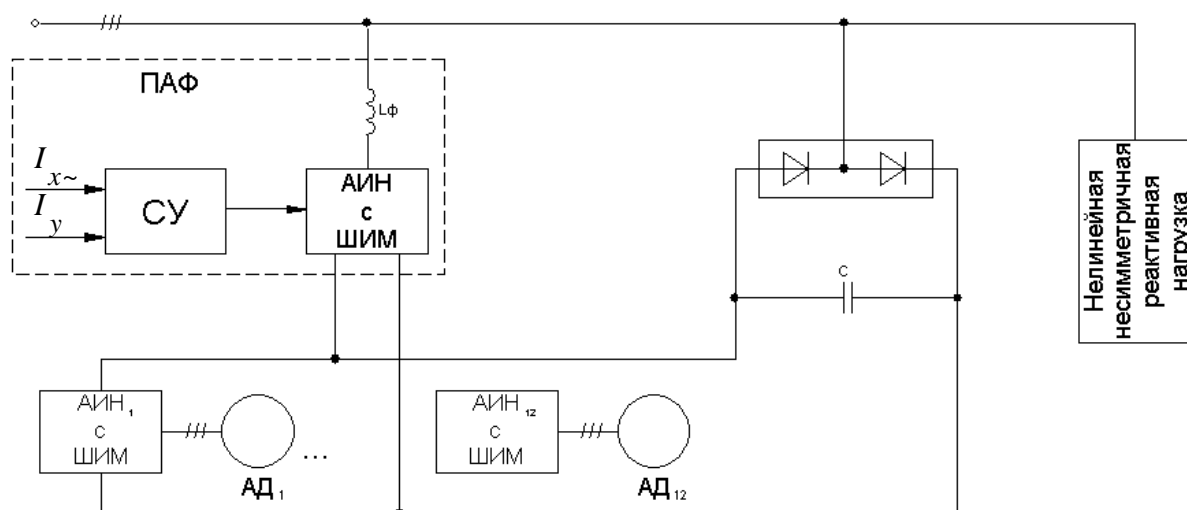


Рис. 4. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системе группового питания электроприводов с емкостным накопителем энергии: В – диодный выпрямитель; С – емкостной накопитель электроэнергии; СУ – система релейно-векторного управления; ПАФ – параллельный активный фильтр;  $I_{x\sim}$ ,  $I_y$  – переменная и полная составляющие ортогональных компонент обобщённого вектора тока в синхронно вращающейся системе координат

В схеме рис. 4 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, как показано ниже, 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, симметрировать 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.

Непрерывный рост установленной мощности нелинейных и несимметричных потребителей с резкопеременной реактивной нагрузкой (тиристорные электроприводы прокатных станов, электрические сталеплавильные печи и др.) значительно обострил проблему обеспечения основных нормативных показателей качества электроэнергии. Наиболее неблагоприятными для большинства потребителей являются: колебания и длительные отклонения действующего значения напряжения; искажение формы кривой тока и напряжения; кратковременные провалы напряжения и его асимметрия.

При отклонениях показателей качества электроэнергии, превышающих нормируемые стандартами значения, нормальная работа электрооборудования либо вообще невозможна, либо может быть обеспечена ценой значительного снижения нагрузок. Отклонение напряжения от нормы и искажение его формы приводят к дополнительным потерям в электросетях и электроприёмниках, что снижает их долговечность, эффективность передачи и потребления электроэнергии. Так, например, срок службы асинхронного двигателя при несимметрии напряжения в 4% и номинальной нагрузке сокращается в два раза [1].

Тенденция развития силовой преобразовательной техники такова, что доля высших гармоник в электросетях с каждым годом будет увеличиваться. Наличие высших гармоник вызывает дополнительный нагрев электродвигателей, вибрации, шумы, а также нарушает электромагнитную совместимость потребителей, связанных общей сетью.

Электроприводы потребляют значительную часть вырабатываемой электроэнергии. Поэтому важное значение приобретают вопросы

комплексного подхода к разработке и практическому применению методов и средств энергосбережения и гибкого управления традиционными показателями качества электроэнергии средствами промышленного электропривода, где имеются огромные резервы.

## 1. Обоснование выбора емкости накопительных конденсаторов в системах группового питания электроприводов

Целью данного раздела является обоснование выбора емкости конденсаторных накопителей электроэнергии в системах группового питания электроприводов от общих питающих шин постоянного тока.

В системах группового питания электроприводов накопительные конденсаторы в звене постоянного тока, включенные на выходе выпрямителя (рис.1.1) служат для обмена энергией между электроприводами, работающими в различных режимах, а также для аккумулирования энергии рекуперативного торможения группы приводов и электромагнитной энергии, запасенной в обмотках машин. Последний случай имеет место как при очередной коммутации ключей инвертора, так и в аварийных режимах, когда закрываются все ключи инвертора и накопленная энергия в обмотках двигателя, разряжаясь через обратные диоды и конденсатор, увеличивает его напряжение.

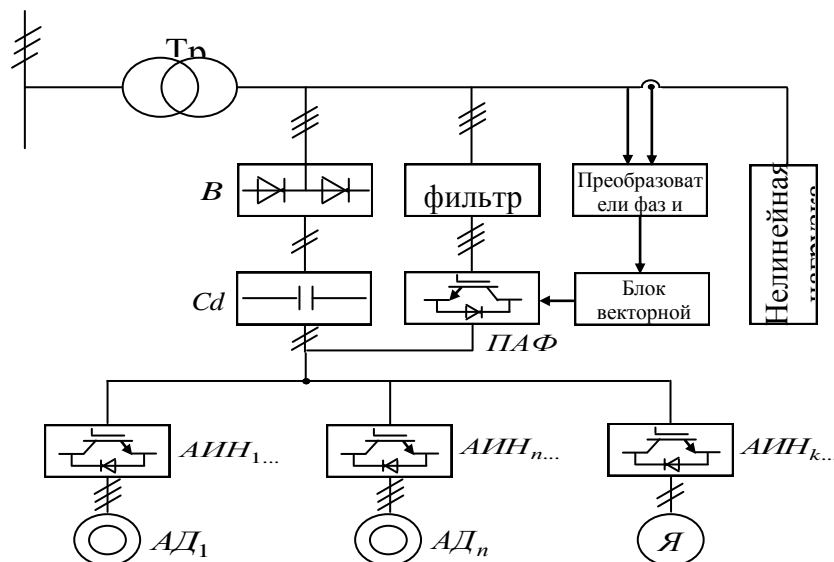


Рис.1. Функциональная схема управления качеством

В системах индивидуального электропривода с питающими шинами переменного тока, силовые блоки которых содержат выпрямитель и инвертор, допускается увеличение напряжения в звене постоянного тока на 15% от

максимально выпрямленного напряжения  $U_{d0} = 2,34U_{\phi}$  [7].

В системах группового питания электроприводов от общих шин постоянного тока и наличии параллельного активного фильтра, предназначенного для управления качеством электроэнергии, напряжение на конденсаторе может неконтролируемо увеличиваться при избыточной энергии рекуперативного торможения группы приводов лишь в течение времени запаздывания  $T_{\mu}$  АИН, которое обычно принимается равным 0,001–0,002с [7, 8].

Более жесткие требования следует предъявлять к допустимому снижению напряжения в звене постоянного тока. Это обусловлено снижением статических и динамических показателей электропривода, а в ряде случаев нарушением технологического процесса, например, вследствие уменьшения требуемой угловой скорости двигателя при номинальном потоке.

Рассмотрим требуемое значение емкости накопительного конденсатора для аккумулирования избыточной энергии рекуперативного торможения. Если в процессе работы электропривода угловая скорость изменяется от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ , то отдаваемая кинетическая энергия составляет

$$\Delta W = J(\omega_1^2 - \omega_2^2)/2, \quad (1.1)$$

где  $J$  – суммарный приведенный момент инерции привода.

По отношению к исходному запасу кинетической энергии это составляет

$$\frac{\Delta W}{W} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2} = \omega^* (2 - \omega^*), \quad (1.2)$$

где  $\omega^* = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$  – относительное снижение угловой скорости.

Из приведенного выражения видно, что процесс отдачи накопленной кинетической энергии происходит непропорционально скорости и в конце процесса торможения отдача незначительная.

При линейном законе изменения скорости в процессе торможения текущее значение скорости  $\omega_2$  по истечении времени запаздывания  $T_{\mu}$  ПАФ составляет

$$\omega_2 = \omega_1 - \frac{\omega_1}{t_m} T_{\mu}, \quad (1.3)$$

где  $t_m$  – время торможения привода.

Отдаваемая при этом энергия в процессе торможения

$$W_m = \frac{J}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{J}{2}[\omega_1^2 - (\omega_1 - \frac{\omega_1 T_\mu}{t_m})^2] = \frac{J\omega_1^2 T_\mu}{2t_m}(2 - T_\mu/t_m). \quad (1.4)$$

Обычно  $t_m \gg T_\mu$ , поэтому выражение (4) можно представить в виде

$$W_m = \frac{J\omega_1^2}{t_m} T_\mu = \omega_1 T_\mu (M_m + M_c), \quad (1.5)$$

где  $t_m = J\omega_1/(M_m + M_c)$  – время торможения;  $M_m, M_c$  – тормозной момент двигателя и момент сопротивления.

Полагая, что торможение начинается с  $\omega_1 = \omega_n$  при моменте сопротивления  $M_c = M_n$ , имеем из (1.5)

$$W_m = T_\mu (\lambda + 1) P_n, \quad (1.6)$$

где  $\lambda = M_m / M_n$  – отношение тормозного момента к номинальному, предельное значение которого соответствует перегрузочной способности двигателя.

Пренебрегая потерями, условие равенства отдаваемой кинетической энергии и энергии, запасаемой в конденсаторе, можно представить в виде

$$T_\mu (\lambda + 1) P_n = 0,5 C_d [(U_d + \Delta U)^2 - U_d^2] = 0,5 C_d (2U_d \Delta U + \Delta U^2), \quad (1.7)$$

где  $U_d$  и  $\Delta U$  – начальное значение напряжения на конденсаторе и его превышение.

Согласно приведенного выражения

$$C_d = \frac{T_\mu (\lambda + 1) P_n}{0,5 \Delta U_{don} (2U_d + \Delta U_{don})}. \quad (1.8)$$

Так, например, при  $U_d = 500$  В,  $\Delta U_{don} = 0,1U_d$ ,  $T_\mu = 0,001$  с на 1 кВт мощности двигателя требуется накопительный конденсатор емкостью

$$C_d \approx 35(\lambda + 1) \text{ мкФ}, \quad (1.9)$$

что при  $\lambda = (3,0 - 3,5)$  составляет (150–175) мкФ.

В системах группового питания электроприводов с общим входным

выпрямителем на входе выражение (1.8) можно представить в виде

$$C_d = \frac{T_\mu \Delta P_m}{0,5 \Delta U_{\text{дон}} (2U_d + \Delta U_{\text{дон}})}, \quad (1.10)$$

где  $\Delta P_m$  – избыточная мощность рекуперативного торможения над потребляемой.

Энергию, генерируемую двигателем в аварийном режиме при снятии управляющих импульсов с ключей инвертора, можно без большой погрешности определить в предположении постоянства потокосцепления ротора [9]. При этом в течение проводящего состояния обратных диодов, изменяющиеся по величине токи статора и ротора поддерживают потокосцепление ротора неизменным.

Непосредственно перед снятием управляющих импульсов с ключей инвертора потокосцепления статора  $\Psi_{10}$  и ротора  $\Psi_{20}$  в синхронно вращающейся системе координат определяются так:

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_{10} &= L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}; \\ \bar{\Psi}_{20} &= L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где  $\bar{I}_{10}, \bar{I}_{20}$  – результирующие векторы токов статора и ротора перед закрытием ключей инвертора;  $L_1, L_2, L_m$  – полная индуктивность статора, ротора и их взаимоиндуктивность, найденная с учетом действия трех фаз двигателя.

После запираания обратных диодов  $\bar{I}_1 = 0$  и, следовательно, согласно (1.11) имеем

$$\bar{\Psi}_1 = L_m \bar{I}_2; \bar{\Psi}_2 = L_2 \bar{I}_2, \quad (1.12)$$

где  $\bar{I}_2$  – результирующий вектор тока ротора после запираания обратных диодов.

Согласно приведенным выражениям

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_2 L_m / L_2 = \bar{\Psi}_2 K_2. \quad (1.13)$$

А так как потокосцепление ротора остается неизменным, то

$$\bar{\Psi}_1 = \bar{\Psi}_{20} K_2, \quad (1.14)$$

где  $K_2 = L_m / L_2$  – коэффициент магнитной связи ротора.

В течение времени проводящего состояния обратных диодов векторная диаграмма потокосцеплений статора и ротора может быть представлена, как показано на рис. 1.2.

В общем случае запасенная электромагнитная энергия перед снятием управляющих импульсов определяется как скалярное произведение соответствующих векторов [9]

$$W_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\bar{\psi}_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{\psi}_{20} \bar{I}_{20}^*], \quad (1.15)$$

где  $\bar{I}_{10}^*, \bar{I}_{20}^*$  – сопряженные результирующие векторы токов статора и ротора до снятия управляющих импульсов.

После запираания ключей  $\bar{I}_1 = 0; \bar{\Psi}_2 = \bar{\Psi}_{20}$  и, следовательно, запасенная энергия становится равной

$$W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \bar{\psi}_{20} \bar{I}_2^*. \quad (1.16)$$

Изменение магнитной энергии

$$W = W_0 - W_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} [\bar{\Psi}_{10} \bar{I}_{10}^* + \bar{\Psi}_{20} (\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)]. \quad (1.17)$$

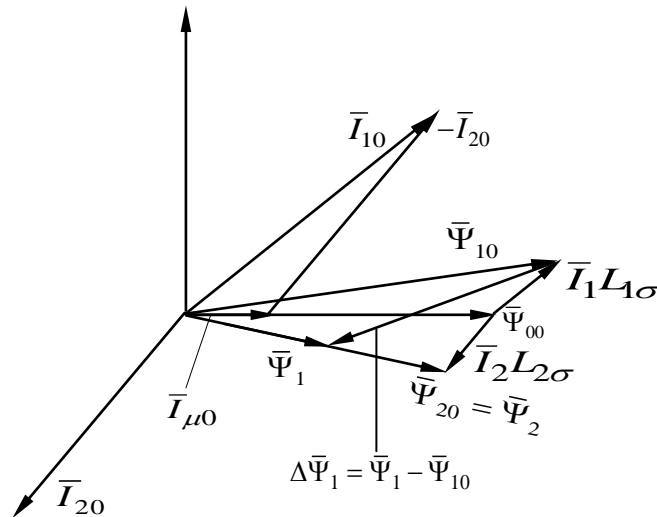


Рис. 1.2. Векторная диаграмма потокосцепления статора и ротора до и после запираания ключей инвертора

Разность  $(\bar{I}_{20}^* - \bar{I}_2^*)$  в выражении (1.17) может быть найдена на основании постоянства потокосцепления ротора  $L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20} = L_2 \bar{I}_2$ , откуда



$$\bar{I}_{20} - \bar{I}_2 = \bar{I}_{10} L_m / L_2 = -\bar{I}_{10} K_2. \quad (1.18)$$

С учетом выражений (1.17) и (1.18) имеем:

$$\Delta W = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \left[ (L_1 \bar{I}_{10} + L_m \bar{I}_{20}) \bar{I}_{10}^* - (L_m \bar{I}_{10} + L_2 \bar{I}_{20}) \frac{L_m}{L_2} \bar{I}_{10}^* \right] = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} \bar{I}_{10}^2 L_{1n}, \quad (1.19)$$

где  $L_{1n} = L_1 - L_m^2 / L_2$  – переходная индуктивность обмотки статора.

Следовательно, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в аварийном режиме при запираии ключей инвертора в отношении изменения магнитной энергии может рассматриваться как катушка с индуктивностью, равной  $\frac{3}{2} L_{1n}$ .

В системах группового питания электроприводов в уравнение (1.19) следует подставлять суммарную переходную индуктивность  $L_{n1\Sigma}$  обмоток статора и суммарный ток  $I_{1\Sigma}$ , потребляемый двигателями. При этом по аналогии с уравнениями (1.7) и (1.8) получим выражение для расчета емкости накопительного конденсатора для аккумуляирования электромагнитной энергии при аварийном снятии управляющих импульсов с ключей инверторов:

$$C_d = \frac{3}{2} \frac{I_{1\Sigma}^2 L_{n1\Sigma}}{\Delta U_{don} (2U_d + \Delta U_{don})}. \quad (1.20)$$

В расчетах нужно принимать большее из значений, найденных по выражениям (1.10) и (1.20).

### Выводы

1. В системах группового питания регулируемых электроприводов от общих питающих шин постоянного тока емкость накопительного конденсатора может быть определена на основании равенства избыточной энергии рекуперативного торможения над потребляемой и энергии, запасаемой в конденсаторе в течение времени неуправляемого заряда емкости, равного времени запаздывания системы ПАФ.

2. В отношении изменения электромагнитной энергии асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в аварийном режиме при запираии ключей инвертора может рассматриваться как катушка с индуктивностью, которая в 1,5 раза больше переходной индуктивности обмотки статора.

2. Формирование управляющего параметра ПАФ для компенсации реактивной мощности и мощности искажения.

## 2. Формирование управляющего параметра ПАФ для компенсации реактивной мощности и мощности искажения.

Любые переменные трёхфазной системы, например ток нагрузки, который удовлетворяет условию

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

может быть представлен в двухмерном пространстве обобщённым (результатирующим) вектором [9]

$$\bar{I} = \frac{2}{3} \cdot (i_A + i_B e^{j \cdot 120^\circ} + i_C e^{j \cdot 240^\circ}), \quad (2.1)$$

где  $2/3$  – масштабирующий коэффициент, найденный из условия инвариантности мощности трёхфазной и двухфазной систем;  $i_A, i_B, i_C$  – мгновенные значения токов;  $\bar{\alpha} = e^{j \cdot 120^\circ}$ ;  $\bar{\alpha}^2 = e^{j \cdot 240^\circ}$  – единичные векторы, сдвигающие фазу в положительном направлении на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ .

Результатирующий вектор тока, созданный токами трёх фаз, можно разложить в неподвижной ортогональной системе координат  $\alpha, \beta$  на вещественную  $I_\alpha$  и мнимую  $I_\beta$  составляющие:

$$\bar{I} = I_\alpha + j \cdot I_\beta, \quad (2.2)$$

где

$$I_\alpha = \text{Re}(\bar{I}); I_\beta = \text{Im}(\bar{I}) = \text{Re}(-j \cdot \bar{I}) \quad (2.3)$$

Обычно координатная ось  $\alpha$  совмещается с осью фазы А и располагается вертикально или горизонтально. Положительное направление мнимой оси опережает ось  $\alpha$  на  $90^\circ$ . Оси фаз В и С повернуты относительно фазы А на  $120^\circ$  соответственно в положительном и отрицательном направлениях. При этом проекции результирующего вектора на эти оси дают мгновенные значения фазных токов.

Аналитическую зависимость составляющих  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  от мгновенных значений фазных токов трёхфазной системы можно установить, подставив в (2.3) значение обобщённого вектора из (2.1):

$$I_\alpha = \operatorname{Re}(\bar{I}) = \operatorname{Re}\left[\frac{2}{3}\left(i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \bar{\alpha}^2 \cdot i_C\right)\right] = \frac{2}{3}\left(i_A - \frac{i_B + i_C}{2}\right); \quad (2.4)$$

$$I_\beta = \operatorname{Im}(\bar{I}) = \operatorname{Im}\left[\frac{2}{3}\left(i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \bar{\alpha}^2 \cdot i_C\right)\right] = \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}. \quad (2.5)$$

В случае если  $i_A + i_B + i_C = 0$ , то  $I_\alpha = i_A$ , что непосредственно вытекает из определения обобщённого вектора, проекции которого на оси фаз равны мгновенным значениям фазных токов. Поскольку ось  $\alpha$  совпадает с осью фазы А, то всегда  $I_\alpha = I_a$ .

Мгновенные значения фазных токов в функции составляющих  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  определяются с учётом (2.4) и (2.5) с помощью выражений:

$$i_A = i_\alpha; \quad i_B = -\frac{I_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta; \quad i_C = -\frac{I_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta. \quad (2.6)$$

В трёхфазных симметричных системах при отсутствии нулевых составляющих токов мгновенное значение мощности определяется как скалярное произведение обобщённого (результатирующего) вектора напряжения сети  $\bar{U}$  и сопряжённого вектора тока  $\bar{I}^*$  [9]

$$p = \frac{3}{2} [\bar{U} \bar{I}^*]. \quad (2.7)$$

Подставляя в (2.7) вместо  $\bar{U}$  и  $\bar{I}^*$  их зависимости:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \frac{2}{3} [u_A + \bar{\alpha} u_B + \bar{\alpha}^2 u_C]; \\ \bar{I}^* &= \frac{2}{3} [i_A + \bar{\alpha}^2 i_B + \bar{\alpha} i_C], \end{aligned} \quad (2.8)$$

получим выражение мгновенной мощности в виде

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}\left[\frac{2}{3}\left(u_A + \bar{\alpha} u_B + \bar{\alpha}^2 u_C\right) \frac{2}{3}\left(i_A + \bar{\alpha}^2 i_B + \bar{\alpha} i_C\right)\right] = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C, \quad (2.9)$$

откуда следует, что с помощью обобщённых векторов можно контролировать мгновенное значение мощности для любых в функции времени переходных процессов токов и напряжений при одном лишь условии – отсутствие нулевой составляющей тока.

Если в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  обозначить углы между осью  $\alpha$  и обобщёнными векторами напряжения и тока соответственно  $\varphi_u$  и  $\varphi_i$  (Рис 2.1), то выражения для векторов напряжения и сопряжённого тока можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= U_\alpha + jU_\beta = U_m \cos \varphi_u + jU_m \sin \varphi_u; \\ \bar{I}^* &= I_\alpha - jI_\beta = I_m \cos \varphi_i - jI_m \sin \varphi_i,\end{aligned}\quad (2.10)$$

где  $U_m, I_m$  - модули соответствующих векторов, равные амплитудным значениям разных напряжений и токов.

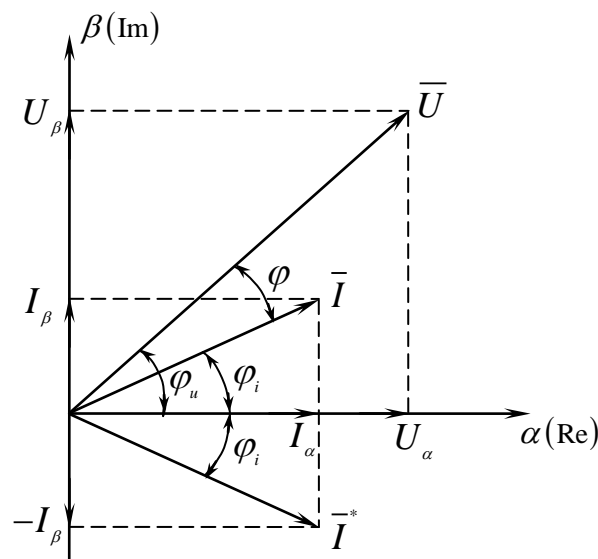


Рис. 2.1 К расчёту мгновенной мощности с помощью обобщённых векторов

С учётом (2.10) выражение для мгновенной мощности (2.7) имеет вид:

$$p_{\alpha,\beta} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{U}_{\alpha,\beta} \bar{I}_{\alpha,\beta}^* \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ (U_m \cos \varphi_u + jU_m \sin \varphi_u) (I_m \cos \varphi_i - jI_m \sin \varphi_i) \right] \quad (2.11)$$

В приведенном выражении действительная составляющая соответствует среднему значению мгновенной мощности, т.е. активной

$$P = \frac{3}{2} U_m I_m (\cos \varphi_u \cos \varphi_i + \sin \varphi_u \sin \varphi_i) = \frac{3}{2} U_m I_m \cos(\varphi_u - \varphi_i) = 3UI \cos \varphi, \quad (2.12)$$

а мнимая составляющая

$$\frac{3}{2} U_m I_m (\sin \varphi_u \cos \varphi_i - \cos \varphi_u \sin \varphi_i) = 3UI \sin \varphi = Q \quad (2.13)$$

характеризует реактивную мощность.

Приведенные выражения (2.12) и (2.13) можно записать как

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{3}{2}(U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_\beta); \\
 Q &= \frac{3}{2}(U_\beta I_\alpha + U_\alpha I_\beta),
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\beta & -U_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix},
 \tag{2.15}$$

что соответствует методу  $I_\alpha, I_\beta$  теории мгновенной мощности [10, 11].

В трёхфазной симметричной системе синусоидальных величин обобщённые вектора в плоскости комплексного переменного представляются вектором, который равномерно вращается с угловой частотой напряжения. При этом ортогональные составляющие  $I_\alpha$  и  $I_\beta$  в (2.14) и (2.15) являются гармоническими функциями, что затрудняет использование их для построения САР качества электроэнергии на основе ПАФ. Дополнительные преимущества, с точки зрения простоты формирования управляющих воздействий, пропорциональных неактивным составляющим полной мощности, даёт переход от неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к синхронно вращающейся  $x, y$ , ориентированной по вектору напряжения сети. В этой системе координат трёхфазная синусоидальная система напряжений представляется уже неподвижным вектором с одной лишь постоянной проекцией на ось  $x$ , что упрощает реализацию и синтез регуляторов, которые работают на постоянном, а не переменном токе.

Формулы для прямого и обратного перехода от одной системы координат к другой могут быть получены на основании рис. 2.2

В неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  вектор тока (напряжения) может быть представлен в алгебраической и показательной форме

$$\bar{I}_{\alpha,\beta} = I_\alpha + jI_\beta = I_m e^{j\varphi_i}
 \tag{16}$$

Тот же самый вектор в системе вращающихся координат  $x, y$  может быть представлен, согласно обозначений рис. 3, в виде:

$$\bar{I}_{x,y} = I_x + jI_y = I_m e^{-j\varphi} = I_m e^{-j\varphi_1} e^{-j\varphi_u} = \bar{I}_{\alpha,\beta} e^{-j\varphi_u}, \quad (2.17)$$

или

$$I_x = I_\alpha \cos \varphi_u + I_\beta \sin \varphi_u;$$

$$I_y = I_\beta \cos \varphi_u - I_\alpha \sin \varphi_u,$$

где  $\varphi_u$  – угол между координатными осями,  $\bar{I}_{x,y}$ ;  $\bar{I}_{\alpha,\beta}$  – обобщённый вектор тока во вращающейся и неподвижной системе координат.

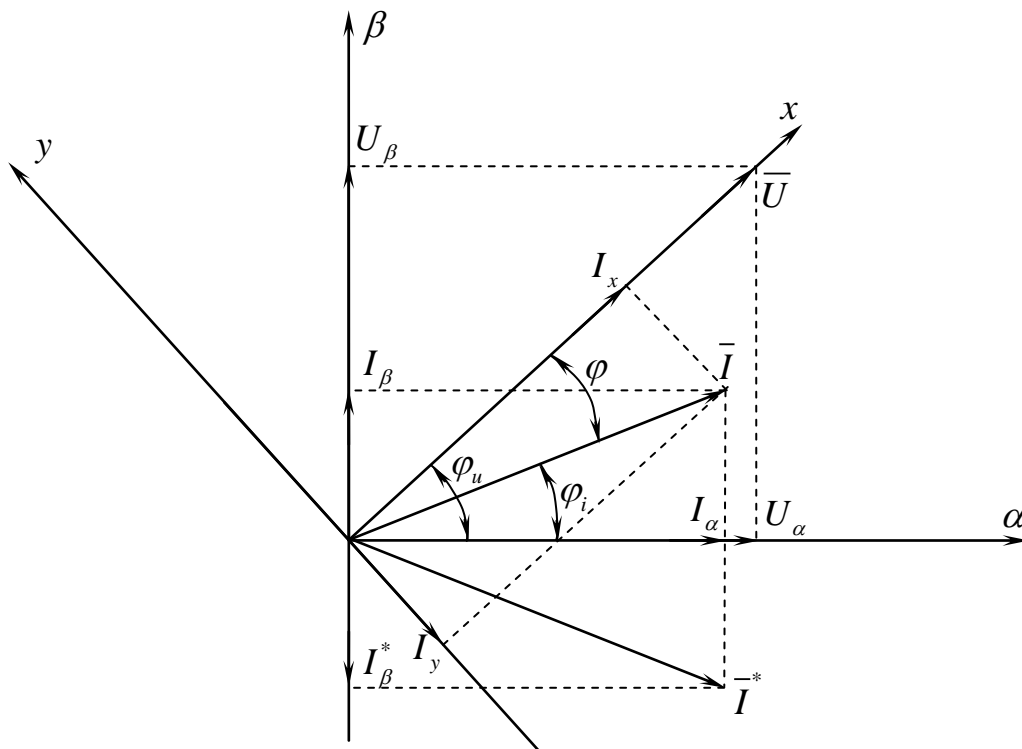


Рис. 2.2 Преобразование векторов из неподвижной системы  $\alpha, \beta$  во вращающиеся  $x, y$

Аналогичным образом можно получить выражения для обратного перехода

$$\bar{I}_{\alpha,\beta} = \bar{I}_{x,y} e^{j\varphi_u}, \quad (2.18)$$

или

$$I_\alpha = I_x \cos \varphi_u - I_y \sin \varphi_u;$$

$$I_\beta = I_x \sin \varphi_u + I_y \cos \varphi_u,$$

а также сопряжённого вектора тока

$$\begin{aligned}\bar{I}_{x,y}^* &= \bar{I}_{\alpha,\beta} e^{j\varphi_u}; \\ \bar{I}_{\alpha,\beta}^* &= \bar{I}_{x,y} e^{-j\varphi_u},\end{aligned}\quad (2.19)$$

где  $\bar{I}_{x,y}^*$ ,  $\bar{I}_{\alpha,\beta}^*$  – сопряжённые вектора тока в соответствующей системе координат.

Пространственное положение результирующего вектора напряжения сети определяется соотношениями:

$$\cos \alpha = \frac{U_\alpha}{U}; \quad \sin \alpha = \frac{U_\beta}{U}, \quad (2.20)$$

где  $U = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}$ ,  $U_\alpha$ ,  $U_\beta$  – модуль результирующего вектора и его ортогональные составляющие в неподвижной системе координат.

Во вращающейся системе координат  $x, y$ , ориентированной по вектору напряжения сети, выражение (2.11) для мгновенной мощности с учетом (2.18) и (2.19) принимает вид:

$$p_{x,y} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{U}_{\alpha,\beta} \bar{I}_{\alpha,\beta}^* \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{U}_{x,y} e^{j\varphi} \bar{I}_{x,y}^* e^{-j\varphi} \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ \bar{U}_{x,y} \bar{I}_{x,y}^* \right]. \quad (2.21)$$

Результирующие вектора во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{x,y} &= U_x = U_m; \\ \bar{I}_{x,y} &= I_x + jI_y = I_m \cos \varphi + jI_m \sin \varphi; \\ \bar{I}_{x,y}^* &= I_x - jI_y = I_m \cos \varphi - jI_m \sin \varphi,\end{aligned}\quad (2.22)$$

где  $\varphi$  – фазовый сдвиг между напряжением и током.

С учетом (2.22) выражение для мгновенной мощности (2.21) преобразуется к виду:

$$p_{x,y} = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ U_x (I_x - jI_y) \right] = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[ U_m (I_m \cos \varphi - jI_m \sin \varphi) \right], \quad (2.23)$$

действительная составляющего которого соответствует активной мощности, а мнимая – реактивной:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{3}{2} U_m I_m \cos \varphi = 3UI \cos \varphi = 3UI_x; \\
 Q &= \frac{3}{2} U_m I_m \sin \varphi = 3UI \sin \varphi = 3UI_y,
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

что соответствует методу  $I_x, I_y (I_d, I_q)$  - теории мгновенной мощности.

Полученные выражения дают такой же результат, что и (2.14) для неподвижной системы координат, так как переход от одной системы к другой не приводит к изменению угла сдвига между векторами напряжения и тока. Однако при этом значительно упрощается процедура выделения и непрерывного контроля мгновенных значений неактивных составляющих полной мощности. В линейных симметричных системах обе составляющие  $I_x$  и  $I_y$  не содержат переменных составляющих и, как следует из (2.24), пропорциональны соответственно активной и реактивной мощности. В нелинейных симметричных системах при наличии гармоник тока в обеих составляющих появляются переменные компоненты, пропорциональные мощности искажения.

Таким образом, в симметричных нелинейных системах постоянная составляющая  $I_y$  ортогональной проекции обобщённого вектора в синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, пропорциональна реактивной мощности сдвига первых гармоник тока и напряжения. При этом сумма переменных составляющих  $I_{x\sim} + I_{y\sim}$  пропорциональна мощности искажения, обусловленной несинусоидальностью кривых тока и напряжения. С учётом этого можно сформулировать обобщённый параметр минимизации неактивных составляющих полной мощности в нелинейных симметричных системах в виде:

$$I = I_y + I_{x\sim}, \tag{2.25}$$



который соответствует токам, подлежащим компенсации, и может быть использован в САР качества электроэнергии с помощью ПАФ в качестве задающего воздействия.

## 2.1. 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 [9]:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2}{3} \cdot \left( i_A - \frac{i_B + i_C}{2} \right); \\ i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_B - i_C). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Подставляя в (2.25) значения фазных токов, выраженные через симметричные составляющие прямой  $I_1$ , обратной  $I_2$  и нулевой  $I_0$  последовательностей с помощью известных соотношений :

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{3} \cdot \left( i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \bar{\alpha}^2 \cdot i_C \right); \\ i_2 &= \frac{1}{3} \cdot \left( i_A + \alpha^2 \cdot i_B + \alpha \cdot i_C \right); \\ i_0 &= \frac{1}{3} \cdot (i_A + i_B + i_C), \end{aligned} \quad (2.26)$$

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

$$i_\alpha = \frac{2}{3} \cdot \left( i_1 + i_2 + i_0 - \frac{\bar{\alpha}^2 i_1 + \bar{\alpha} i_2 + i_0 + \alpha i_1 + \alpha^2 i_2 + i_0}{2} \right) = i_1 + i_2; \quad (2.27)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left( \bar{\alpha}^2 i_1 + \bar{\alpha} i_2 + i_0 - \bar{\alpha} i_1 - \alpha^2 i_2 - i_0 \right) = -j \cdot (i_1 - i_2), \quad (2.28)$$

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

Согласно (2.28)

$$j\dot{i}_\beta = -j^2\dot{i}_1 + j^2\dot{i}_2 = \dot{i}_1 - \dot{i}_2; \quad (2.29)$$

С учётом (2.27) и (2.29) имеем:

$$\dot{i}_\alpha + j \cdot \dot{i}_\beta = \dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_1 - \dot{i}_2 = 2 \cdot \dot{i}_1; \quad \dot{i}_\alpha - j \cdot \dot{i}_\beta = 2 \cdot \dot{i}_2,$$

откуда

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{i}_\alpha + j\dot{i}_\beta}{2}; \quad \dot{i}_2 = \frac{\dot{i}_\alpha - j\dot{i}_\beta}{2}. \quad (2.30)$$

Согласно второго уравнения системы (2.26), сопряжённый вектор обратной последовательности:

$$\dot{i}_2^* = \frac{1}{3} \cdot \left( \dot{i}_A^* + \bar{\alpha} \dot{i}_B^* + \bar{\alpha}^2 \dot{i}_C^* \right). \quad (2.31)$$

При этом

$$\dot{i}_1 + \dot{i}_2^* = \frac{1}{3} \cdot \left[ \left( \dot{i}_A + \dot{i}_A^* \right) + \bar{\alpha} \left( \dot{i}_B + \dot{i}_B^* \right) + \bar{\alpha}^2 \left( \dot{i}_C + \dot{i}_C^* \right) \right] = \bar{I}, \quad (2.32)$$

так как для любой фазы, например, А

$$\operatorname{Re}(\dot{i}_A + \dot{i}_A^*) = 2 \cdot \operatorname{Re}(\dot{i}_A) = 2 \cdot i_A.$$

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

$$\bar{I}_S = \bar{I}_{S1} + \bar{I}_{S2}, \quad (2.33)$$

так и согласно (2.32) комплексов прямой последовательности  $\dot{i}_1$  тока фазы А и сопряжённого с обратной последовательностью  $\dot{i}_2^*$  того же тока. Из приведенных выражений (2.32) и (2.33) следует тождественность временных векторов  $\dot{i}_1$  и  $\dot{i}_2^*$  пространственным обобщённым векторам  $\bar{I}_{S1}$  и  $\bar{I}_{S2}$ , т.е.  $\dot{i}_1 = \bar{I}_{S1}$ ,  $\dot{i}_2^* = \bar{I}_{S2}$ . Поэтому, для графического построения обобщённого вектора сети  $\bar{I}_S$  строятся, согласно (2.26), векторы симметричных составляющих  $\dot{i}_1$  и  $\dot{i}_2$  (рис. 2.3). Оба эти временные векторы вращаются в положительном направлении с угловой скоростью  $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ . Затем строится вектор  $\dot{i}_2^*$ ,

сопряжённый с  $\dot{i}_2$ , 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. 2.3 построены также по (2.27) и (2.28) комплексные временные векторы  $\dot{i}_\alpha$  и  $\dot{i}_\beta$ , проекции которых на ось  $\alpha$  дают мгновенные значения токов  $I_\alpha$  и  $I_\beta$ .

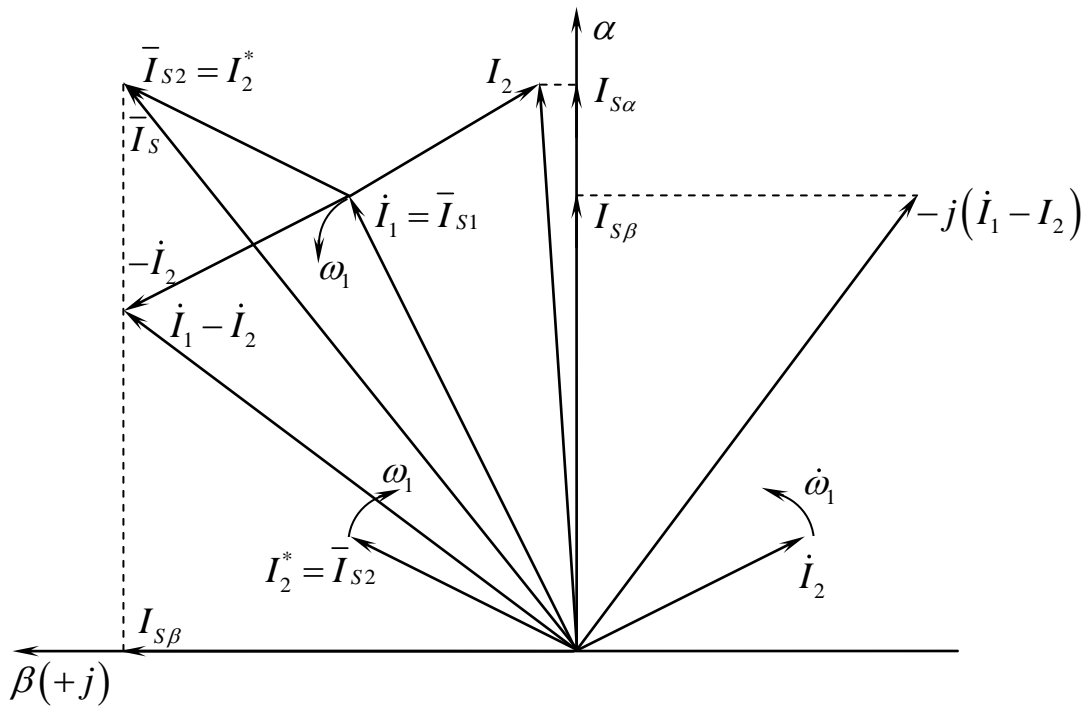


Рис. 2.3. Построение обобщённого (результирующего) вектора тока сети

$\bar{I}_S$  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  $I = \dot{I}_1^* + \dot{I}_2$  [9].

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\bar{U} \cdot \bar{I}^*] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[(\dot{U}_1 + \dot{U}_2^*) \cdot (\dot{I}_1^* + \dot{I}_2)] = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* + \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_2^* \cdot \dot{I}_1^* + \dot{U}_2^* \cdot \dot{I}_2], \quad (2.34)$$

Так как

$$\operatorname{Re}[\dot{U}_2^* I_2] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 I_2^*]; \operatorname{Re}[\dot{U}_2^* I_1^*] = \operatorname{Re}[\dot{U}_2 I_1],$$

то

$$p = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \cdot \dot{i}_1^* + \dot{U}_2 \cdot \dot{i}_2^* + \dot{U}_2 \cdot \dot{i}_1 + \dot{U}_1 \cdot \dot{i}_2], \quad (2.35)$$

В приведенном выражении составляющие

$$\frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{i}_1^*] = P_1, \quad \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_2 \dot{i}_2^*] = P_2 \quad (2.36)$$

соответствуют средней мощности прямой и обратной последовательностей, а составляющая

$$\frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{i}_2 + \dot{U}_2 \dot{i}_1] \quad (2.37)$$

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

$$\bar{i} = \frac{2}{3} \left[ (i_A + i_0) + \bar{\alpha} (i_B + i_0) + \bar{\alpha}^2 (i_C + i_0) \right] = \frac{2}{3} (i_A + \bar{\alpha} \cdot i_B + \bar{\alpha}^2 \cdot i_C), \quad (2.38)$$

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 (2.34).

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

$$P = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{U}_1 \dot{i}_1^*) + \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{U}_2 \dot{i}_2^*), \quad (2.39)$$

на которую накладывается пульсирующая с двойной частотой переменная составляющая (2.37) (рис. 2.4).

$$p_{\sim} = \frac{3}{2} \operatorname{Re}[\dot{U}_1 \dot{i}_2 + \dot{U}_2 \dot{i}_1] = 3U_1 I_2 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_2) + 3U_2 I_1 \cos(2\omega t - \psi - \varphi_1). \quad (2.40)$$

Таким образом, в трёхфазных системах с изолированной нейтралью, где отсутствуют токи нулевой последовательности, симметрирование нагрузки адекватно компенсации пульсирующей с двойной частотой мощности [12,13].

Безынерционное измерение и непрерывный контроль мгновенных значений переменной составляющей мощности двойной частоты в координатах А, В, С требует применения сложных измерительных устройств [14], 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 (2.24), 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 [15] на рис.2.5 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  $A, B, C$  к двухфазной  $\alpha, \beta$ .

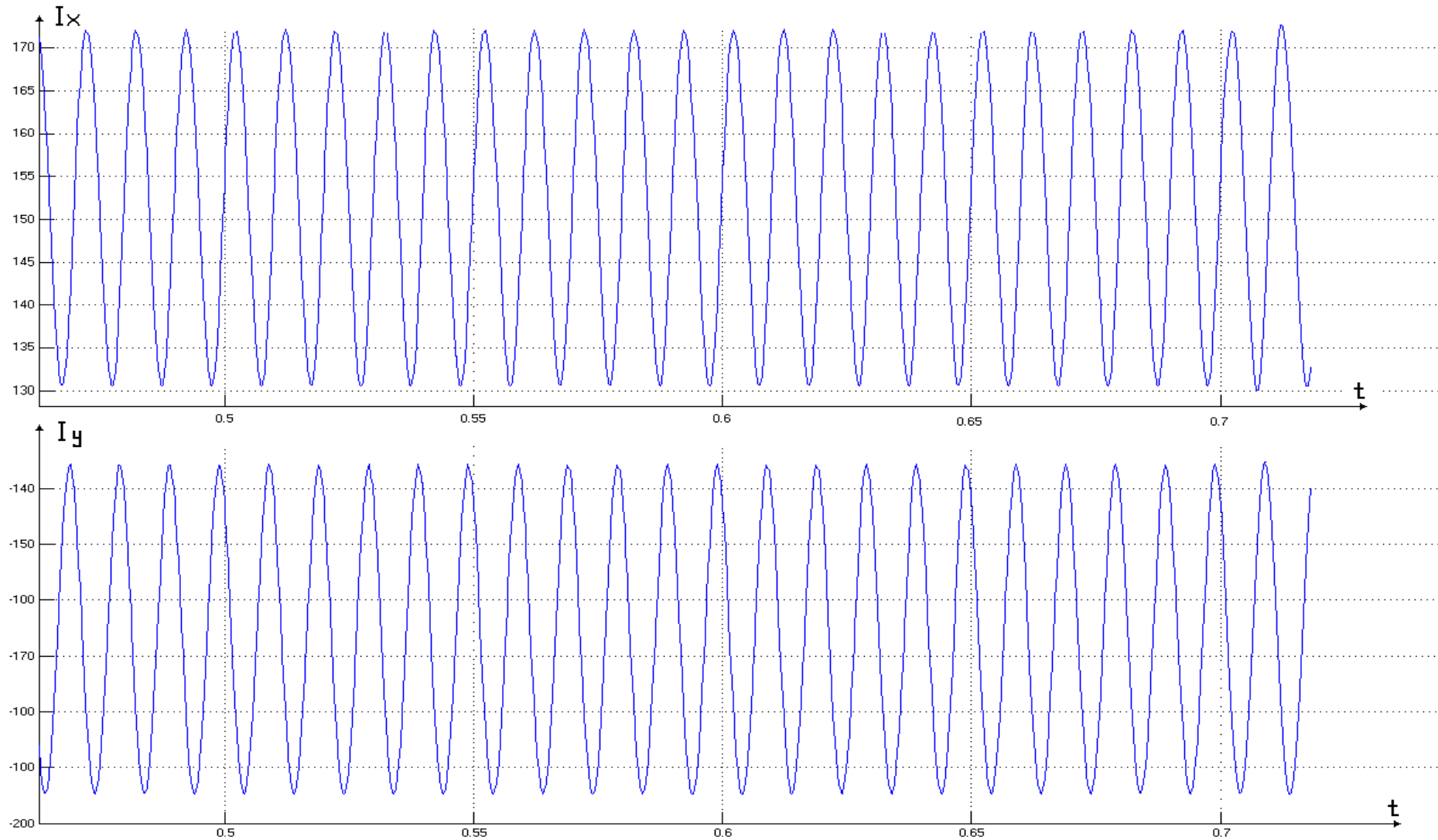


Рис. 2.4 Ортогональные составляющие  $I_x$ ,  $I_y$  обобщённого вектора тока при несимметричной нагрузке во вращающейся системе координат

Преобразователь фаз ПФЗ, реализующий зависимость (2.6)

$i_A = I_\alpha$ ;  $i_B = -\frac{I_\alpha}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta$ ;  $i_C = -\frac{I_\alpha}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta$ , предназначен для обратного перехода осей двухфазной системы к трёхфазной.

Преобразователи координат ПК1 и ПК2 (Рис 2.5), используя зависимости (2.17) и (2.18), реализует переход осей неподвижной системы координат  $\alpha, \beta$  к вращающейся  $x, y$  и наоборот.

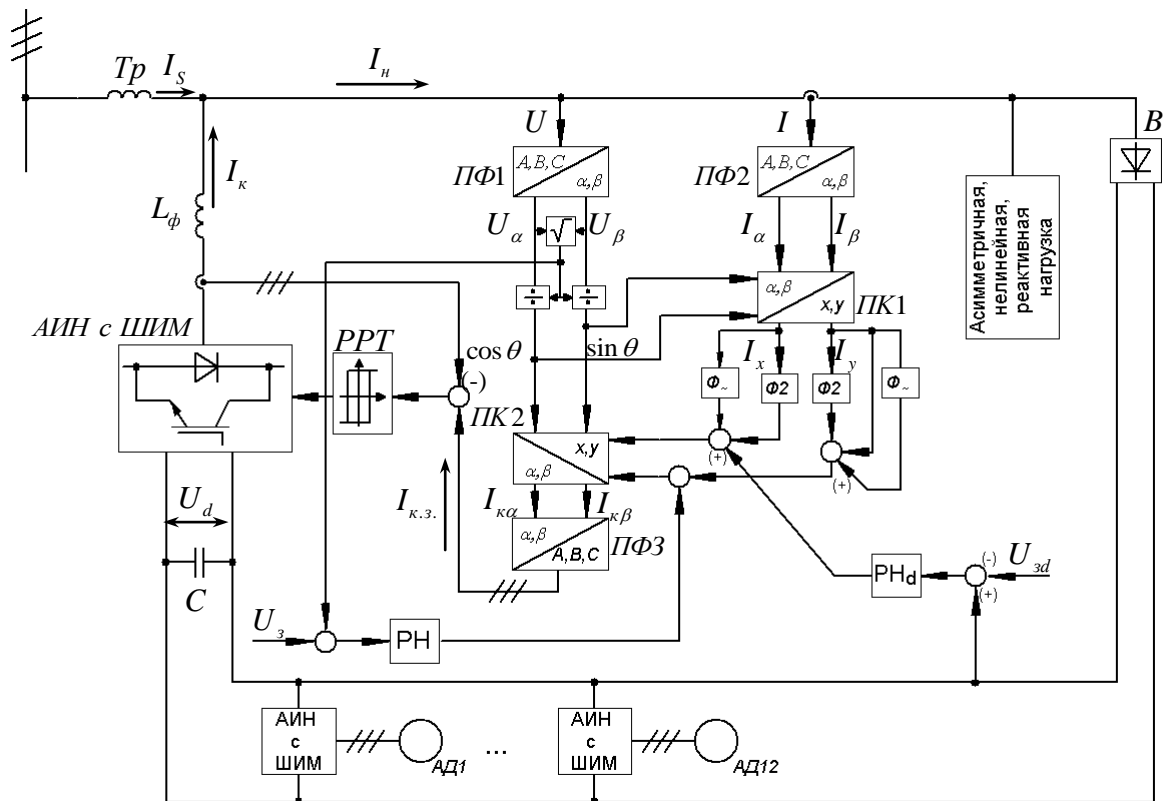


Рис. 2.5 Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями (ПФ, ПК – преобразователи фаз и координат; РРТ – релейный регулятор тока;  $\Phi_2, \Phi_-$  – фильтры для выделения переменной составляющей двойной частоты ортогональных составляющих результирующего вектора тока нагрузки; В – неуправляемый выпрямитель;  $L_\phi$  – фильтр на выходе АИН; С – накопительный конденсатор)



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 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. 2.6 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. 2.7 приведены результаты компьютерного моделирования компенсации пятой гармоники, на рис. 2.8 – седьмой, а на рис. 2.9 – 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. 2.10).

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. 2.11 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.

### 3. Влияние неактивных составляющих полной мощности на качество электроэнергии

#### 3.1 Компенсация реактивной мощности

Наличие реактивной мощности, протекающей через систему электроснабжения, и передача её через трансформаторы приводит к ряду недостатков качества сети:

- Возникают дополнительные потери активной мощности и энергии во всех элементах системы электроснабжения, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью. Так, при передаче активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей через элемент системы электроснабжения с сопротивлением  $R$  потери активной мощности составят:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2}{U^2} R + \frac{Q^2}{U^2} R = \Delta P_a + \Delta P_p \quad (3.1)$$

Дополнительные потери активной мощности  $\Delta P_p$ , вызванные протеканием реактивной мощности  $Q$ , пропорциональны ее квадрату.

- Возникают дополнительные потери напряжения, которые особенно существенны в сетях районного значения. Например,

при передаче мощностей  $P$  и  $Q$  через элемент системы электроснабжения с активным сопротивлением  $R$  и реактивным  $X$  потери напряжения составят:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} + \frac{QX}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p \quad (3.2)$$

где  $\Delta U_a$  — потери напряжения, обусловленные активной мощностью;  $\Delta U_p$  — потери напряжения, обусловленные реактивной мощностью. Относительное значение потерь напряжения в трехфазной сети (отклонение или колебание напряжения) определяется главным образом реактивной мощностью и мощностью к. з. в рассматриваемой точке сети  $S_k$ :

$$V_{(v)} = \frac{PR + QX}{3U^2} = \frac{PR/X + Q}{3U^2/X} = \frac{PR/X + Q}{S_k} \quad (3.3)$$

- Загрузка реактивной мощностью систем промышленного электроснабжения и трансформаторов уменьшает их пропускную способность и требует увеличения сечений проводов воздушных и кабельных линий, увеличения номинальной мощности или числа трансформаторов подстанций и т. п.

Уменьшение потерь активной электроэнергии обусловленных перетоками реактивных мощностей, является реальной эксплуатационной технологией энергосбережения в электрических сетях. Эффективное экономическое регулирование реактивных перетоков необходимо также для обеспечения первоочередных стандартных условий качества электрической энергии, а именно уровней напряжения на границе балансовой принадлежности электросетей.

Для каждого узла энергосистемы потребителя должно выполняться условие баланса активной и реактивной мощностей, т.е. генерируемая мощность жестко определяется ее потреблением. При нарушении в узле

баланса мощностей возникают перетоки реактивной энергии, меняется напряжение и, как следствие, возрастают потери.

По оценкам, приведенным в различных источниках, среднестатистические потери электроэнергии в сетях потребителя лежат в пределах 8-16%. Одной из основных причин таких потерь, по-прежнему, остается недостаток компенсирующих устройств. Наиболее распространенным типом компенсирующих устройств являются регулируемые конденсаторные установки (КУ). К их достоинствам можно отнести низкие потери активной мощности, простота подключения и обслуживания, возможность подключения практически в любом узле системы энергопотребления. Автоматическое регулирование мощности КУ даёт возможность компенсировать переменную реактивную нагрузку трансформаторных подстанций (ТП) предприятий, что в конечном итоге приводит к уменьшению тока в линиях передачи, уменьшению общей потребляемой мощности и позволяет реализовать наиболее экономичный режим работы сети, поддерживая отклонения напряжения на шинах ТП в допустимых пределах.

Автоматическое регулирование мощности КУ может осуществляться в зависимости от суточного графика нагрузки, по значению параметра коэффициента мощности, по уровню и знаку реактивной мощности (генерация или потребление), по току нагрузки или по нескольким параметрам одновременно (например, по времени суток, по реактивной мощности и напряжению).

В большинстве практических случаев просматривается техническая и экономическая целесообразность полной или близкой к ней компенсации реактивной мощности с регулированием по основному параметру - реактивной мощности.

Такое регулирование, как правило, совпадает с регулированием по напряжению.

В связи с компенсацией реактивной мощности необходимо также принимать во внимание качество электроэнергии. Фильтрация гармоник снижает риск технических отказов и нарушений в энергосистемах. Помехи в напряжении, являющиеся результатом, вносимым токами гармонических составляющих, вызываются преобразователями, приводами постоянного напряжения, флуоресцентными светильниками, преобразователями частоты, источниками бесперебойного питания, дуговыми печами и пр. На практике гармонические токи имеются везде. Фильтрация гармоник приносит большое количество преимуществ:

- сводятся к минимуму искажения в телекоммуникации и передаче данных;
- бесперебойно работают электронные устройства, системы контроля, преобразователи, электромоторы и генераторы;
- отсутствие резонанса, отсутствие погрешностей при измерении, снижение потерь при передаче электроэнергии;
- отсутствие риска перегрузки кабелей, случайного отключения реле или предохранителей.

### 3.2 ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ

В последнее время резко возросла доля потребителей с нелинейным характером нагрузки. Ток, потребляемый этими источниками, имеет ярко выраженный импульсный характер. Это объясняется схемными особенностями импульсных источников питания, а именно наличием сетевого выпрямителя (диодного моста) и сглаживающего емкостного фильтра. При приближении кривой питающего напряжения к максимальному значению электронные вентили диодного моста скачкообразно меняют свое сопротивление от бесконечности до определенного малого значения. Такой характер изменения сопротивления вентилей равносителен включению или

отключению им нагрузки. Таким образом, периодическое включение и отключение приводит к появлению коротких импульсов потребляемого тока.

Также в системах группового питания электроприводов с общим преобразователем наблюдается высокий уровень шума в сети.

Эти токи представляют собой несинусоидальный периодический сигнал, который можно представить в виде суммы постоянной величины и бесконечного ряда синусоидальных сигналов с кратными частотами.

В случаях, когда мощность нелинейных электропотребителей не превышает 10-15 %, каких-либо особенностей в эксплуатации системы электроснабжения, как правило, не возникает. При превышении указанного предела следует ожидать появления различных проблем в эксплуатации и последствий, причины которых не являются очевидными. Наличие высших гармонических составляющих в токах приводит к следующим негативным, а в ряде случаев и катастрофическим последствиям:

Возможен и весьма вероятен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий.

Это происходит вследствие их перегрузки токами третьей гармоники, когда токи в нулевых рабочих проводниках значительно превосходят токи фазных проводников, а защита от токовых перегрузок в цепях нулевых проводников не предусмотрена (п.1.3.10 ПУЭ). Необходимо также отметить ускоренное старение изоляции при повышении рабочей температуры токонесущих проводников.

Токи в нулевых рабочих проводниках могут быть большими, чем токи в фазных проводниках. Это объясняется тем, что при симметричной нагрузке фазные токи основной частоты и все высшие гармоники, за исключением высших гармоник порядка, кратного трем, образуют системы прямой и обратной последовательностей и дают в сумме нуль. Гармоники же порядка, кратного трем, образуют систему нулевой последовательности, т.е. имеют в любой момент времени одинаковые значения и фазы. Поэтому

ток в нейтральном проводе равен утроенной сумме токов высших гармоник, кратных трем. Таким образом, при несинусоидальной симметричной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет равен:

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (3.4)$$

где  $I_3, I_9, I_{15}$  - действующие значения соответствующих гармоник тока. При линейной, даже самой мощной нагрузке ток в нулевом рабочем проводнике будет меньше, чем максимальный ток в фазных проводниках. Совсем иная ситуация при наличии нелинейных нагрузок, в этом случае ток в нулевом рабочем проводнике может превышать ток в фазе более чем в 1,5 раза.

### 3.3 Искажение синусоидальности питающего напряжения

Следствием характера тока является деформация синусоиды напряжения, действующей на зажимах нагрузки. Синусоида напряжения становится "плоской" по форме, так как в момент импульса тока увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении сети:

$$u_{нагрузки}(t) = u_{сети}(t) - i(t) \cdot Z_{сети} \quad (3.5)$$

где  $u_{нагрузки}(t)$ - деформированная синусоида напряжения на зажимах нагрузки;  $u_{сети}(t)$ - синусоидальное напряжение питающей сети;  $i(t)$ - полигармонический ток нагрузки;  $Z_{сети}$  - полное сопротивление сети со стороны зажимов нагрузки.

Если предположить, что сопротивление сети относительно зажимов каждого отдельного электропотребителя равно нулю, то проблемы искажения синусоидальности напряжения не существовало бы. Но в реальности сеть для любого электропотребителя представляет собой некое сопротивление. Несинусоидальные токи, протекая по этому сопротивлению, вызывают падение напряжения на нем. В результате, на

зажимах нелинейного электропотребителя, а также на зажимах всех остальных электропотребителей, включенных параллельно ему, появляется несинусоидальное напряжение, обычно имеющее форму "плоской" синусоиды.

Рассмотрим последствия воздействия "плоской" синусоиды на импульсный источник питания:

- Снижение уровня выпрямленного напряжения;
- Увеличение тепловыделения в элементах импульсного источника питания;
- Снижение устойчивости к кратковременным провалам напряжения.

Снижение уровня выпрямленного напряжения. В течение каждого полупериода питающего напряжения сглаживающий конденсатор заряжается до амплитудного значения. В течение следующего промежутка времени он разряжается, поддерживая на достаточном уровне напряжение на шинах цепей постоянного тока. Если на зажимах импульсного источника питания действует идеальная синусоида напряжения, то конденсатор в течение части времени разряда действительно может поддерживать напряжение на достаточном уровне, так как предварительно был заряжен до необходимого амплитудного значения.

Деформация синусоиды питающего напряжения приводит к снижению значения амплитуды входного напряжения. Как следствие снижается напряжение на конденсаторе. Снижение уровня напряжения на конденсаторе, с которого осуществляется питание высокочастотного преобразователя, а далее и цепей постоянного тока, должно было бы привести к снижению уровня выпрямленного напряжения. Но в большинстве импульсных источниках питания предусмотрена система стабилизации выходного напряжения, например методом широтно-импульсного регулирования. Снижение уровня входного напряжения в



допустимых пределах не вызовет снижения уровня выходного постоянного напряжения.

Увеличение тепловыделения в элементах импульсного источника питания. При методе широтно-импульсного регулирования снижение входного напряжения вызовет увеличение длительности импульсов тока высокочастотного преобразователя по отношению к длительности пауз. Это будет означать увеличение тока, потребляемого высокочастотным преобразователем в среднем за период и увеличение скорости разряда конденсатора.

Большой ток, потребляемый высокочастотным преобразователем, означает увеличение тепловых потерь в элементах импульсного источника питания. Так, снижение входного напряжения на 10% вызовет увеличение тока на 11%, а тепловых потерь - на 23%.

Снижение устойчивости к кратковременным провалам напряжения. В случае провала или даже полного исчезновения напряжения на зажимах импульсного источника питания, цепи постоянного тока могут продолжать свою нормальную работу в течение некоторого очень короткого промежутка времени. Энергия, необходимая для работы в течение этого промежутка времени - это энергия сглаживающего конденсатора. Несмотря на то, что этот конденсатор обладает весьма большой емкостью, запасаемая им энергия зависит еще и от напряжения, до которого он был первоначально заряжен:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (3.5)$$

При синусоидальной форме кривой питающего напряжения, конденсатор может зарядиться до напряжения большего, чем он может зарядиться при "плоской" форме питающего напряжения. Таким образом, запасаемая в конденсаторе энергия при синусоидальном напряжении будет больше, чем при "плоском". Для поддержания нормальной работы цепей

постоянного тока до момента восстановления питающего напряжения в случае его кратковременного провала или исчезновения, запасенной в конденсаторе энергии может не хватить. Очевидно, что вероятность такого события повышается при "плоской" синусоиде питающего напряжения.

### **3.4 Гармоники, генерируемые нелинейной нагрузкой, создают дополнительные потери в трансформаторах.**

Эти потери могут привести к значительным потерям энергии и быть причиной выхода из строя трансформаторов вследствие перегрева.

Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву и уменьшению срока его службы.

Зависимость срока службы трансформатора от нагрева его частей не позволяет при несинусоидальном токе использовать трансформатор на всю его номинальную мощность, ее приходится занижать. Например, полная загрузка трансформатора может наступить при использовании лишь 80% номинальной мощности, указанной в его паспортных данных. Превышение данного уровня приведет к очень быстрому снижению срока службы трансформатора, так как будет превышен предел температуры. Превышение температуры на следующие 10 градусов сокращает срок службы трансформатора примерно в два раза. Если не учитывать превышение температуры и попытаться использовать трансформатор "в соответствии" с его номинальными данными, срок его службы вполне может сократиться с 40 лет до 40 дней.

Кроме того, высокочастотные гармоники тока являются причиной появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что также вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора.

Для линейных нагрузок, потери на вихревые токи составляют довольно малую долю в общих потерях (приблизительно 5%). С нелинейной нагрузкой они становятся более значительными и иногда возрастают в 15-20 раз. В условиях несинусоидальности тока ухудшаются условия работы батарей конденсаторов. Батареи конденсаторов предназначены для компенсации реактивной мощности нагрузки, то есть для повышения коэффициента мощности электроустановок. Однако в условиях несинусоидальности тока батареи конденсаторов одновременно являются элементами, абсорбирующими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте:

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi k f_0 C} \quad (3.6)$$

где  $f_0$  - основная частота, Гц;  $k$  - порядок гармоники;  $C$  - емкость конденсаторов.

Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя.

Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных электропотребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.

### **3.5 Сокращение срока службы электрооборудования возникает из-за интенсификации теплового и электрического старения изоляции.**

При рабочих температурах в изоляционных материалах протекают химические реакции, приводящие к постепенному изменению их изоляционных и механических свойств. С ростом температуры эти процессы ускоряются, сокращая срок службы оборудования. В конденсаторах потери энергии пропорциональны частоте  $\Delta P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$ , поэтому несинусоидальный ток приводит к дополнительному нагреву конденсаторов. В электрических машинах токи нулевой последовательности создают дополнительное подмагничивание стали, что приводит к ухудшению их характеристик и дополнительному нагреву сердечников (статоры асинхронных двигателей, магнитопроводы трансформаторов).

Сущность электрического старения заключается в возникновении так называемых частичных разрядов, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка, например частичные разряды в газовых включениях. Частичные разряды связаны с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействия на окружающий диэлектрик. В результате развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к увеличению диэлектрических потерь и, в конечном счете, к сокращению срока службы.

### **3.6 Необоснованное срабатывание предохранителей и автоматических выключателей**

Это происходит вследствие дополнительного нагрева внутренних элементов защитных устройств, обусловленного протеканием несинусоидальных токов, и, следовательно, действием поверхностного эффекта и эффекта близости.

### **3.7 Помехи в сетях телекоммуникаций могут возникать там, где силовые кабели и кабели телекоммуникаций расположены в относительной близости.**

Вследствие протекания в силовых кабелях высокочастотных гармоник тока, в кабелях телекоммуникаций могут наводиться помехи. Магнитные поля высших гармоник прямой и обратной последовательности частично компенсируют друг друга, поэтому наибольшую роль в проблеме влияния на телекоммуникации играют гармоники, кратные трем. Чем выше порядок гармоники, тем больше уровень помех, наведенных ими в телекоммуникационных кабелях.

## **4. Энергетические характеристики силовых активных компенсаторов в электроприводах с емкостными накопителями**

**Целью данного раздела является анализ энергетических характеристик и компенсирующих свойств САК в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями.**

В современном асинхронном электроприводе силовой полупроводниковый преобразователь частоты в большинстве случаев выполняется в виде двухзвенного преобразователя с диодным выпрямителем на входе и АИН с ШИМ. Это позволяет управлять частотой и напряжением в одном инверторе и наиболее просто реализовать требуемые законы управления асинхронным электроприводом. Однако такое построение силовой схемы преобразователя не позволяет реализовать рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть, что приводит к большим потерям энергии в приводах повторно-кратковременного режима работы с большими инерционными массами и частыми процессами пуска и торможения. Для реализации рекуперативного торможения с отдачей энергии в сеть приходится усложнять силовую схему, дополняя ее инвертором, включенным параллельно диодному выпрямителю, или использовать активные выпрямители (АВ) с двухсторонней проводимостью. Однако и в том случае имеют место дополнительные потери вследствие двухсторонней циркуляции энергии между сетью и приводами.

Функциональная схема системы группового питания электроприводов от общих силовых шин постоянного тока с емкостными накопителями и

силовым активным компенсатором (САК) неактивных составляющих полной мощности приведена на рис.4.1. Назначение элементов системы и результаты модельного исследования различных режимов работы САК приведены в разделе 2. В данной системе накопительные конденсаторы 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, и тем самым исключить энергообменные процессы между сетью и приводами и, следовательно, дополнительные потери энергии в элементах на входе системы. При этом накопленная энергия в звене постоянного тока повторно используется также для управления качеством электроэнергии с помощью САК (рис. 4.2), включенного на входе системы. Положительное направление токов в схеме рис. 4.2 соответствует режиму выпрямления. Для фильтрации напряжения на входе АИН включены сглаживающие дроссели  $L_\phi$ , которые совместно с емкостью  $C$  в звене постоянного тока определяют различные свойства и режимы работы САК. Под действием напряжения сети, например  $U_{AB}$ , и сформированного методом ШИМ напряжения  $U_{ab}$  на входе инвертора (рис. 4.2) протекает ток, пульсации которого ограничиваются входным реактором  $L_\phi$  и индуктивностью рассеяния трансформатора. Регулируя величину и фазу напряжения  $U_{ab}$  на входе инвертора можно обеспечить требуемую величину и направление тока компенсации и тем самым обеспечить заданный оптимальный коэффициент мощности и повысить эффективность использования и передачи электроэнергии.

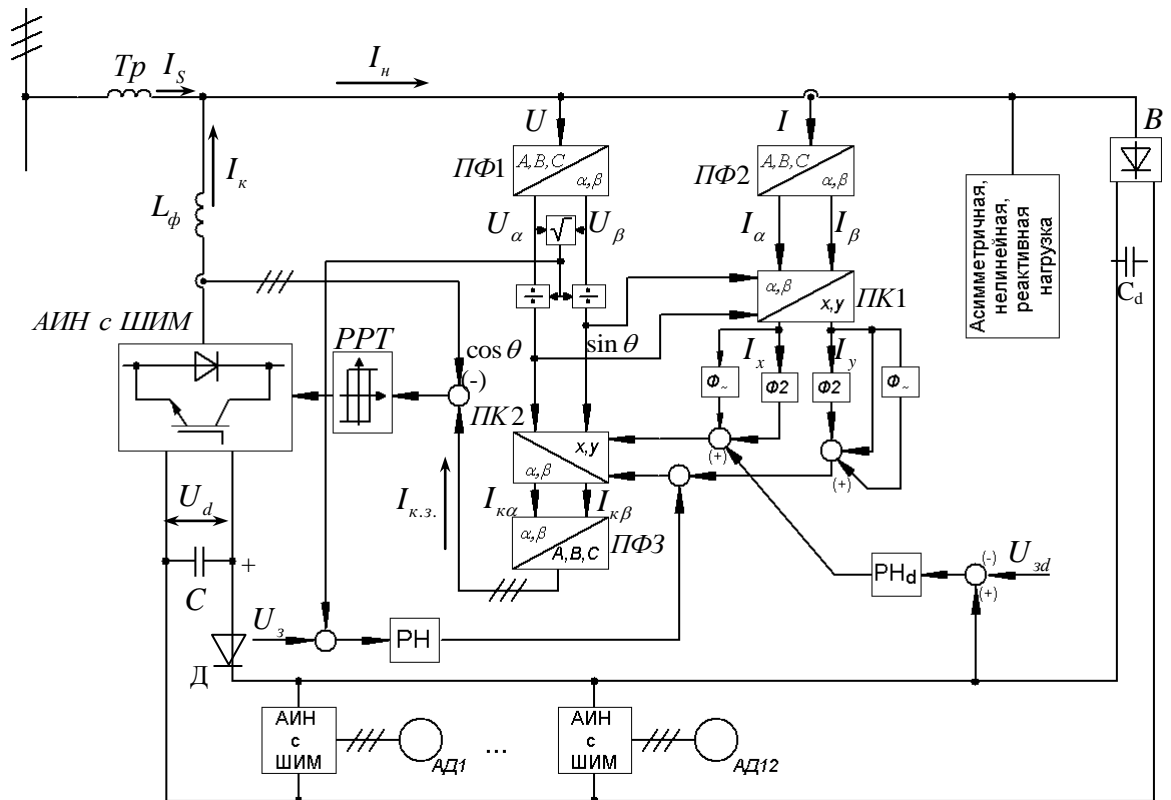


Рис. 4.1. Функциональная схема управления качеством электроэнергии в системах группового питания электроприводов с емкостными накопителями (ПФ, ПК – преобразователи фаз и координат; РРТ – релейный регулятор тока;  $\Phi_2, \Phi_{\sim}$  – фильтры для выделения переменной составляющей двойной частоты ортогональных составляющих результирующего вектора тока нагрузки; В – неуправляемый выпрямитель;  $L_{\phi}$  – фильтр на выходе АИН; С – накопительный конденсатор)

С помощью САК решается актуальная проблема повышения коэффициента мощности также за счет улучшения гармонического состава потребляемого тока (фильтрация гармоник) и симметрирования нагрузки [16].

Энергетические свойства и режимы работы САК можно проанализировать с помощью известной расчетной схемы рис. 4.3, представленной в обобщенных (результатирующих) векторах напряжения и тока. На рисунке обозначено:  $\bar{U}_c, \bar{U}_u, \bar{I}_k$  – обобщенные вектора напряжений сети и инвертора, тока компенсации, модули которых равны амплитудным значениям; X, R – индуктивное и активное сопротивления контура компенсации.

Под действием разности напряжений  $\Delta\bar{U} = \bar{U}_c + \bar{U}_u$  возникает ток компенсации  $\bar{I}_k$  (рис. 4.3, б.), отстающий от  $\Delta\bar{U}$  на  $90^\circ$ . Ортогональная составляющая  $I_{ky}$  этого тока является чисто емкостной по отношению к напряжению сети  $\bar{U}_c$  и, следовательно, реализуется режим компенсации реактивной мощности сдвига.

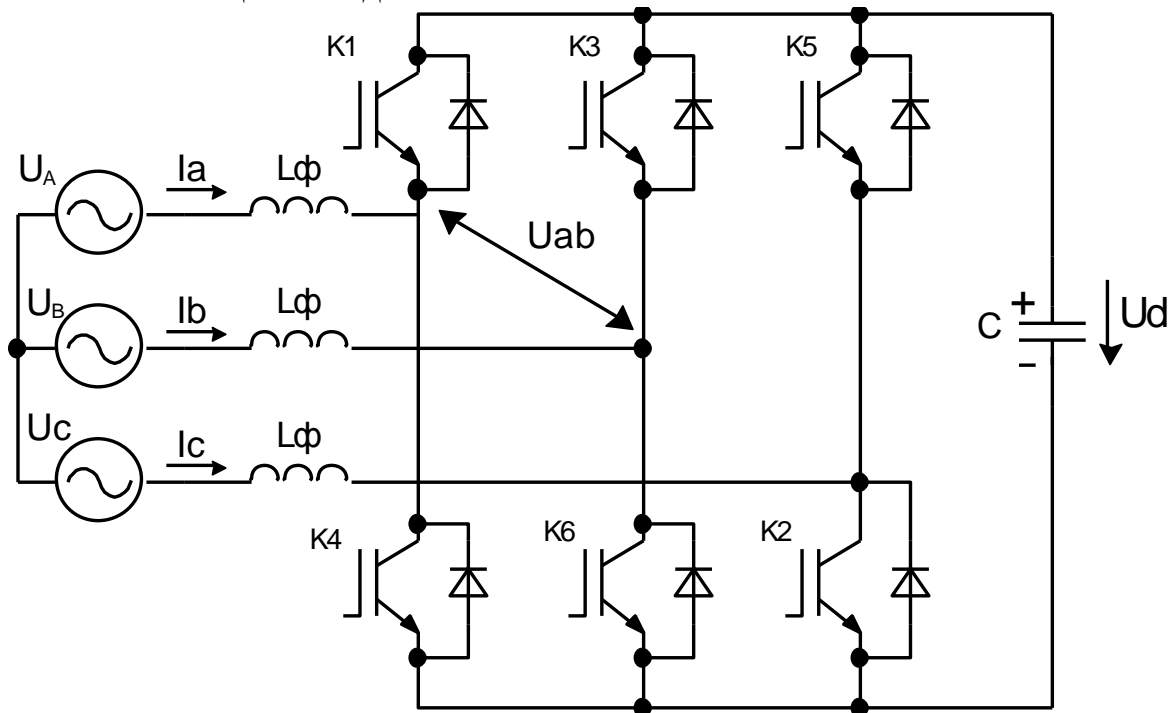


Рис. 4.2. Функциональная схема силового активного компенсатора в системах электропривода с емкостными накопителями

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.

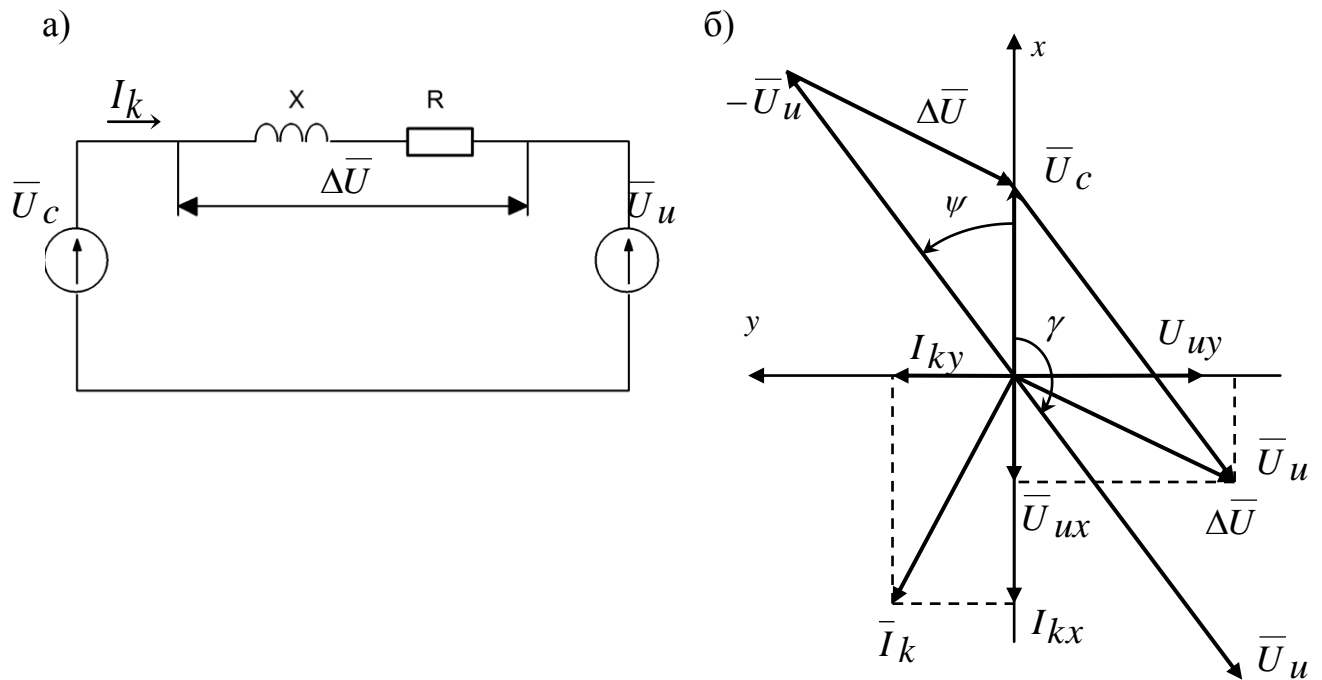


Рис. 4.3. Эквивалентная расчетная схема САК в обобщенных векторах (а) и векторная диаграмма (б) без учета потерь в контуре

Таким образом, в рассматриваемом случае реализуется режим компенсации реактивной мощности и возврата энергии в сеть. Регулируя величину и ориентацию вектора  $\bar{U}_u$  можно получить требуемое значение и ориентацию вектора  $\bar{I}_k$  тока компенсации.

В синхронно вращающейся системе координат, ориентированной по вектору напряжения сети, активная и реактивная мощность, потребляемая (генерируемая) САК, определяется как

$$P = \frac{3}{2} U_c I_{kx}; \quad Q = \frac{3}{2} U_c I_{ky}, \quad (4.1)$$

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

В общем случае при положительном фазовом сдвиге (против часовой стрелки) между векторами  $-\bar{U}_u$  и  $\bar{U}_c$  (рис. 4.3, б) гладкая составляющая результирующего вектора тока компенсации определяется как:



$$\begin{aligned}\bar{I}_k &= \frac{\Delta\bar{U}}{Ze^{j\varphi_k}} = \frac{U_c e^{j0} - U_u e^{j\psi}}{Ze^{j\varphi_k}} = \frac{U_c e^{j(0^\circ - \varphi_k)} - U_u e^{j(\psi - \varphi_k)}}{Z} = \\ &= \frac{U_c (\cos\varphi_k - j\sin\varphi_k) - U_u [\cos(\psi - \varphi_k) + j\sin(\psi - \varphi_k)]}{Z}.\end{aligned}\quad (4.2)$$

Или

$$\bar{I}_k = \frac{U_c \cos\varphi_k - U_u \cos(\psi - \varphi_k)}{Z} - \frac{j[U_c \sin\varphi_k + U_u \sin(\psi - \varphi_k)]}{Z} = I_{kx} - jI_{ky}, \quad (4.3)$$

$$\text{где} \quad I_{kx} = \frac{U_c \cos\varphi_k - U_u \cos(\psi - \varphi_k)}{Z}; \quad (4.4)$$

$$I_{ky} = \frac{U_c \sin\varphi_k + U_u \sin(\psi - \varphi_k)}{Z} \quad (4.5)$$

ортогональные составляющие тока компенсации по осям  $x$  и  $y$ ;  
 $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  – сопротивление контура компенсации;  $\varphi_k = \arctg X/R$  – фазовый сдвиг между векторами  $\Delta\bar{U}$  и  $\bar{I}_k$ .

С учетом (4.4) и (4.5) имеем из (4.1):

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

$$Q = \frac{3}{2} U_c \frac{U_c \sin\varphi_k + U_u \sin(\psi - \varphi_k)}{Z}; \quad (4.7)$$

При отрицательном фазовом сдвиге между векторами  $-\bar{U}_c$  и  $\bar{U}_u$  полученные выражения принимают вид

$$P = \frac{3}{2} U_c \frac{U_c \cos\varphi_k - U_u \cos(\psi + \varphi_k)}{Z}; \quad (4.8)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_c \frac{U_c \sin\varphi_k - U_u \sin(\psi + \varphi_k)}{Z}; \quad (4.9)$$

Пренебрегая потерями в контуре компенсации ( $\varphi_k = 90^\circ$ ), что не вносит большой погрешности, выражения (4.6) – (4.9) принимают вид:

$$P = -\frac{3}{2} U_c \frac{U_u \sin(\pm\psi)}{X}; \quad (4.10)$$

$$Q = \frac{3}{2} U_c \left( \frac{U_c - U_u \cos\psi}{X} \right). \quad (4.11)$$

Анализ полученных выражений показывает:

1. Для компенсации реактивной мощности необходимо, чтобы  $U_u \cos\psi > U_c$ . При этом согласно (4.11) генерируемая САК реактивная мощность отрицательная и по отношению к напряжению сети имеет емкостной характер (составляющая  $I_{ky}$  рис. 4.3, б опережает напряжение сети), а по отношению к инвертору – индуктивный.

2. В случае  $U_u \cos\psi > U_c$  и положительном фазовом сдвиге  $\psi$  между этими векторами происходит компенсация реактивной мощности и возврат энергии из звена постоянного тока в сеть, а при отрицательном  $\psi$  – компенсация реактивной мощности и потребление активной. Такой режим работы САК необходим для компенсации потерь в системе и используется при формировании законов управления САК.

3. Если модули обобщенных векторов напряжений сети и инвертора равны между собой,  $|U_c| = |U_u|$ , то при любом фазовом сдвиге между ними имеет место только потребление реактивной мощности и нельзя реализовать режим компенсации (составляющая  $I_{ky}$  рис 4.4 отстает от  $\bar{U}_c$ ).

При этом в случае положительного фазового сдвига между векторами активная мощность из звена постоянного тока возвращается в сеть (составляющая  $I_{kx}$  рис. 4.4, а находится в противофазе с  $U_c$ ) и наоборот (рис. 4.4, б).

Таким образом, для реализации режима компенсации реактивной мощности с помощью САК необходимо, чтобы напряжение (основная гармоника) на входе инвертора была больше напряжения сети. Зная максимальную реактивную мощность, подлежащую компенсации, можно с помощью (4.11) определить напряжение на входе инвертора:

$$U_u = \frac{1,5U_c^2 \pm Q_{\max} X}{1,5U_c \cos\psi}, \quad (4.12)$$

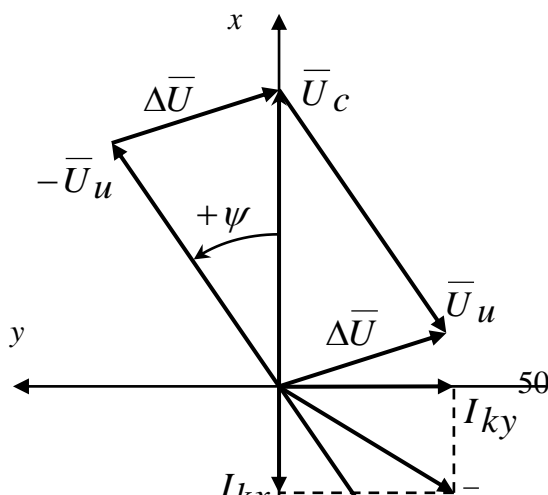
где знак плюс относится к режиму компенсации Q, а знак минус – потребление Q.

Амплитуда основной гармоники фазного напряжения на выходе трехфазного АИН с ШИМ при соединении нагрузки в звезду определяется выражением

$$U_{u.\max} = \mu U_d / 2,$$

где  $\mu$  – коэффициент (глубина) модуляции, который показывает в каких пределах изменяются длительности интервалов замкнутого и разомкнутого состояния ключей в течение периода модуляции;  $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока.

а)



б)

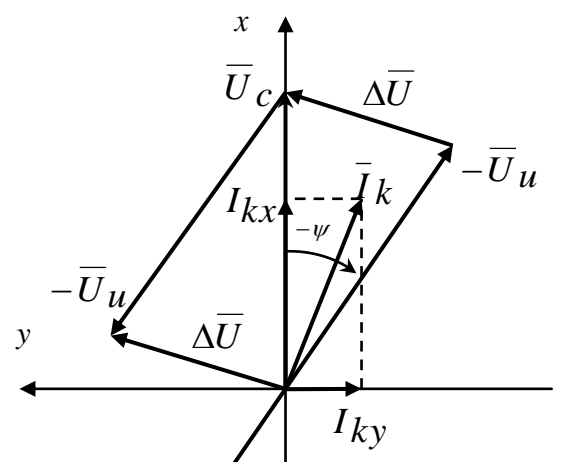


Рис. 4.4 Векторные диаграммы напряжений и токов при  $|U_u| = |U_c|$  и положительном (а) и отрицательном (б) фазовом сдвиге  $\psi$  между векторами в системе

Поскольку модули обобщенных векторов равны амплитудным значениям соответствующих фазных величин, то согласно (4.12) и (4.13) можно определить требуемое значение напряжения  $U_d$  в функции реактивной мощности, генерируемой (потребляемой) САК:

$$U_d = \frac{2(1,5U_{\phi.\max}^2 \pm Q_{\max} X)}{1,5\mu U_{\phi.\max} \cos\psi}. \quad (4.14)$$

Требуемое значение напряжения в звене постоянного тока можно обеспечить введением в систему автоматического регулирования САК составляющей  $I_x$ , реализуя режим компенсации реактивной мощности и потребления активной, или выбором соответствующих параметров дросселя на входе САК и емкости в звене постоянного тока, обеспечивающих режим самоподкачки.

## 5 РАЗРАБОТКА MATLAB - МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО КОМПЕНСАТОРА

MATLAB-модель управляемого компенсатора представлена на рис.5.1. Для моделирования системы были использованы элементы библиотек Simulink и Power System Blockset. Источником питания системы служит элемент “Inductive source with neutral”, при расчёте параметров которого были использованы характеристики трансформатора ТМ-180/35 мощностью 180 кВА. Непосредственно к питающему трансформатору подключён ёмкостной фильтр “Cf”, служащий для сглаживания пульсаций напряжения сети. Потребителем является трёхфазная активно-индуктивная нагрузка, в модели обозначенная блоком “Zn”, при моделировании задавались такие параметры, чтобы режим работы энергосистемы был

номинальным. Параллельно нагрузке через ключи “К” к системе подключается управляемый компенсатор реактивной мощности (или активный фильтр). Устройство представляет собой IGBT-инвертор с обратными диодами, подключаемый к сети через дроссель “Ldr” для сглаживания пульсаций тока инвертора. Питается он от управляемого ёмкостного накопителя энергии, который имеет свою собственную двухконтурную замкнутую систему регулирования, благодаря которой ёмкость постоянно подзаряжается от управляемого выпрямителя (блок “Capacity Control System”).

Сам инвертор получает управляющие импульсы для ключей (на вход “pulses”) от релейных регуляторов тока, помещённых в блок “Invertor Current Relay Control System”. Блок регуляторов получает на вход сигналы обратных связей с выхода инвертора по каждой из фаз и сравнивает их с сигналом задания, сформированного блоками “Vector Control System” и “Polyharmonic Block”. “Polyharmonic Block” выполняет функции фильтра – это устройство выделяет первую гармонику тока нагрузки, снятого с датчиков, которая поступает на вход блока “Vector Control System” для дальнейшей обработки, а также выделяет весь гармонический состав тока нагрузки и подаёт в блок релейных регуляторов как составляющую сигнала задания для компенсации.

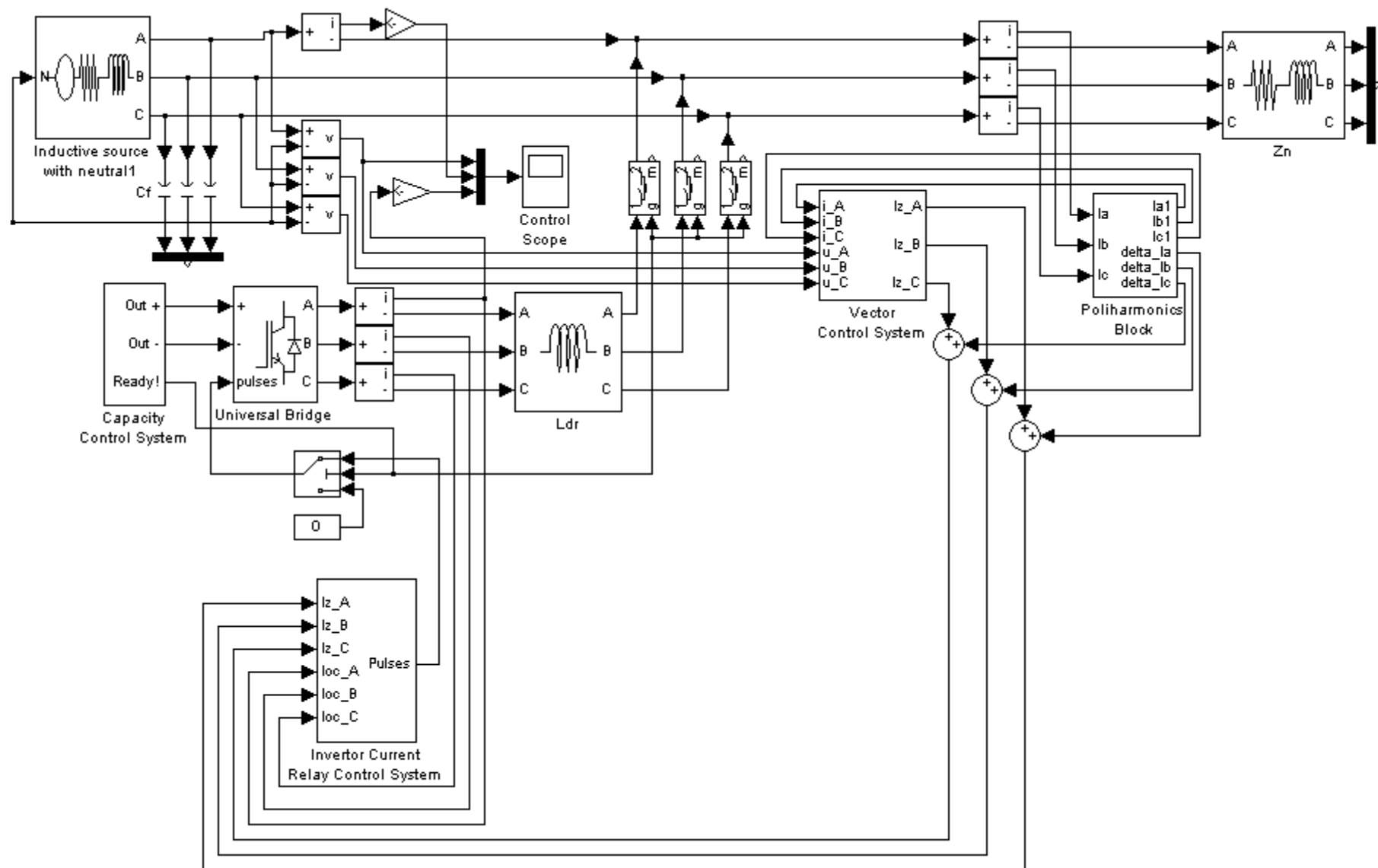


Рис.5.1 MATLAB-модель системы с управляемым компенсатором

Блок “Vector Control System” играет основную роль в формировании управляющего воздействия. Как видно из рис.5.2, он имеет в своём составе

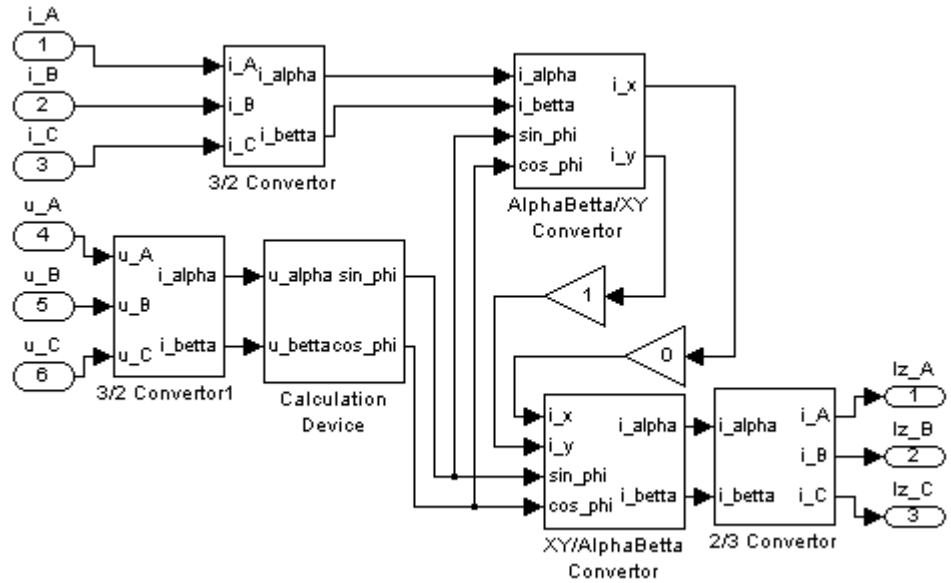


Рис.5.2 Vector Control System

преобразователи координат ABC- $\alpha\beta$ ,  $\alpha\beta$ -xy, xy- $\alpha\beta$ ,  $\alpha\beta$ -ABC и вычислительное устройство ВУ (“Calculation Device”). Пройдя два блока преобразователей координат, первая гармоника сигнала с датчиков тока нагрузки представляется составляющими  $i_x$  (активной) и  $i_y$  (реактивной). Для формирования задающего сигнала инвертора мы учитываем только реактивную составляющую  $i_y$  (активную компенсировать не нужно) и производим обратные преобразования в систему координат ABC. В итоге имеем сигнал задания на компенсацию реактивной составляющей тока для инвертора на каждую из фаз и подаём его на вход релейного регулятора тока, предварительно просуммировав его с сигналом задания на компенсацию гармонической составляющей тока нагрузки (рис.5.1).

Структура преобразователя координат ПК ABC- $\alpha\beta$  показана на рис.5.3. Вычисления в этой структуре выполняются по формулам:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= i_A; \\ i_{\beta} &= \frac{i_B - i_C}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (5.1)$$

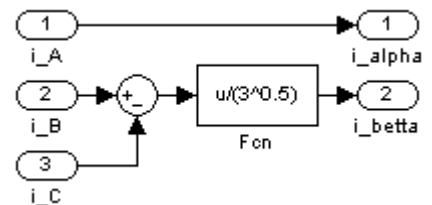


Рис.5.3 ПК ABC- $\alpha\beta$  (3/2 Converter)

Следующий преобразователь координат  $\alpha\beta$ -ху (рис.5.4) описывается такими уравнениями:

$$\begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos(\varphi) + i_\beta \sin(\varphi) \\ i_y &= i_\beta \cos(\varphi) - i_\alpha \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (5.2)$$

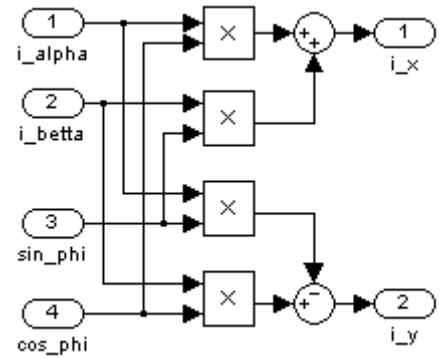


Рис.5.4 ПК  $\alpha\beta$ -ху (AlphaBeta/XY Converter)

Устройство служит для перевода представления сигналов из неподвижной системы координат во вращающуюся систему.

Преобразователи координат  $\alpha\beta$ -ху, ху-  $\alpha\beta$  и  $\alpha\beta$ - ABC выполняют функции, обратные двум предыдущим блокам, их работа описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos(\varphi) - i_y \sin(\varphi); \\ i_\beta &= i_x \sin(\varphi) + i_y \cos(\varphi); \\ i_A &= i_\alpha; \\ i_B &= -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta; \\ i_C &= -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta. \end{aligned} \quad (5.3)$$

На рис.5.5 показана структурная схема блока разделения сигналов основной и высших гармоник. Здесь используется блок “Fourier” из библи-

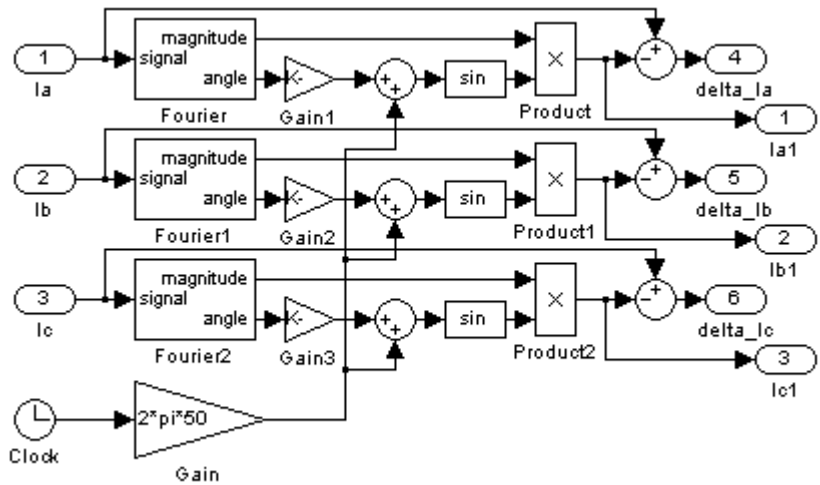


Рис.5.5 Polyharmonic Block

отеки “Power System Blockset”, который позволяет из входного в него полигармони-ческого сигнала вычислить амплитуду и фазу указанной в его параметрах гармоники. Затем, по этим данным с помощью математических средств “Simulink” восстанавливаем текущее значение основной гармоники в

каждый момент времени и подаём затем на вход “Vector Control System”. Одновременно с этим, полученное мгновенное значение первой гармоники тока вычитается из сигнала полного тока. Таким образом, мы получаем разность токов, содержащую в себе “лишние” гармоники. Этот сигнал и будет дополнительным заданием для разработанного активного фильтра.

Полученный суммированием сигнал задания для инвертора попадает на вход блока релейных регуляторов тока (PPT) “Invertor Current Relay Control System”, структурная схема которого представлена на рис.5.6.

Здесь происходит сравнение сигналов задания и обратной связи тока инвертора, а разность подаётся на релейный элемент, который, в зависимости

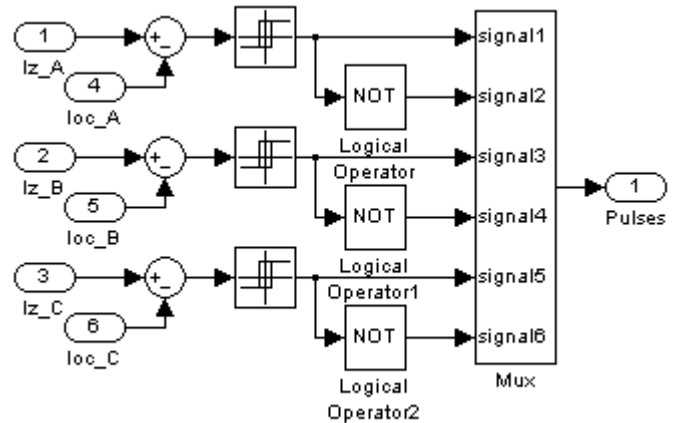


Рис.5.6 PPT  
(Invertor Current Relay  
Control System)

от величины ошибки, формирует на выходе управляющий импульс для тиристоров. Управляющие сигналы формируются в шину и подаются на преобразователь. Ширина петли релейного элемента влияет на частоту коммутаций силовых ключей инвертора и, как следствие, на частоту и амплитуду пульсаций тока на выходе инвертора, поэтому при включении в сеть применяется сглаживающий дроссель (блок “Ldr”), способствующий некоторому улучшению формы тока на выходе инвертора.

Как уже упоминалось выше, для питания инвертора применяется ёмкостной накопитель энергии с двухконтурной системой подчинённого регулирования управления его зарядом. Система обеспечивает стабилизацию напряжения на конденсаторе и ограничение уровня тока зарядки ёмкости в переходных процессах, что положительно влияет на срок её службы. Структурная схема системы показана на рис.5.7 (“Capacity Control System”).



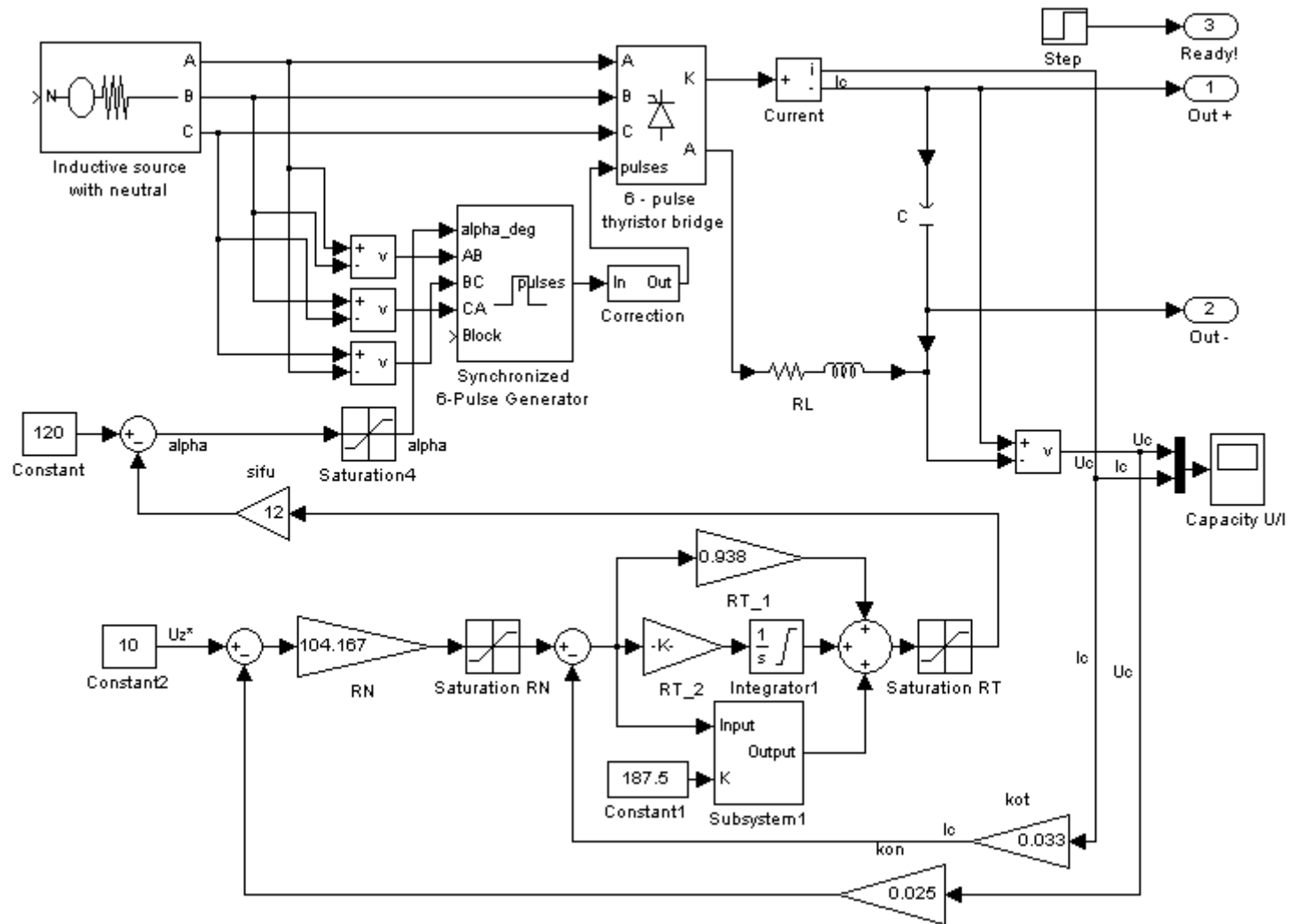


Рис.5.7 Модель системы управления зарядом ёмкостного накопителя энергии

Представленная на рисунке схема заряда ёмкости состоит из источника напряжения “Inductive source with neutral”, который подключён к управляемому выпрямителю “6-pulse thyristor bridge”, выход которого питает ёмкость “C”. Управляющие импульсы для выпрямителя формируются системой СИФУ “Synchronized 6-Pulse Generator”. Эти блоки входят в состав библиотеки “Power System Blockset” и являются настраиваемыми. Для управления блоком СИФУ нужно подать на его вход значения линейных напряжений трёхфазного источника для синхронизации управляющих импульсов с фазой сети. Для регулирования уровня выпрямленного напряжения на выходе силового преобразователя “6-pulse thyristor bridge” следует воздействовать на вход СИФУ “alpha\_deg”. Этот параметр задаёт угол отпирания силовых ключей в градусах. Максимальному значению выходного выпрямленного напряжения соответствует угол регулирования  $\alpha=0$  градусов, минимальному – 120 градусов. Таким образом, имеем возможность управлять преобразователем, а значит и уровнем напряжения на конденсаторе “C”. Функцию формирования этого задающего сигнала выполняет система автоматического регулирования (САР), которая представляет собой классическую двухконтурную систему подчинённого регулирования и имеет в своём составе П – регулятор напряжения РН (“RN”) и П-И-И<sup>2</sup> – регулятор тока РТ (“RT”). Сигналы обратных связей для САР взяты с датчиков, подключённых к ёмкости. Данная система регулирования имеет регулятор тока со сложной передаточной функцией:

$$W_{pm}(p) = \frac{p^2 LC + pRC + 1}{p^2 T_\mu K_{np} CK_m} \quad (5.4)$$

, которая была получена в ходе построения системы регулирования.

Для нахождения передаточной функции объекта управления запишем значение входного сопротивления его цепи:

$$Z_{ex}(p) = R + pL + \frac{1}{pC} \quad (5.5)$$

, где  $R$  – эквивалентное активное сопротивление цепи, включающее сопротивление обмоток трансформатора и сопротивление вентилялей;  $L$  – общая индуктивность цепи;  $C$  – ёмкость конденсатора.

Полученная передаточная функция объекта управления примет вид:

$$W(p) = \frac{pC}{p^2LC + pRC + 1} \quad (5.6)$$

Принимая, что тиристорный преобразователь имеет передаточную функцию

$$W_{np}(p) = \frac{K_{np}}{pT_{\mu} + 1} \quad (5.7)$$

и настраивая контур тока на модальный (технический) оптимум, получаем выражение для регулятора тока:

$$W_p(p) = \frac{p^2LC + pRC + 1}{p^2T_{\mu}K_{np}CK_m} \quad (5.8)$$

, где  $K_T$  – коэффициент обратной связи по току.

Как видно из выражения, регулятор тока имеет сложную передаточную функцию; регулятор содержит в своём составе пропорциональную, интегральную и квадратично-интегральную части.

Функции библиотеки Simulink пакета MATLAB, где велась разработка САПР, не содержат средств, позволяющих реализовать такое сложное звено в одном блоке, поэтому передаточная функция была разбита на несколько более простых составляющих:

$$W_p(p) = \frac{LC}{T_{\mu}K_{np}CK_m} + \frac{RC}{pT_{\mu}K_{np}CK_m} + \frac{1}{p^2T_{\mu}K_{np}CK_m} \quad (5.9)$$

Последнее слагаемое передаточной функции регулятора тока представляет собой сложное  $I^2$  звено и для его реализации в модели с учётом возможности ограничения задания на ток была специально разработана подсистема, изображённая на рис.5.8, обеспечивающая квадратичное интегрирование с требуемым ограничением (блок “Subsystem1”).

Входами подсистемы являются выход регулятора напряжения и коэффициент усиления “К”, соответствующий этой части регулятора и рассчитанный по формуле:

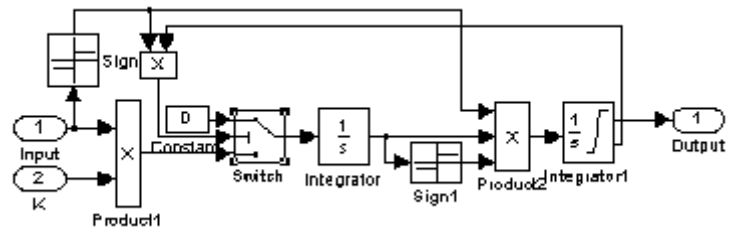


Рис.5.8 Квадратично-интегральная часть регулятора тока

$$K = \frac{1}{T_{\mu} K_{np} CK_m} \quad (5.10)$$

Таким образом, передаточная функция регулятора тока разработанной системы управления примет вид:

$$W_p(p) = KLC + \frac{KRC}{p} + \frac{K}{p^2} \quad (5.11)$$

Передаточная функция регулятора напряжения имеет вид:

$$W_{pu} = \frac{C \cdot K_m}{4T_{np} K_n} \quad (5.12)$$

После окончания переходных процессов в системе заряда на её выходах “Out+” и “Out-“ имеем напряжение, соответствующее заданной величине, а логический выход “Ready!” сигнализирует об окончании процесса зарядки ёмкости и готовности системы к подключению инвертора в сеть. Как видно из рис.5.1, именно этот сигнал используется для разблокировки ключей “К” и старту режима компенсации.

Для моделирования была использована конденсаторная батарея ёмкостью в 1Ф и заряжаемая до напряжения 400В, а система регулирования обрабатывала ограничение тока зарядки конденсатора до 300А.

При неудачном подборе параметров системы с ёмкостным накопителем энергии управляемый компенсатор при определённом режиме работы электросети сможет ощущать недостаток запасённой в конденсаторе энергии для полной компенсации реактивной мощности сети и качественному устранению высших гармоник тока. Поэтому если есть

вероятность периодической работы сети в тяжёлых режимах (чрезвычайно высокое потребление реактивной мощности, сильная зашумлённость тока высшими гармониками и т.д.), то следует увеличивать по мере необходимости запасаемую в конденсаторе энергию зарядом конденсатора до большего напряжения или увеличением его ёмкости:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (5.13)$$

Иначе в сети будет наблюдаться некоторое искажение формы тока, а также будет наблюдаться зашумлённость питающего напряжения.

## 6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

### Введение

В данном дипломном проекте рассматриваются параметры емкисних накопителей энергии в системах группового питания электроприводов с ШИМ.

Актуальной эту тему делает растущие требования к качеству, скорости и себестоимости изготовления единицы продукта.

Известно, что обеспечение нужных энергетических показателей электроприводов группового питания от общих шин постоянного тока происходит путем обоснования выбора параметров и анализ емкостных накопителей энергии, которые повторно используются как для питаемый приводов, так и для управления качеством электроэнергии.

Экономический эффект от реализации результатов работы ожидается положительным благодаря экономии электроэнергии, повышения ее качества и уменьшение потерь в силовых устройствах и линиях передач, улучшению качества и уменьшения потерь электроэнергии в линиях электропередачи и в трансформаторах за счет компенсации реактивной составляющей мощности.

При расчёте экономической эффективности технического решения, предложенного в магистерской работе, необходимо определить:

- капитальные затраты;

- эксплуатационные расходы;
- годовую экономию от внедрения объекта проектирования;
- выводы об экономической целесообразности принятого технического решения.

### 6.1. Расчет капитальных затрат

Величина проектных капиталовложений определяется по формуле:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}} + K_{\text{тр}} + K_{\text{мн}},$$

- где:
- $K_{\text{об}}$  - суммарная стоимость комплектующих изделий;
  - $K_{\text{тр}}$  - транспортно-заготовительные и складские расходы;
  - $K_{\text{мн}}$  - затраты на монтажные и наладочные работы;

Перечисленные показатели приведены в таблицах 4.1, 4.2, 4.3, 4.4.

Таблица 4.1. Суммарная стоимость комплектующих изделий, грн.

| № п.п. | Наименование и характеристика оборудования | Количество | Стоимость, грн. с НДС |
|--------|--|------------|-----------------------|
| 1.     | Электропривод ЭПУ1М6-2-3727П               | 1          | 9500                  |
| 2.     | Кабель ВВГ -15м                            | 1          | 606                   |
| 3.     | "Модуль программного управления НЦ-31"     | 1          | 11520                 |
|        | <i>ИТОГО</i>                               |            | 21626                 |

Цена комплектного электропривода ЭПУ1М-2-37.2.7.П, взята из прейскуранта цен Полтавського ЧП НПП «Промтехнологія» на 02.05.2018.

Цена 10-метров соединительного кабеля взята с прейскуранта цен Днепропетровського ЧП "220 Вольт" (стоимость 1м – 40,4 грн с НДС) на 28.11.2018.

Ценаустройства ЧПУ взята из прайс листа Днепропетровской частной фирмы «Амадеус» на 17.11.2018.

Транспортно-заготовительные расходы связаны с доставкой КТЭ со склада в Полтаве в город Днепр. По данным компании-перевозчика «Нова Пошта», стоимость доставки КТЭ из Полтавы в Днепр, будет составлять 123 грн. Стоимость доставки устройства ЧПУ, входит в стоимость устройства. Стоимость доставки кабеля по Днепру составляет 50 грн.

Таблица 6.2. Транспортно-заготовительные и складские расходы.

| Показатели  | Стоимость, грн. |
|---|-----------------|
| Затраты на доставку привода из Полтавы в Днепропетровск | 123             |
| Затраты на доставку кабеля по Днепропетровску           | 50              |
| ИТОГО   | 173             |

Затраты на монтажные и наладочные работы определяются по формуле:

$$K_{mn} = \sum (C_i \cdot a_i \cdot t_i + C_i \cdot \frac{O}{t} \cdot t_i) \cdot K_d \cdot K_{cm} \cdot K_{np}$$

где:  $C_i$  – численность работников  $i$ -го разряда, необходимых для выполнения

определенного объёма монтажных (наладочных) работ, чел.;

$O$ - оклад инженера-наладчика;

$t$ - фонд рабочего времени;

$a_i$  - часовая тарифная ставка  $i$ -го разряда, грн;

$t_i$ - время для выполнения работы, час;

$K_d$  - коэффициент, учитывающий размер доплат;

$K_{cm}$  - коэффициент, учитывающий отчисления на соц. мероприятия;

$K_{np}$  - коэффициент, учитывающий прочие затраты.

Таблица 6.3. Затраты на монтаж.

| Показатели   | Ед. изм. | Величина |
|--|----------|----------|
| Численность работников (эл. слесарь 4-го разряда ) | чел      | 1        |
| Тарифная ставка (эл. слесарь 4-го разряда )        | грн/ч.   | 35       |
| Время для выполнения работы                        | Час      | 5        |
| Коэф., учитывающий размер доплат                   | -        | 1,1      |
| Коэф., учитывающий отчисления на соц. мероприятия  | -        | 1,22     |
| Коэф., учитывающий прочие затраты                  | -        | 1,05     |

Таблица 6.4. Затраты на наладку

| Показатели  | Ед.изм.               | Величина |
|---|-----------------------|----------|
| Численность работников (инженер-наладчик)         | чел                   | 1        |
| Инженер-наладчик                                  | оклад                 | грн      |
|   | фонд рабочего времени | час      |
| Время для выполнения работы                       | час                   | 8        |
| Коэф., учитывающий размер доплат                  | -                     | 1,1      |
| Коэф., учитывающий отчисления на соц. мероприятия | -                     | 1,22     |
| Коэф., учитывающий прочие затраты                 | -                     | 1,05     |

Таким образом, затраты на монтаж и наладку:

$$K_{\text{мн}} = (1 \cdot 35 \cdot 5 + 1 \cdot \frac{6160}{168} \cdot 8) \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,05 = 660(\text{грн}) \quad (4.1)$$

Затраты на монтаж:

$$K_{\text{м}} = 1 \cdot 35 \cdot 5 \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,05 = 247(\text{грн}) \quad (4.2)$$

Стоимость демонтажа будет составлять 50% (для оборудования, которое будет использоваться повторно) от стоимости монтажных работ и будет составлять 124 (грн).

Общие капитальные затраты составляют:



$$K_{np} = 21626 + 173 + 660 + 124 = 22583 \text{ (грн)} \quad (4.3)$$

## **6.2. Расчет эксплуатационных расходов**

Эксплуатационные расходы - это текущие затраты на эксплуатацию и обслуживание объекта проектирования за определенный период, выраженный в денежной форме.

К основным статьям эксплуатационных расходов по электротехническому оборудованию и энергосетям относятся:

- 1) амортизационные отчисления  $C_a$ ;
- 2) затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт оборудования  
 $C_m$ ;
- 3) стоимость электроэнергии, потребляемой объектом проектирования  $C_э$ .

### **6.2.1. Годовой фонд амортизационных отчислений.**

Доля амортизационных отчислений на оборудование агрегата определяется исходя из его первоначальной стоимости. К настоящему моменту остаточная стоимость установки составляет 97480 грн. (по данным ГП ПО ЮМЗ им. Макарова»).

Таблица 6.5. Расчет амортизационных отчислений.

| Наименование показателей | Кап.<br>Затраты, грн | Норма амортизации,<br>% | Сумма,<br>грн |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|
| Проектный вариант станка |                      |                         |               |
| УЧПУ                     | 12030                | 50                      | 6015          |
| Электропривод + кабель   | 10553                | 20                      | 2111          |
| ИТОГО                    |                      |                         | 8126          |
| Базовый вариант станка   |                      |                         |               |
| УЧПУ                     | 7122                 | 50                      | 3561          |
| Электропривод            | 6100                 | 20                      | 1220          |
| ИТОГО                    |                      |                         | 4781          |

**6.2.2. Расходы на техобслуживание агрегата**

Расходы на текущий ремонт оборудования. В них входят нормативные затраты на материалы, запасные части, заработную плату ремонтным рабочим.

Расходы на текущий ремонт аппаратуры защиты и управления (табл.4.6):

$$Z_{mp} = \sum_{i=1}^n \left( h_i \cdot t_1 \cdot m_i \cdot R_{\sum i} + \frac{S_i \cdot \Pi_i}{T_i} \cdot T_{\phi} \right) (\text{грн}),$$

Таблица 6.6. Годовые затраты на техобслуживание.

|   | Проектируемый | Базовый |
|---|---------------|---------|
| Число приводов, $n$                                 | 1             | 1       |
| Тарифная ст. наладчика 5-го разряда, грн, - $h$     | 43            | 43      |
| Трудоемкость одного ремонта, ч/ед, - $t_1$          | 10            | 10      |
| Число ремонтов в год, - $m$                         | 1             | 4       |
| Категория сложности ремонта, - $R_{\Sigma}$         | 10            | 10      |
| Стоимость сменяемых элементов, грн, - $S$           | 150           | 150     |
| Количество однотипных сменяемых элементов, - $П$    | 3             | 5       |
| Срок службы деталей, ч, - $T$                       | 3000          | 2300    |
| Число часов работы оборудования в год, - $T_{\Phi}$ | 1850          | 1850    |

Для проектируемого станка:

$$Z_{\text{прн}} = 1 \left( 43 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 10 + \frac{150 \cdot 3}{3000} \cdot 1850 \right) = 4578 \text{ (грн)}; \quad (4.4)$$

Для базового станка:

$$Z_{\text{прб}} = 1 \left( 43 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 10 + \frac{150 \cdot 5}{2300} \cdot 1850 \right) = 17803 \text{ (грн)}; \quad (4.5)$$

### 6.2.3. Годовой фонд заработной платы.

Внедрение нового оборудования и модернизация устройства ЧПУ не приводит к изменению численности обслуживающего персонала.

### 6.2.4. Годовые затраты на электроэнергию.

При внедрении проектного варианта количество потребляемой агрегатом электроэнергии изменится значительно, так как были заменены устаревший привод и система ЧПУ на более энергоэффективные. Стоимость потребляемой электроэнергии определим исходя из времени работы агрегата и его установленной мощности:

$$C_E = W_{\Gamma} \cdot C_{\text{Э}}$$

где:  $W_{\Gamma}$  – количество потребленной за год электроэнергии, кВт·ч;

$C_{\text{Э}}$  – текущий тариф на электроэнергию, грн/кВт·ч.

На 1.04.2018 год для предприятий II класса Днепропетровской области тарифная ставка на электроэнергию составляет 1,92072 грн/кВт·ч без НДС;

$$W_{\Gamma} = N_{\Gamma} \cdot T_{\text{н}}$$

где:  $N_{\Gamma}$  – установленная мощность оборудования;

$T_{\text{н}}$  – номинальное время работы оборудования за год (часов);

Таким образом, стоимость потребляемой электроэнергии по базовому варианту:

$$C_E = 19 \cdot 1850 \cdot 1,92072 \cdot 1,2 = 81016 (\text{грн}) \quad (4.6)$$

Стоимость потребляемой электроэнергии по проектному варианту:

$$C_E = 15 \cdot 1850 \cdot 1,92072 \cdot 1,2 = 63960 (\text{грн}) \quad (4.7)$$

Таблица 6.7. Годовые эксплуатационные расходы

| № | Наименование статей затрат      | Сумма затрат, грн. |           |
|---|---------------------------------|--------------------|-----------|
|   |                                 | Базовый            | Проектный |
| 1 | Амортизационные отчисления.     | 4781               | 8126      |
| 2 | Расходы на техобслуживание      | 17803              | 4578      |
| 3 | Стоимость потребляемой энергии. | 81016              | 63960     |
|   | <b>ИТОГО</b>                    | 103600             | 76664     |

### **6.3. Определение годовой экономии от внедрения объекта проектирования.**

#### **6.3.1. Определение годовой экономии от внедрения проекта**

Полная годовая экономия от внедрения проекта определяется с учетом изменения эксплуатационных затрат по данному объекту:

$$\text{Э} = \text{Э}_{\Gamma} \pm \Delta C, \text{ грн}$$

где  $\Delta C$  – экономия (перерасход) на эксплуатационных расходах.

$$\Delta C = C_{\text{баз}} - C_{\text{пр}}$$

$$\mathcal{E} = 103600 - 76664 = 26936(\text{грн}) \quad (4.8)$$

### 6.3.2. Определение экономических показателей

Одним из показателей экономической эффективности является коэффициент эффективности капитальных затрат  $E_p$ , который показывает, каков объём дополнительной прибыли приносит одна единица капитальных затрат:

$$E_p = \frac{\mathcal{E}}{K} \cdot 100\%$$

где:  $\mathcal{E}$  – общая годовая экономия от внедрения объекта проектирования, грн;

$K$  – капитальные затраты, вызвавшие экономию, грн.

$$E_p = \frac{26936}{21626} = 1,23 \quad (4.8)$$

Срок окупаемости капитальных затрат  $T_p$  показывает, за сколько лет они окупятся за счет общей экономии от внедрения проекта:

$$T_p = \frac{K}{E}, \text{ лет}$$

$$T_p = 21626 / 26936 = 0,8 \text{ года} \quad (4.9)$$

Для окончательной оценки необходимо сравнить расчетное значение  $E_p$  с нормативным значением  $E_n$ . Проект признается экономически целесообразным, если расчетный коэффициент эффективности превышает величину банковской кредитной ставки:

$$E_p \geq E_n$$

$$E_n = \frac{N_{кр} + N_{инф}}{100}$$

$$E_n = \frac{26 + 10}{100} = 0,36 \quad (4.10)$$

где:  $N_{кр}$  - банковская кредитная ставка, %;

$N_{инф}$  - годовой уровень инфляции (умеренная инфляция), %.

Определяем нормативное значение коэффициента эффективности из приемлемой для предприятия индивидуальной нормы доходности:

$$E_n = \frac{1}{T_{ож}},$$

$$E_n = \frac{1}{5} = 0,2 \quad (4.11)$$

где  $T_{ож}$  - ожидаемый, приемлемый для предприятия срок окупаемости капитальных вложений, лет.

Выбираем вариант с определением  $E_n$  из индивидуальной нормы доходности.

$$E_p = 1,23 > 0,36$$

$$E_p = 1,23 > 0,2$$

**Вывод:**

Внедрение проектного варианта является экономически целесообразным. Коэффициент экономической эффективности составляет 1,23, а срок окупаемости составляет 0,8 года.

### *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. Перельмутер В.М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока. – Х.: Основа, 2004. – 210 с.
8. Malesani L., Rossetto L., Tenti P. AC/DC/AC PWM Converter with Reduced Energy Storage in the DC Link. IEEE Trans. Ind. Applicat, №2, 1985, p.287-292.
9. Ковач К.П., Рац Н. Переходные процессы в машинах переменного тока: пер. с нем. – И. – Л.; Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
10. 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.

11. 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.
12. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества электроэнергии в электрических сетях. – Киев: Наук. думка, 1985. – 208 с.
13. Шидловский А.К., Москаленко Г.А. Симметрирующие устройства с трансформаторными фазосдвигающими элементами. – Киев: Наук. думка, 1981. – 204 с.
14. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
15. Колб А.А. Релейно-векторное управление силовым активным фильтром в режиме компенсации мощности искажения // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ, 2004. – вып. 3, с. 61-68.
16. Колб А.А. Силовые активные компенсаторы в системах группового питания электроприводов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3, частина . – С. 44-48.