

В.Д. Кулик, В.И. Королев

**АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ИХ ДИАГНОСТИКА**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2012**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»

В.Д. Кулик, В.И. Королев

**АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ
И ИХ ДИАГНОСТИКА**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2012**

УДК 621.38 (075)
ББК 32.85я7
К 903

Кулик В.Д., Королев В.И.. Аномальные режимы работы полупроводниковых выпрямителей и их диагностика: учебное пособие / СПбГТУРП. – СПб., 2012. – 114 с.: ил. 109.

В учебном пособии изложены аномальные режимы работы полупроводниковых выпрямителей и способы их диагностики.

Пособие предназначено для студентов энергетических и электромеханических специальностей.

Рецензенты:

Козярук А.Е., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин и автоматизированного электропривода Санкт-Петербургского государственного горного университета;

Кондрашкова Г.А., д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой информационно-измерительных технологий и систем управления Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного пособия.

© Кулик В.Д., Королев В.И., 2012

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных
полимеров, 2012

ВВЕДЕНИЕ

В пособии приводятся расчет и анализ аномальных режимов работы полупроводниковых выпрямителей и косвенные способы их диагностики. Достоинством рассматриваемых способов диагностики является возможность обойтись без подключения датчиков регистрируемых сигналов непосредственно к полупроводниковым приборам, доступ к которым в ряде случаев оказывается затруднительным. Предложенные эффективные косвенные способы диагностики выпрямителей основаны на спектральном анализе кривой выходного напряжения выпрямителей; на анализе кривых фазных токов сети, позволяющем определить конкретно ветвь и плечо моста выпрямителя с нарушением их нормальной работы; на совместном анализе кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения, позволяющем при асимметрии нескольких импульсов управления определить плечо моста выпрямителя с отклонением от нормальной работы.

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

1.1. Обзор существующих способов и устройств диагностики полупроводниковых выпрямителей

В настоящее время вопросы оценки технического состояния полупроводниковых преобразователей решаются двумя видами диагностики: тестовой или функциональной.

Тестовое диагностирование полупроводниковых преобразователей широко представлено в работах [1,2,3].

Такой способ диагностирования связан с применением генератора импульсов тестовых сигналов, который подключается к отдельным участкам электрической цепи выпрямителя. Анализ откликов на его тестовые воздействия позволяет последовательно выявлять одно из трех возможных состояний каждого вентиля: исправен, пробит, неуправляем.

Преимущество тестового способа диагностики заключается в возможности построения алгоритмов диагностирования, которые обеспечивают большую глубину диагностики. Однако данный способ не может быть использован для выявления аномальных режимов работы выпрямителя в электроприводе машин бумагоделательного оборудования, так как для проведения процедуры диагностирования требуется вывод преобразователя из эксплуатации.

Для решения поставленной задачи в данном случае приемлемы способы и устройства только функционального диагностирования.

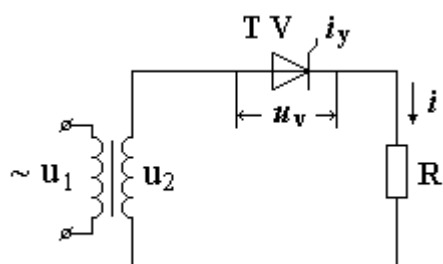


Рис.1.1. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя

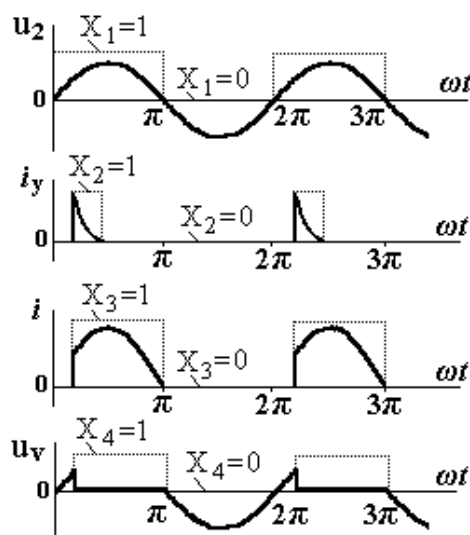


Рис.1.2. Кривые мгновенных значений токов и напряжений однофазного однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой

Все существующие в настоящее время способы и устройства функциональной диагностики полупроводниковых выпрямителей можно разделить на две группы.

К первой группе относятся способы диагностики, основанные на анализе параметров, полученных от датчиков, подключенных непосредственно к полупроводниковому прибору.

В [4,5] рассмотрен один из таких способов. Сущность такого способа диагностики заключается в следующем. В процессе нормальной работы преобразователя с помощью специальных контрольно-измерительных устройств производят регистрацию его параметров. Например, для однофазного однополупериодного выпрямителя (рис.1.1,1.2): u_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора; u_v – напряжение на тиристоре; i – ток нагрузки; i_y – ток на управляющем электроде тиристора.

Полученные кривые мгновенных значений контролируемых параметров выражают в виде логических диаграмм, для чего используют логические переменные $X_1...X_4$ (см. рис.1.2), описание которых делают в соответствии с кривыми мгновенных значений контролируемых параметров и условиями нормальной работы преобразователя. Далее преобразователь представляют в виде логической схемы, входными параметрами которой являются указанные выше логические переменные. На основании такой схемы разрабатываются алгоритмы поиска мест отказа в работе преобразователя.

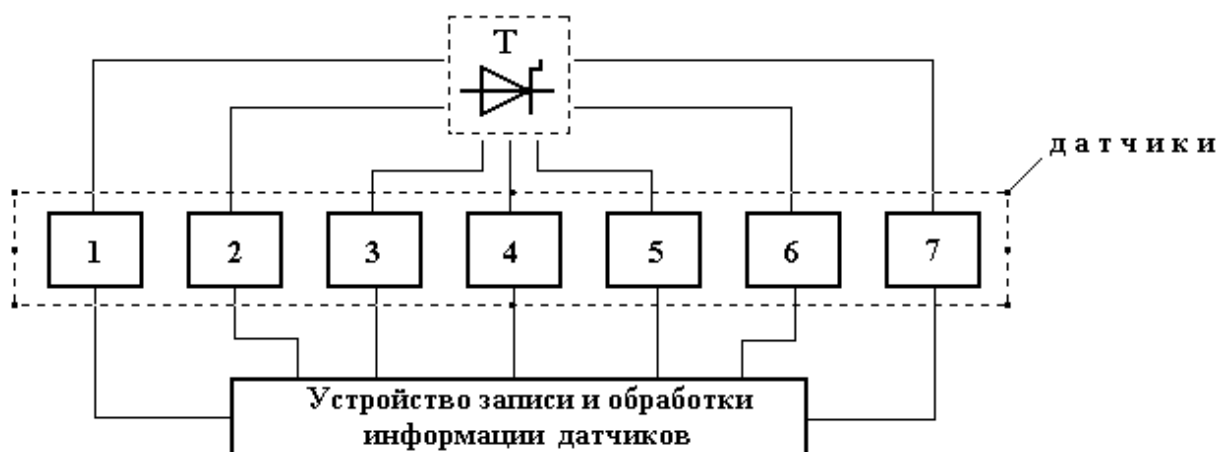


Рис.1.3. Структурная схема устройства диагностирования вентилей полупроводниковых преобразователей: Т – тиристор; 1 – датчик измерения падения напряжения на тиристоре; 2 – датчик измерения падения напряжения на управляющем электроде; 3 – датчик измерения тока, протекающего через тиристор; 4 – датчик измерения тока в цепи управления тиристора; 5 – датчик измерения корпуса тиристора; 6 – датчик радиатора тиристора; 7 – датчик температуры окружающей среды

Недостатком рассмотренного способа диагностики является большое количество контролируемых параметров. Как видно на примере (рис.1.1,1.2), только для диагностирования однофазного однополупериодного выпрямителя указано четыре параметра. Соответственно, в случае

диагностики трехфазных мостовых преобразователей количество регистрируемых параметров возрастает в шесть и более раз.

Для предотвращения аварийных отказов в работе силовых вентилей преобразователя существует устройство, структурная схема которого приведена на рис.1.3 [6,7].

Сущность работы данного устройства и способа диагностирования заключается в следующем. В ходе функционирования преобразователя с помощью датчиков и специального контрольно-измерительного устройства информации производят измерение и запись следующих сигналов: прямое падение напряжения на тиристоре, падение напряжения на управляющем электроде, ток, протекающий через тиристор, ток в цепи управления тиристора, температуры корпуса и радиатора тиристора, температура окружающей среды (см. рис.1.3). Далее косвенным методом с помощью специальной модели определяется мощность, рассеиваемая на тиристоре, и эквивалентная температура его структуры. Диагностирование тиристора осуществляется по отклонению фактической температуры его структуры от эквивалентной, вычисленной с помощью модели. Сравнение полученной разности с критическим значением позволяет прогнозировать время выхода из строя полупроводникового вентиля.

Недостатком рассмотренного способа диагностирования является большое число контролируемых параметров для одного тиристора.

Оценка степени старения полупроводниковых вентилей также возможна при использовании их вольт-амперной характеристики, которая имеет тенденцию к специфическому изменению в зависимости от вида развивающегося дефекта.

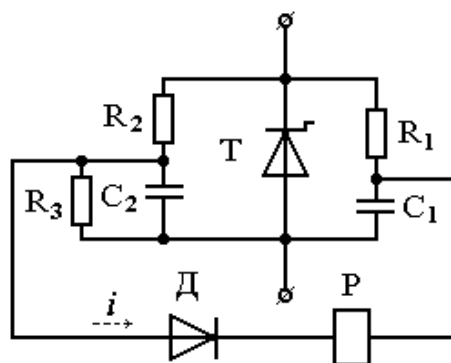


Рис.1.4. Принципиальная схема устройства сигнализации состояния полупроводникового вентиля Т: Д – диод; Р – указательное реле

На рис.1.4 представлено устройство сигнализации состояния полупроводникового вентиля, позволяющее выявлять пробой вентиля [7]. Способ реализации такого устройства для контроля одного плеча моста выпрямителя с вентилем Т приведен на рис.1.4.

Способ заключается в том, что к полупроводниковому прибору Т параллельно подключают две RC-цепочки (R_1C_1 и R_2C_2) с постоянными

времени, значительно отличающимися друг от друга. В электрическую цепь между ними включают диод D и индикаторное устройство в виде указательного реле P (см. рис.1.4). При пробое силового вентиля T из-за различных постоянных времени двух RC -цепочек в этой цепи возникает ток i , который приводит к срабатыванию указательного реле P .

Недостаток данного устройства диагностирования состоит в том, что он не позволяет указывать вентили, работа которых нарушена по причине аномальных импульсов управления из-за нарушений в работе системы управления или коммутационных процессов.

Анализ представленных выше способов и устройств функционального диагностирования полупроводниковых выпрямителей показал, что способы, которые относятся к первой группе, отличаются громоздкостью из-за большого количества датчиков. Это приводит к снижению надежности работы самой диагностической системы и к трудностям в её сервисном обслуживании. Поэтому их использование в многодвигательном электроприводе машин бумагоделательного оборудования для выявления аномальных режимов работы выпрямителей не является эффективным.

Ко второй группе способов функционального диагностирования полупроводниковых выпрямителей относятся способы с косвенными методами диагностики. Их обзор показал, что количество таких способов незначительно. В качестве примера рассмотрим способ бесконтактного определения технического состояния тиристоров преобразователя. Функциональная схема устройства, реализующего данный способ, приведена на рис.1.5 [8].

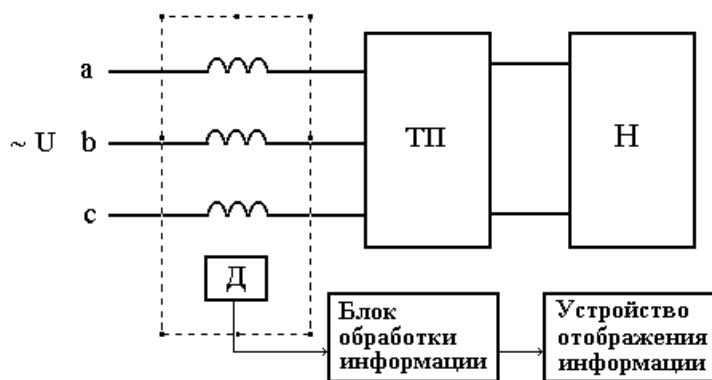


Рис.1.5. Функциональная схема устройства бесконтактного определения технического состояния тиристоров преобразователя: ТП - тиристорный преобразователь; Н - нагрузка; Д - бесконтактный датчик магнитного поля индуктивных элементов

Сущность способа заключается в измерении кинетики внешнего магнитного поля индукционных элементов в питающей цепи выпрямителя (трансформаторы, дроссели сглаживающих фильтров и т.д). На основании анализа информации, полученной с датчика, делают заключение о техническом состоянии выпрямителя. Отклонение поля от нормального значения свидетельствует о нарушении работы преобразователя.

Преимущество рассмотренного способа, по сравнению со способами функционального диагностирования первой группы, очевидно – это минимальное количество датчиков. Однако такой способ не дает возможности конкретно указать место неисправности.

Ниже рассматриваются новые способы функционального диагностирования полупроводниковых выпрямителей, которые основаны на косвенном определении их технического состояния.

1.2. Разработка новых способов диагностики полупроводниковых выпрямителей

1.2.1. Способ диагностики выпрямителей спектральным анализом выходного напряжения

Вопросы спектрального анализа выходного напряжения при нормальной работе полупроводниковых выпрямителей достаточно полно изучены и представлены в научно-технической литературе. Информация о спектральном анализе выпрямителей при аномальных режимах с целью их диагностики в публикациях отсутствует. Ниже рассматривается способ диагностики, основанный на анализе спектра гармоник выходного напряжения выпрямителя (рис. 1.6) при аномальных режимах[9].

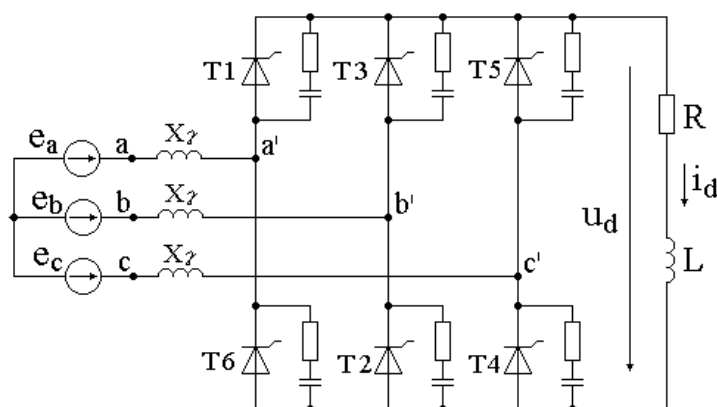


Рис.1.6. Эквивалентная расчетная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой

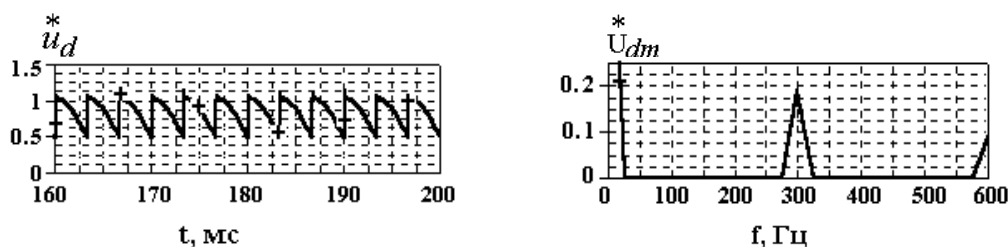
На рис.1.7 приведены кривые мгновенных значений и спектры гармоник выходного напряжения управляемого трехфазного мостового выпрямителя (рис.1.6) для нормального (рис.1.7 а) и аномального (рис.1.7 б) режима его работы при активно-индуктивной нагрузке. Приведенные кривые и спектры их гармоник получены в относительных единицах при расчете приведенной на рис.1.6 схемы выпрямителя с использованием программы OrCad9.2. Данная программа специально предназначена для моделирования работы аналоговых и цифровых устройств. Расчетная схема и базовое значение напряжения приведены в гл.2.

При нормальном режиме угол управления всеми тиристорами моста равен 30° ($\alpha_{1...6} = 30^\circ$). При аномальном – угол управления тиристорами Т2...Т6 равен нормальному, заданному значению и составляет $\alpha_{2...6} = 30^\circ$. Угол управления тиристором Т1 равен нулю ($\alpha_1 = 0^\circ$). Такое отличие углов управления может быть вызвано, как отмечалось выше, по разным причинам, например, из-за коммутационных процессов.

Рассмотрение кривых выходного напряжения, представленных на рис.1.7, показывает, что форма кривой выходного напряжения выпрямителя (рис.1.7 б) при аномальном режиме ($\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$), отличается от формы аналогичной кривой (рис.1.7 а), которая соответствует нормальному режиму работы при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$.

Следовательно, визуальный анализ выходного напряжения уже позволяет сделать вывод об отклонении работы выпрямителя от заданного нормального режима.

а)



б)

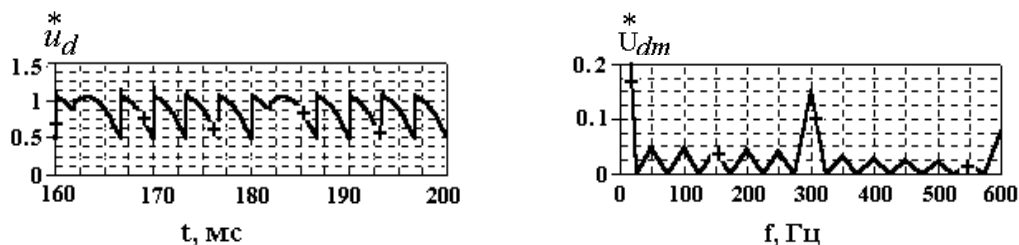


Рис.1.7. Кривые мгновенных значений выходного напряжения и спектры их гармоник управляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой: а – при нормальном режиме $\alpha_{1...6} = 30^\circ$; б – при аномальном режиме $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$

Отличие кривых выходного напряжения по форме должно приводить к различному гармоническому составу этих кривых. Действительно, сравнивая состав гармоник выходного напряжения при двух режимах (рис.1.7), нетрудно заметить их существенные различия. Если при нормальном режиме в кривой выходного напряжения присутствует лишь 6-я гармоника, то при аномальном – все гармоники спектра. Это отличие является диагностическим признаком нарушения в работе выпрямителя.

С помощью применения аппарата булевой алгебры можно представить гармонический состав выходного напряжения двоичным кодом. В таком случае каждый код будет соответствовать определенному режиму работы

выпрямителя. Это позволяет на программном уровне (без участия человека) провести анализ гармонического состава выходного напряжения и сделать заключение о состоянии выпрямителя.

Рассмотренный способ диагностики выпрямителя дает возможность произвести общую оценку его работы: нормальный или аномальный режим без указания конкретного места неисправности. Его применение целесообразно при установлении факта нарушения нормальной работы преобразователя.

1.2.2. Способ диагностики выпрямителей с использованием кривых мгновенных значений фазных токов

Предыдущий способ позволяет выявлять аномальный режим работы выпрямителя, однако не дает возможности указать место неисправности. Глубину диагностики можно увеличить вплоть до определения ветви и плеча моста с отклонением от нормальной работы выпрямителя, если использовать мгновенные значения фазных токов [10]. Покажем это на примере трехфазного мостового выпрямителя при аномальном режиме, вызванном отказом в работе плеча катодной группы вентилей с тиристором Т1 и плеча анодной группы с тиристором Т6.

Первому случаю соответствует эквивалентная схема выпрямителя, представленная на рис.1.8 а, второму – на рис.1.8 б при разомкнутом ключе К. Такой режим может возникнуть, например, из-за нарушения работы устройства управления или по другим причинам. В соответствии с эквивалентными схемами были рассчитаны кривые фазных токов и спектры их гармоник с использованием программы OrCad9.2.

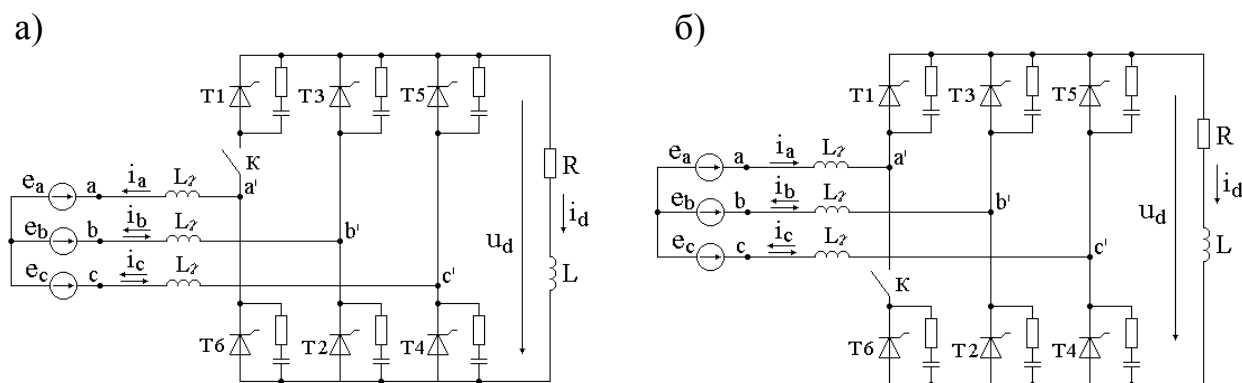


Рис.1.8. Эквивалентные расчетные схемы трехфазного мостового управляемого выпрямителя при отказе в работе плеча: а - катодной группы вентилей моста с тиристором Т1; б - анодной группы вентилей моста с тиристором Т6

На рис.1.9 приведены кривые фазных токов и спектры их гармоник для первого случая. На рис.1.10 приведены кривые фазных токов и спектры их гармоник, соответствующие второму случаю аномального режима.

Рассмотрим вначале первый случай аномального режима, обратившись к схеме, представленной на рис.1.8 а. Из её рассмотрения следует, что при разомкнутом ключе К, отражающем отказ плеча с тиристором Т1, протекание тока i_a в фазе “а” возможно лишь в одном направлении от точки a' к точке a . Примем условно это направление за положительное.

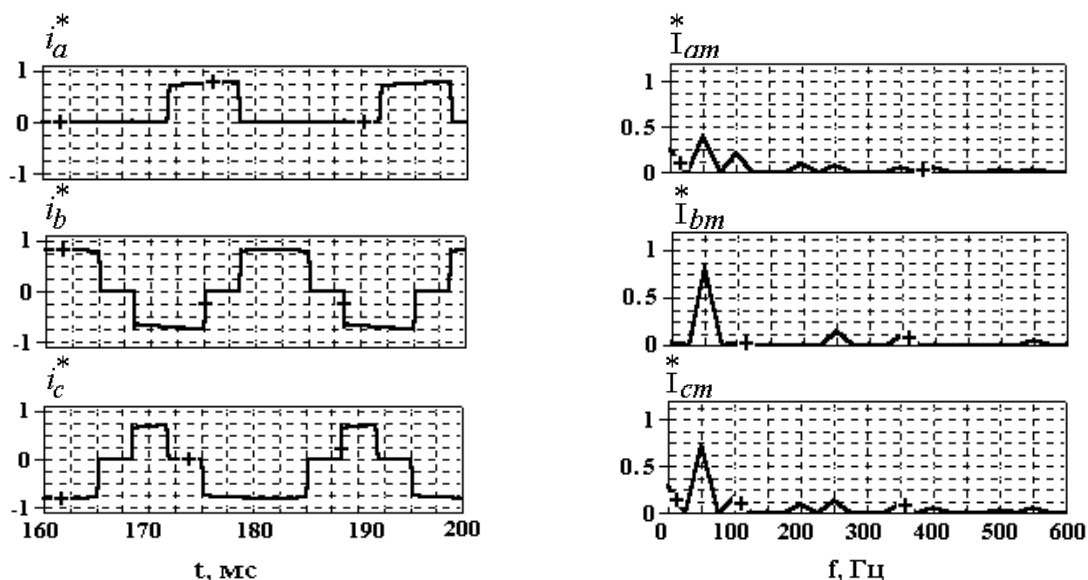


Рис.1.9. Кривые фазных токов и спектры их гармоник трехфазного мостового управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой при отказе в работе плеча катодной группы вентилей моста с тиристором Т1 и $\alpha_{2...6} = 0^0$

Такое нарушение в работе приводит к различию форм фазных токов и их гармонического состава. Это наглядно отражают кривые рис.1.9. В отличие от тока фаз “b” и “с”, ток фазы “а” имеет форму однополярного импульса, амплитуда первой гармоники которого имеет наименьшее значение по сравнению с её амплитудами в токе двух других фаз.

Таким образом, признак наименьшей амплитуды первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви с тиристором Т1, говорит о нарушении работы этой ветви моста, следовательно, он является диагностическим признаком. Другим диагностическим признаком является положительный однополярный импульс тока фазы “а” (рис.1.9), который свидетельствует об отклонении от нормальной работы плеча катодной группы моста с тиристором Т1 (рис.1.8 а).

Рассмотрим второй случай аномального режима, обратившись к рис. 1.8 б. При рассмотрении данной схемы нетрудно заметить, что протекание тока i_a в фазе “а” при разомкнутом ключе К возможно лишь в одном направлении от точки a к точке a' . Примем условно это направление за отрицательное. Аномальный режим, как и в первом случае, приводит к изменению форм фазных токов и спектра их гармоник. Это наглядно видно на рис.1.10.

При сравнении кривых и спектров их гармоник (рис.1.10) с аналогичными кривыми и их гармоническим составом (рис.1.9), соответствующими первому случаю аномального режима, видно лишь одно отличие – отрицательный импульс тока в фазе “а”. Данный диагностический признак и наименьшая амплитуда первой гармоники тока i_a фазы “а” говорят об отказе работы плеча анодной группы вентилей моста с тиристором Т6 (рис.1.8 б).

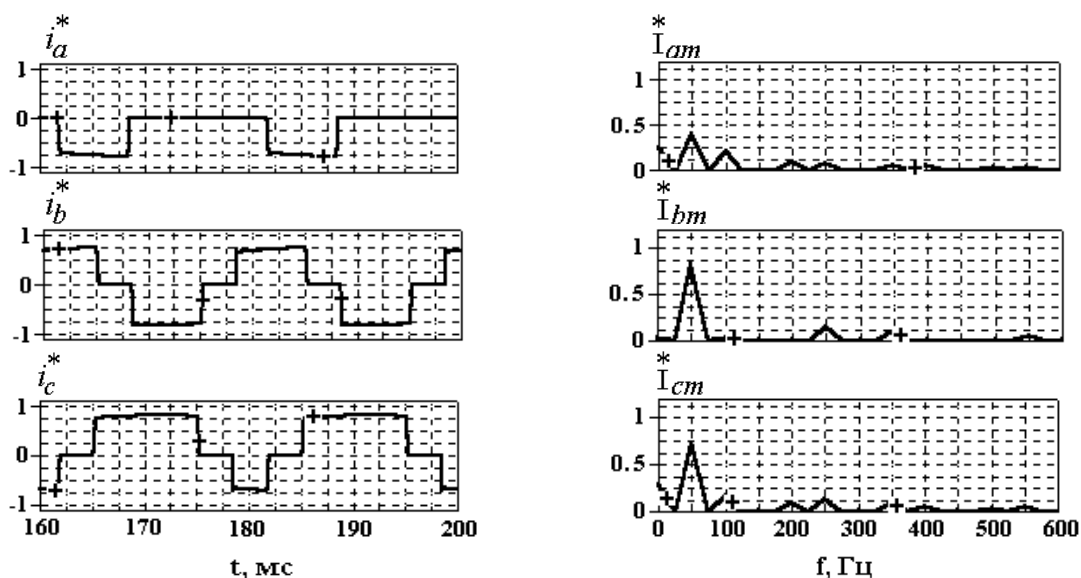


Рис.1.10. Кривые фазных токов и спектры их гармоник трехфазного мостового управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой при отказе в работе плеча анодной группы вентилей моста с тиристором Т6 и $\alpha_{1...5} = 0^0$

Следовательно, по амплитуде первой гармоники и форме тока фазы можно определить конкретно ветвь и плечо моста с нарушением их работы. Такой способ анализа кривых фазных токов может быть проведен на программном уровне с целью автоматизации процедуры диагностирования.

Сущность рассмотренного способа диагностики была показана для крайнего случая: полный отказ в работе плеча моста. Возможность использования данного способа диагностики при частичных нарушениях работы моста, например, тиристор Т1 (Т6) открывается при углах, отличных от заданных углов управления, будет показана в гл.2.

1.2.3. Способ диагностики, основанный на совместном анализе кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения выпрямителя

На практике возможны такие случаи аномальных режимов, когда на один или несколько тириستоров моста подаются импульсы с углами управления, отличными от заданных значений. Такие случаи можно наблюдать при нарушении устройства управления и возникновении аномальных импульсов из-за коммутационных процессов.

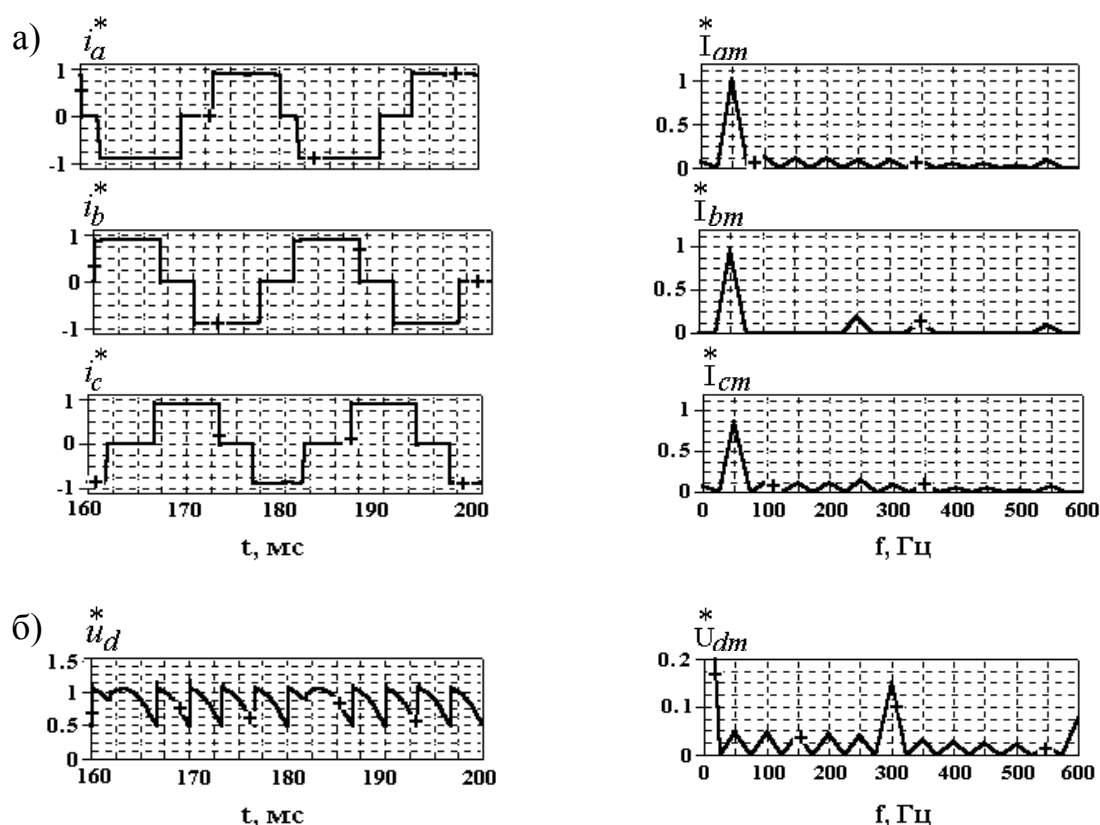


Рис.1.11. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Предлагаемый способ [11] позволяет в любой момент времени при любых углах управления определить номер включенного тиристора и угол его управления.

Сущность предлагаемого способа диагностики рассмотрим на примере самого простого случая, когда при заданных значениях углов управления тиристорами Т2, Т3, Т4, Т5, Т6 $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ на один тиристор, например, Т1 попадает аномальный импульс с углом управления $\alpha_1 = 0^\circ$ (рис.1.6). Для такого вида аномального режима с помощью программы OrCad9.2 согласно эквивалентной схеме выпрямителя (см. рис.1.6) были рассчитаны кривые мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения и спектры их гармоник, которые представлены на рис.1.11.

Предположим, что представленные кривые (рис.1.11) получены экспериментальным путем и нам известны кривые фазных токов, но неизвестны конкретно пульсации выходного напряжения. Определим эти пульсации с помощью кривых фазных токов и принятых выше их условных направлений. Для этого обратимся к рис.1.12, где представлены те же кривые (см. рис.1.11), но в другом масштабе и в угловых единицах.

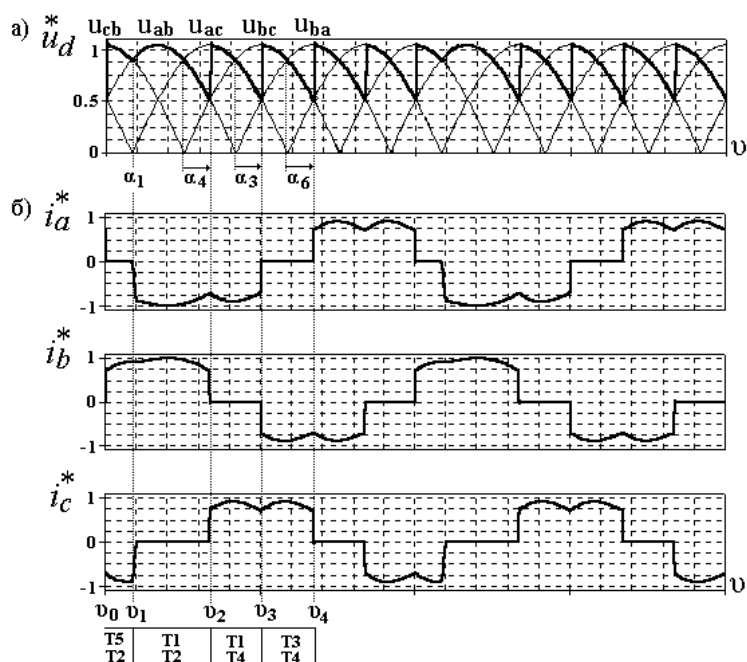


Рис.1.12. Кривые мгновенных значений выходного напряжения (а) и фазных токов (б) трехфазного мостового управляемого выпрямителя при заданных значениях углов управления $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ и угле аномального импульса $\alpha_1 = 0^\circ$

Положительные направления токов фазы совпадают с направлениями от точек a', b', c' , соответственно, к точкам a, b, c (см. рис.1.6). Отрицательные имеют противоположные направления: от точек a, b, c к точкам a', b', c' . В таком случае при рассмотрении кривых видно, что в промежутке времени $v_0 - v_1$ ток фазы “а” равен нулю, ток фазы “b” положителен и направлен от b' к b , ток фазы “с” отрицателен и направлен от c к c' . При таких направлениях фазных токов ток выпрямителя может протекать лишь под воздействием линейного напряжения u_{cb} по цепи $c - c' - T5 - RL - T2 - b' - b$ через тиристоры $T5, T2$. В промежутке времени $v_1 - v_2$ ток фазы “а” имеет отрицательное значение и направлен от a к a' , ток фазы “b” положителен и направлен от b' к b , ток фазы “с” равен нулю. Это означает, что на рассматриваемом участке времени ток выпрямителя под воздействием напряжения u_{ab} протекает через тиристоры $T1, T2$. При этом при $v = v_1$ тиристор $T1$ вступает в работу с углом включения $\alpha_1 = 0^\circ$. В промежутке времени $v_2 - v_3$ ток фазы “а” имеет отрицательное значение и направлен от a к a' , ток фазы “b” равен нулю, ток фазы “с” положителен и направлен от c' к c . В результате под воздействием напряжения u_{ac} ток выпрямителя будет протекать через тиристоры $T1, T4$. На этом участке в работу вступает тиристор $T4$ с углом включения $\alpha_4 > \alpha_1$ и т.д.

Из анализа кривой выходного напряжения (рис.1.12 а) видно, что тиристор $T1$ включается импульсом, значение угла которого отличается от углов включения остальных тиристоров, что говорит об аномальном режиме его работы. При известных значениях времени v могут быть определены углы включения всех тиристоров моста выпрямителя. Это позволяет

произвести диагностику при любом типе аномальных импульсов включения тиристоров. Изложенный способ диагностики является универсальным.

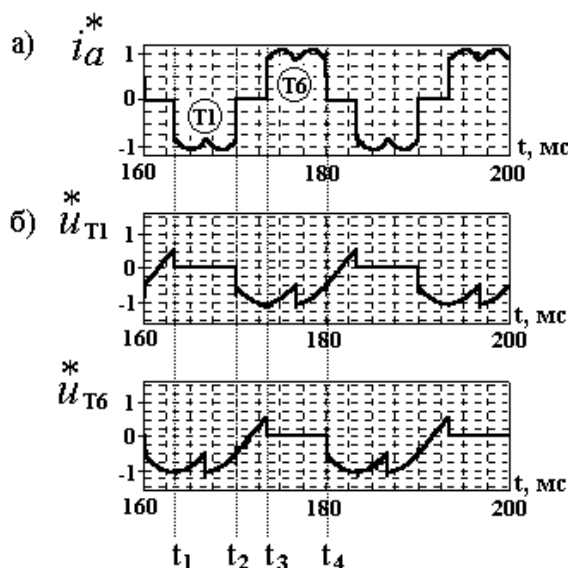


Рис.1.13. Нормальный режим работы трехфазного мостового управляемого выпрямителя с RL – нагрузкой. Кривые мгновенных значений тока фазы “а” (а) и обратного напряжения тиристоров Т1 и Т6 (б)

Для практического применения рассмотренного способа важным моментом является определение заданных условных положительных и отрицательных направлений протекания тока в фазе. Это возможно путем одновременной регистрации фазных токов и обратного напряжения вентилей. На рис.1.13 приведены кривые мгновенных значений тока в фазе “а” и обратное напряжение тиристоров Т1 и Т6. Эквивалентная расчетная схема выпрямителя приведена на рис.1.6.

Анализ данных кривых (рис.1.13), показывает, что на интервале времени $t_1 - t_2$ падение напряжения на Т1 практически равно нулю, это означает - вентиль Т1 открыт. На интервале времени $t_3 - t_4$ падение напряжения на Т6 близко к нулю, значит, в этот момент Т6 открыт. При анализе кривой фазного тока на интервалах времени $t_1 - t_2$ и $t_3 - t_4$ можно однозначно сделать вывод, что положительные импульсы тока соответствуют току тиристора Т6, отрицательные – току тиристора Т1.

Применение рассмотренных выше трех способов диагностики зависит от конкретной схемы выпрямителя, требований к глубине диагностики, от вида нагрузки и режима работы преобразователя.

ГЛАВА 2. АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ДИАГНОСТИКА НЕУПРАВЛЯЕМОГО ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

К аномальным режимам неуправляемого выпрямителя относятся режимы работы при отказе в работе одного или нескольких плеч моста (потеря проводимости вентилях из-за коммутационных перенапряжений, срабатывание плавких вставок плеча из-за перегрузок по току и др.).

Поскольку для диагностирования выпрямителя решающее значение имеет гармонический состав и форма фазных токов, то вначале проведем исследование влияния на данные параметры угла коммутации γ при нормальной работе выпрямителя. Для этих целей зададимся такими значениями индуктивности $L\gamma$, чтобы угол коммутации при токе нагрузке 100 А, который принят за базовое значение, изменялся в пределах $\gamma = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ$. В табл.2.1 приведены данные $L\gamma$ и γ , которые задавались в расчетной схеме выпрямителя, представленной на рис.2.1.

Таблица 2.1

γ , град	0	5	10	15	20	30
$L\gamma$, мкГн	0	25	50	75	100	150
$X\gamma$, Ом	0	0,008	0,016	0,024	0,03	0,047

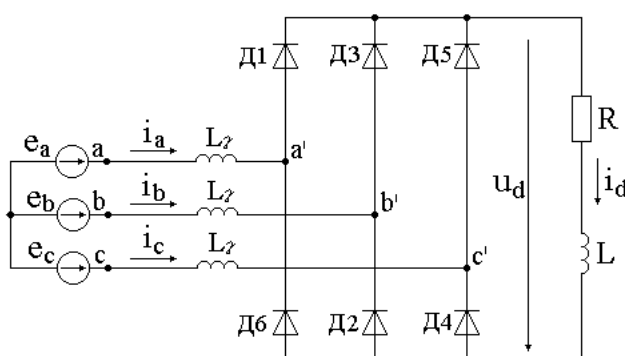


Рис.2.1. Расчетная схема трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя при нормальной работе

Значения действующих значений напряжений e_a, e_b и e_c задавались равными 220 В. Кроме гармонического состава и формы фазных токов, при исследовании анализировались состав гармоник и форма выходного напряжения u_d . При получении амплитуд гармоник в относительных единицах за базовое значение напряжения $U_{\text{баз}}$ принималось среднее значение напряжения, которое определялось как

$$U_{\text{баз}} = 3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{\phi} / \pi = 515 \text{ В}$$

Относительное значение напряжения определялось как $u_d^* = u_d / U_{\text{баз}}$. Базовое значение тока задавалось $I_{\text{баз}} = 100 \text{ А}$.

Относительное значение тока определялось как $i_d^* = i_d / I_{\text{баз}}$.

Параметры нагрузки задавались такими, чтобы получить наименьшую длительность переходного процесса при сохранении прямоугольной формы тока, соответствующей $L \rightarrow \infty$: $R = 5,15 \text{ Ом}$; $L = 5,3 \text{ мГн}$.

Расчеты показали, что при изменении угла коммутации в пределах $\gamma = 0^\circ \div 30^\circ$ состав гармоник и их амплитуды остаются практически неизменными. Форма кривых токов изменяется также незначительно.

На рис.2.2 приведены кривые мгновенных значений фазных токов (рис.2.2 а) и их гармоники и выходного напряжения (рис.2.2 б), соответствующие нормальному режиму работы выпрямителя при $\gamma = 0^\circ$.

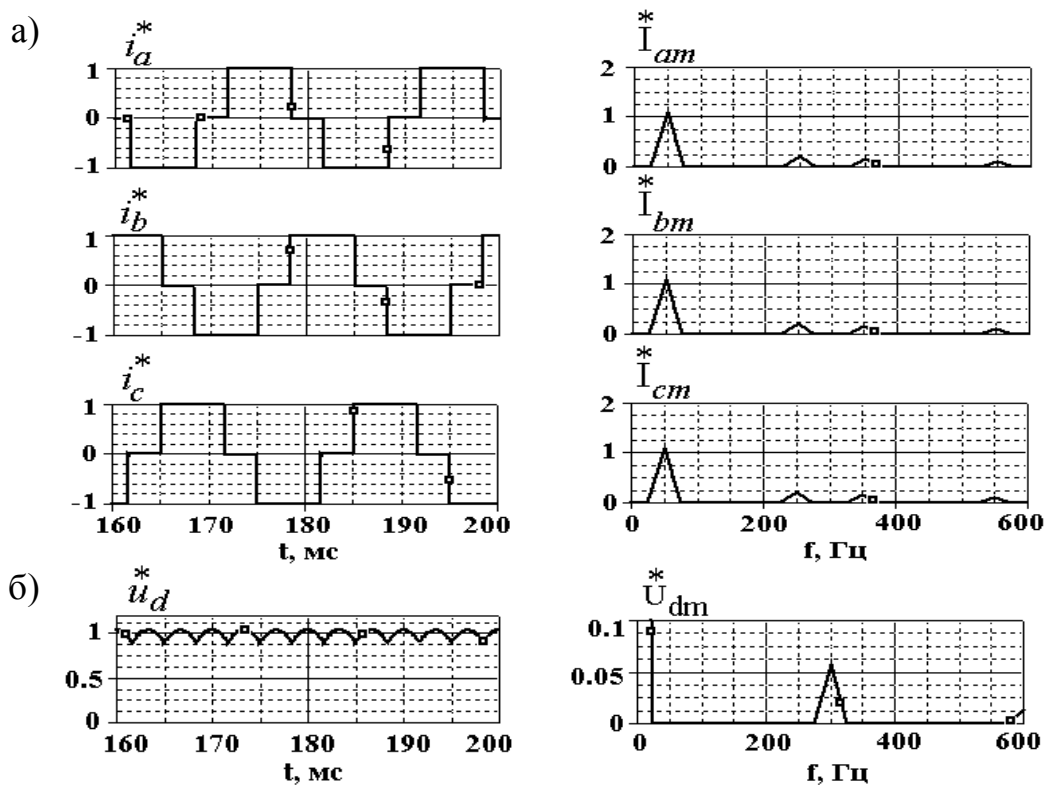


Рис.2.2. Кривые мгновенных значений токов и напряжения выпрямителя и спектры их гармоник, соответствующие нормальному режиму работы при $\gamma = 0^\circ$: а – фазные токи; б – выходное напряжение

На рис.2.3 приведены кривые фазных токов, выходного напряжения и их гармоники при нормальном режиме работы и $\gamma = 30^\circ$.

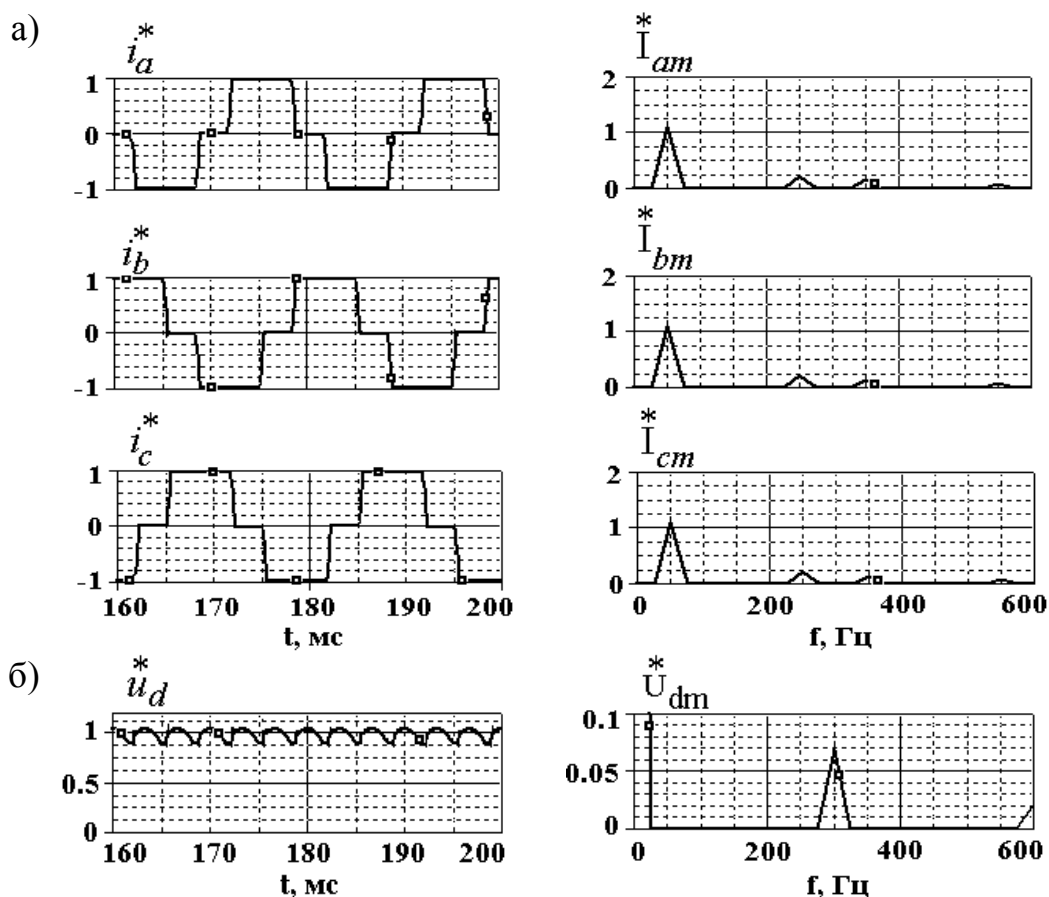


Рис.2.3. Кривые мгновенных значений токов и напряжения выпрямителя и спектры их гармоник, соответствующие нормальному режиму работы при $\gamma = 30^\circ$: а – фазные токи; б – выходное напряжение

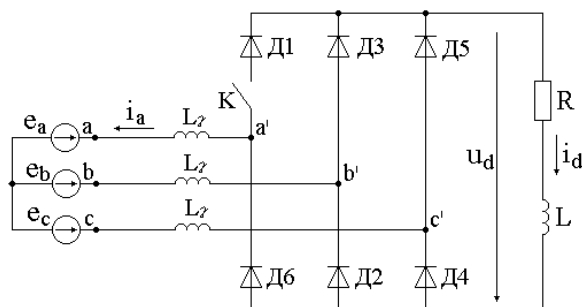
2.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного плеча моста

Для выявления признаков, по которым можно было бы конкретно определить место неисправности в схеме моста, проведем расчеты, аналогичные нормальному режиму, при отказе в работе плеч с диодами Д1, Д3, Д5 и Д6. Эквивалентные расчетные схемы для таких случаев приведены на рис.2.4.

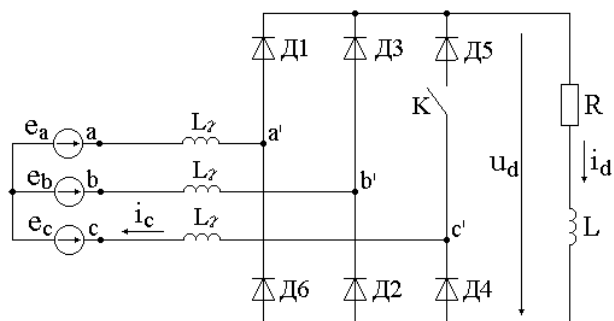
При проведении математического моделирования аномальных режимов работы выпрямителя значение $L\gamma$ соответствовало углу коммутации $\gamma = 0^\circ$.

На рис.2.5 приведены кривые мгновенных значений фазных токов и спектры их гармоник при аномальных режимах работы плеч катодной группы моста выпрямителя при $\gamma = 0^\circ$. Их анализ показывает, что амплитуда первой гармоники в вышедшем из строя плече практически в два раза меньше по сравнению с амплитудами исправных плеч. Второй особенностью является положительный однополярный импульс тока в аварийном плече.

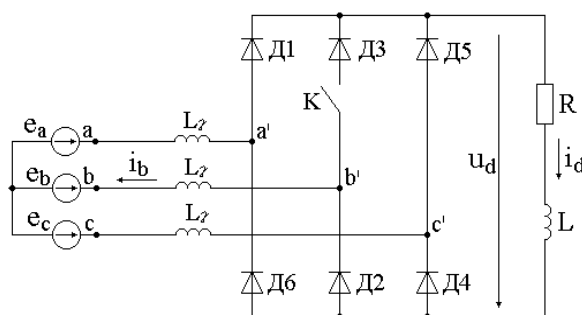
а)



в)



б)



г)

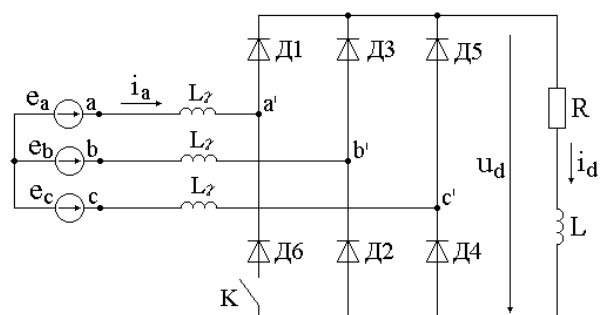


Рис.2.4. Эквивалентные расчетные схемы выпрямителя в аномальных режимах при отказе в работе плеч моста: а – с диодом Д1; б – с диодом Д3; в – с диодом Д5; г – с диодом Д6

Таким образом, для определения места неисправности в плечах диодов катодной группы необходимо сравнить амплитуды первых гармоник фазных токов и определить полярность тока фаз. Положительный однополярный импульс, наименьшая амплитуда первой гармоники фазного тока являются основными признаками диагностирования аномальной работы выпрямителя.

Изменение полярности однополярного импульса фазного тока при наличии остальных признаков означает неисправность в плече анодной группы диодов. На рис.2.6 приведены кривые мгновенных значений фазных токов и их амплитуд для такого аномального режима при отказе в работе плеча с диодом Д6 (рис.2.4 г).

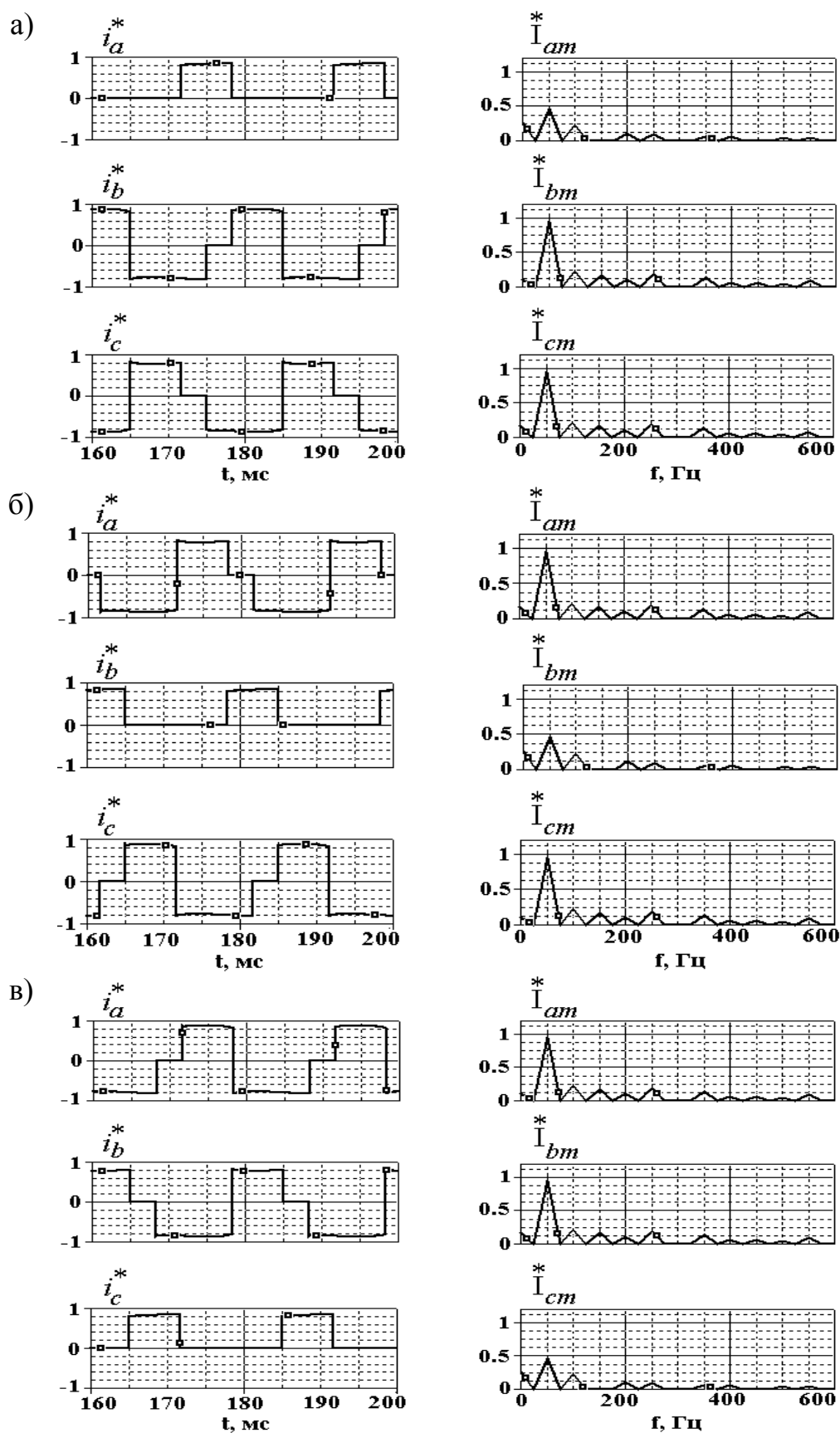


Рис.2.5. Кривые фазных токов и спектры их гармоник при отказе в работе плеч катодной группы диодов: а – плечо с Д1; б – плечо с Д3; в – плечо с Д5

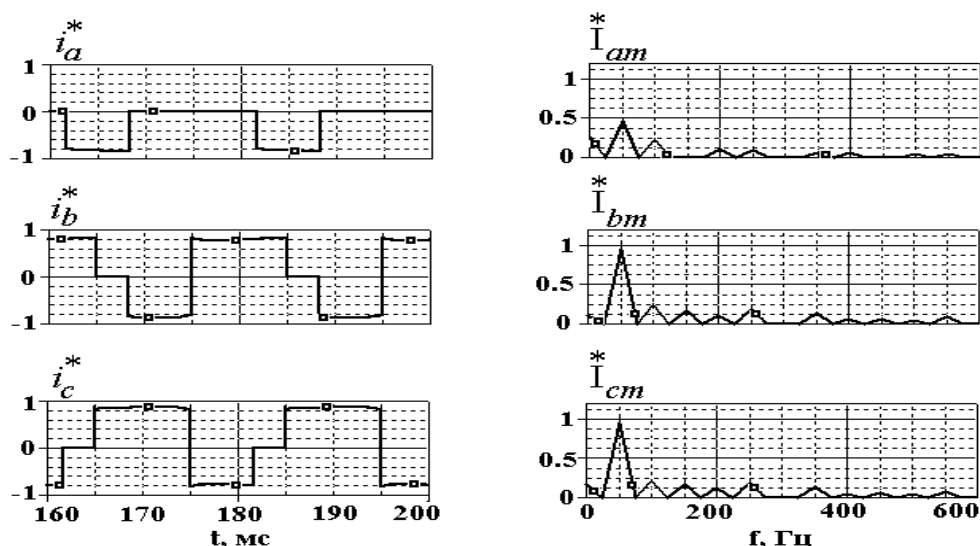


Рис.2.6. Кривые фазных токов и спектры их гармоник при отказе в работе плеча анодной группы с диодом Д6

На рис.2.7 показана типичная кривая выходного напряжения и спектр её гармоник для случая нарушения работы в одном из плеч моста выпрямителя.

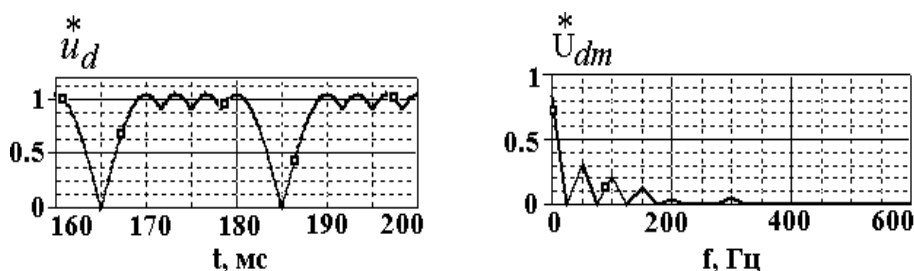


Рис.2.7. Кривая мгновенного значения выходного напряжения и спектр её гармоник при отказе в работе плеча выпрямителя

Визуальная оценка формы выходного напряжения и анализ его гармонического состава позволяют выявить возникновение аномального режима работы выпрямителя без указания конкретного места нарушения работы. Для определения места нарушения необходимо учитывать форму фазных токов.

На рис.2.8, 2.9 в качестве примера приведены кривые фазных токов и выпрямленного напряжения при отказе в работе плеча с диодом Д1 при $\gamma=30^\circ$.

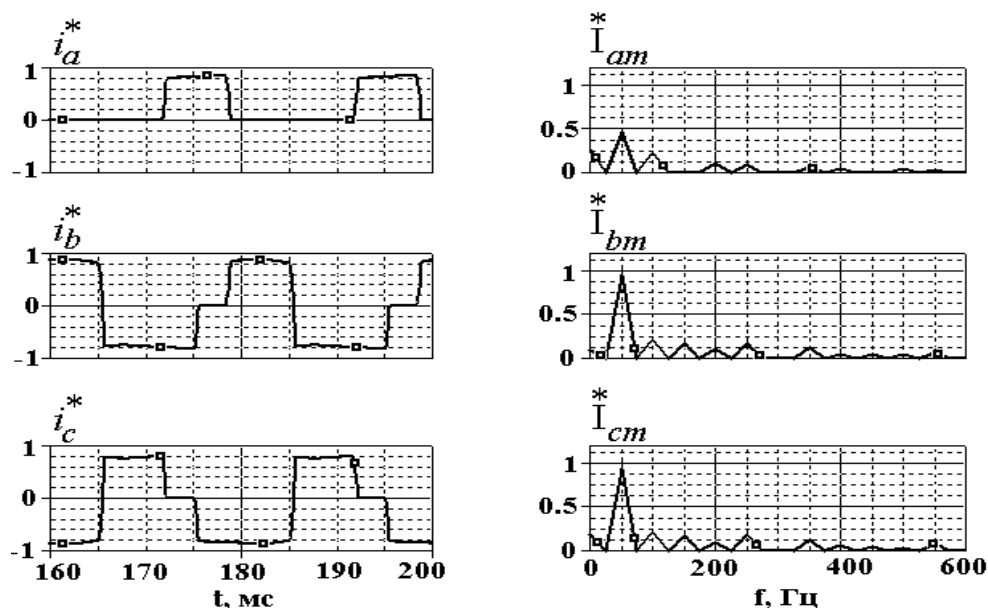


Рис.2.8. Кривые фазных токов и спектры их гармоник при отказе в работе плеча с диодом Д1 и $\gamma = 30^\circ$

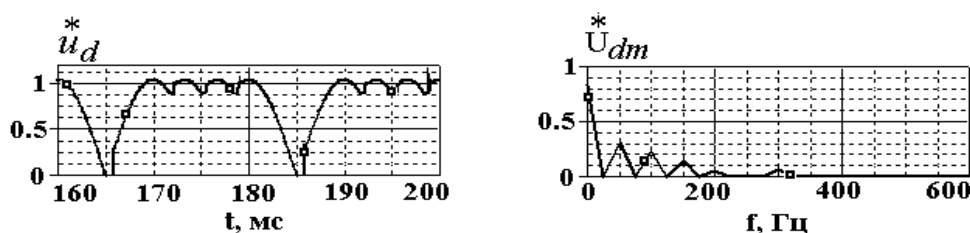


Рис.2.9. Кривая выходного напряжения и спектр её гармоник при отказе в работе плеча с диодом Д1 и $\gamma = 30^\circ$

2.2. Аномальные режимы и диагностика при отказе в работе двух и трех плеч моста выпрямителя

На рис.2.10 приведены расчетные схемы для случаев, когда число плеч с нарушением работы составляет два и три. Определенный интерес представляет сравнение протекания аномальных режимов при выходе из строя двух плеч моста, относящихся к одной (рис.2.10а) или двум (рис.2.10б) группам соединения диодов.

На рис.2.11-2.13 представлены кривые фазных токов и напряжения, полученные в результате моделирования аномальных режимов, соответствующих разомкнутым ключам К1, К2, К3 в схемах рис.2.10 а,б,в.

Анализ данных кривых фазных токов и спектров их гармоник показывает, что отказ в работе двух диодов различных плеч выпрямителя совершенно по-разному отражается на форме токов, напряжении и спектре.

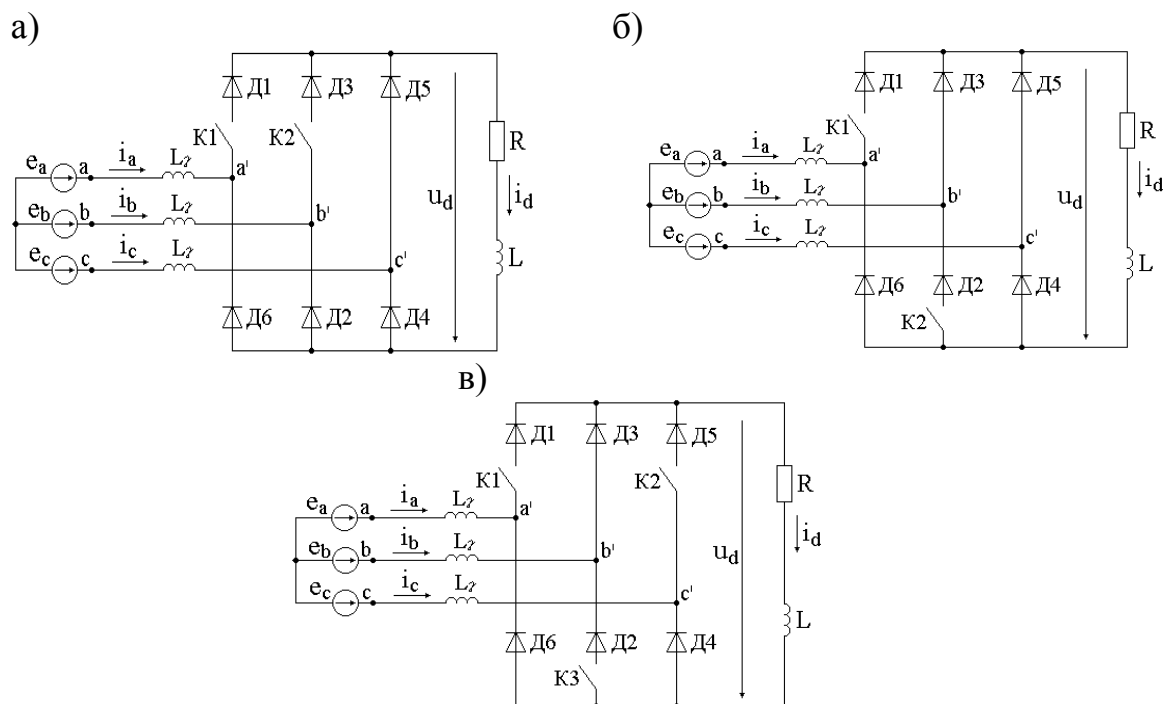


Рис.2.10. Расчетные схемы выпрямителя в аномальных режимах при отказе в работе плеч с диодами: а – Д1, Д3; б – Д1, Д2; в – Д1, Д5, Д2

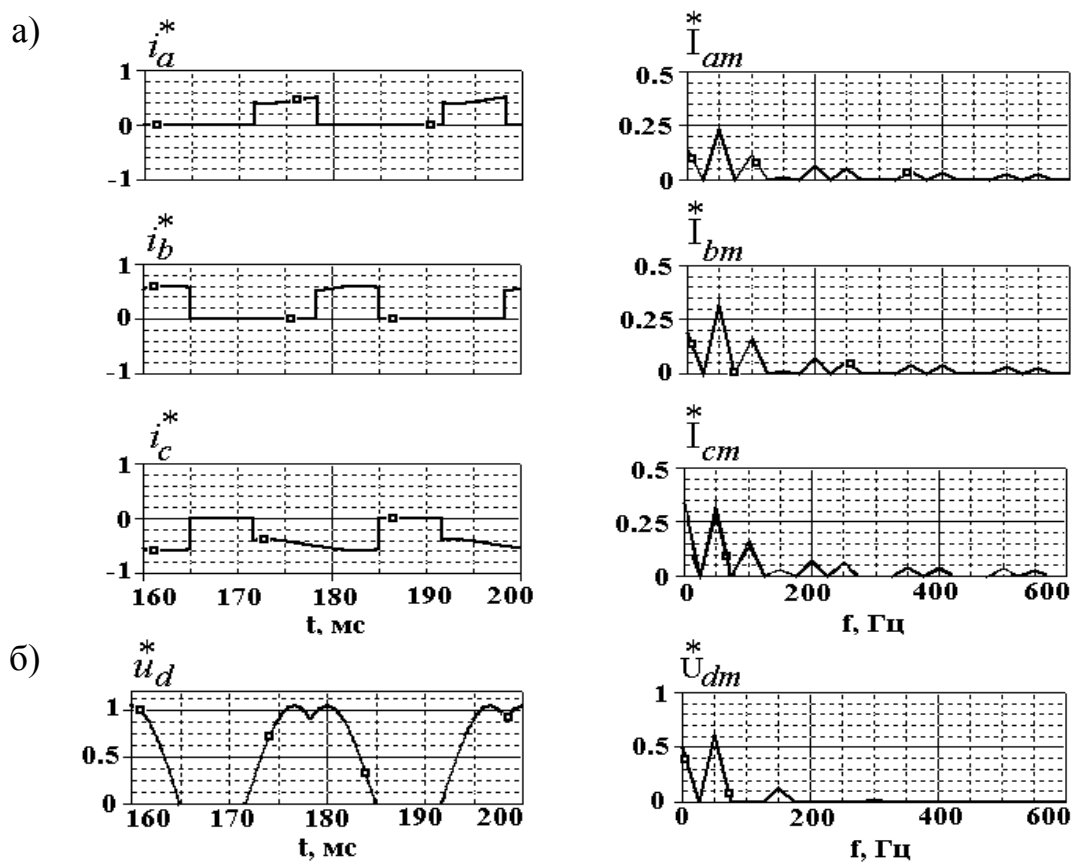


Рис.2.11. Кривые мгновенных значений токов и напряжения выпрямителя и спектры их гармоник при отказе двух плеч моста с диодами Д1 и Д3:
а – фазные токи; б – выходное напряжение

При отказе в работе плеч с диодами катодной группы Д1, Д3 (рис.2.10 а) все токи имеют форму однополярных импульсов (рис.2.11 а), поэтому по полярности импульсов тока и их первым гармоникам определить место неисправности в выпрямителе нельзя. При одновременном отказе в работе диодов катодной (Д1) и анодной (Д2) групп, согласно кривым рис.2.12, неисправное плечо может быть определено.

Особый интерес представляет аномальный режим работы выпрямителя, вызванный отказом трех плечей его моста с диодами Д1, Д2 и Д5 (рис.2.10 в). Кривые токов и напряжения и спектры их гармоник, соответствующие такому случаю, приведены на рис.2.13. Рассмотрение кривой выходного напряжения (рис.2.13 б) показывает, что существуют интервалы времени, когда мгновенные значения кривой выходного напряжения имеют отрицательные значения. Это свидетельствует о наличии моментов времени, когда происходит отдача энергии, накопленной в индуктивном элементе нагрузки, в питающую сеть (рекуперация), что является необычным для неуправляемых выпрямителей.

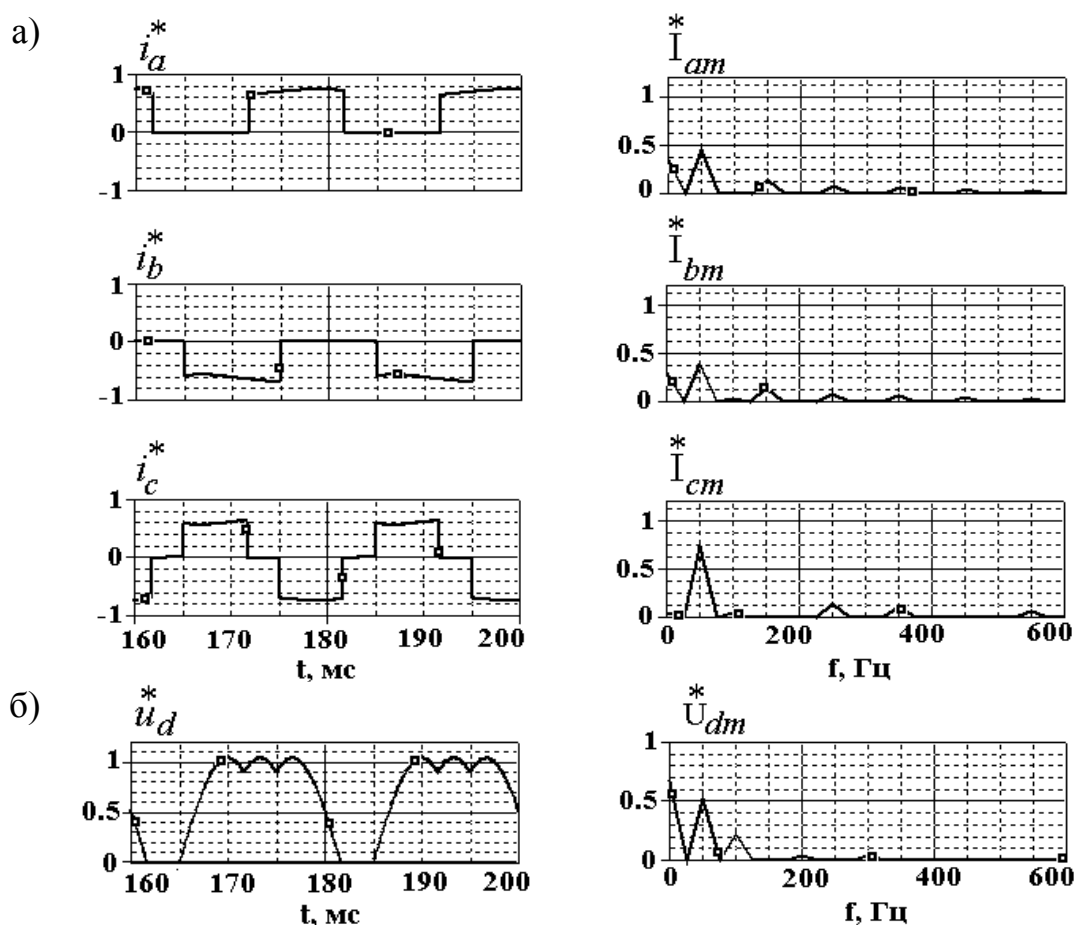


Рис.2.12. Кривые мгновенных значений токов и напряжения выпрямителя и спектры их гармоник при отказе двух плеч моста с диодами Д1 и Д2:

а – фазные токи; б – выходное напряжение

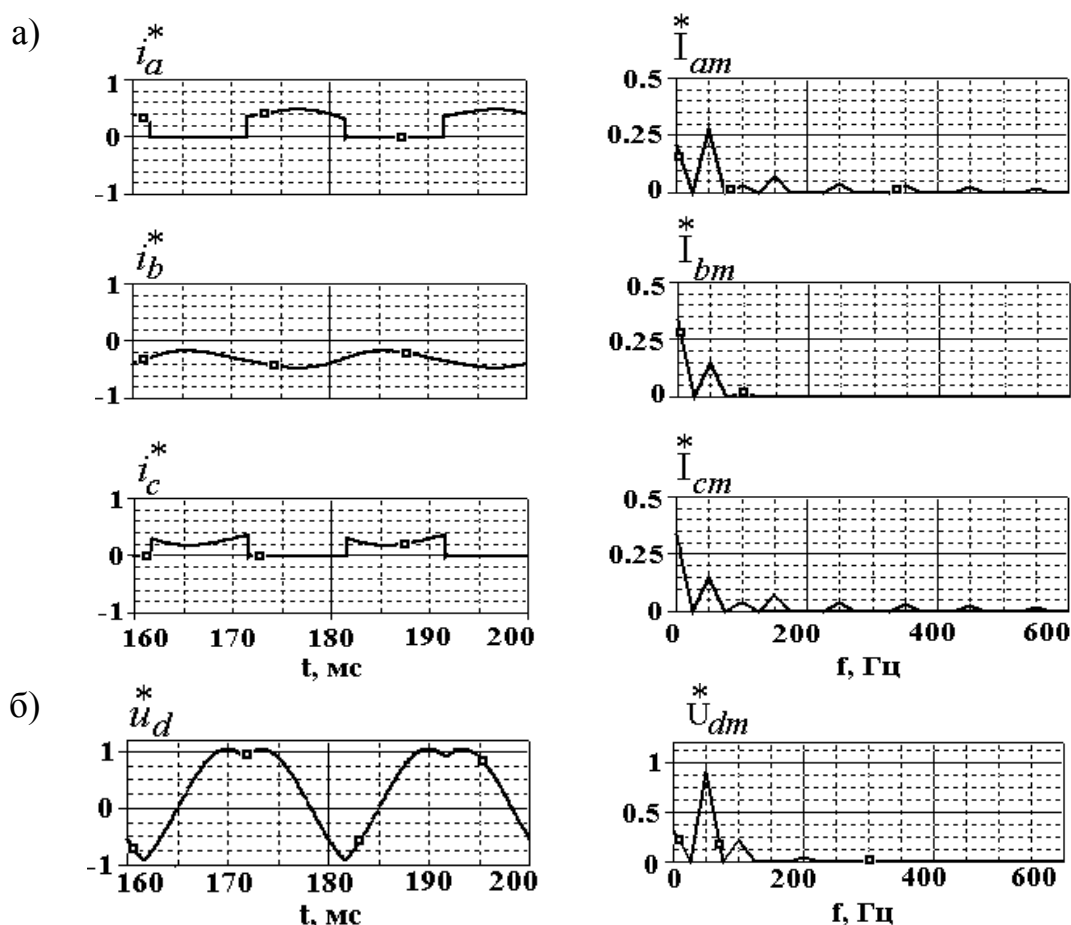


Рис.2.13. Кривые мгновенных значений токов и напряжения выпрямителя и спектры их гармоник при отказе трёх плеч моста с диодами Д1, Д2 и Д5:
а – фазные токи; б – выходное напряжение

Рассмотренные случаи отказа в работе двух и трёх плеч моста выпрямителя показывают, что диагностирование по спектру гармоник и полярности импульса тока возможно при выходе не более двух плеч разных групп моста.

ГЛАВА 3. АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ДИАГНОСТИКА ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО ПОЛУУПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

3.1. Исследование аномальных режимов работы и диагностика трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке

Трехфазный полууправляемый выпрямитель (рис.3.1) находит применение в установках средней мощности для питания обмоток возбуждения и якоря двигателей постоянного тока. Достоинством полууправляемого выпрямителя является простота в управлении и более низкая стоимость по сравнению с полностью управляемым выпрямителем. К

особенностям несимметричного выпрямителя относятся отличие режимов его работы при $0^0 \leq \alpha_{1,3,5} \leq 60^0$ и $60^0 < \alpha_{1,3,5} \leq 120^0$ (индекс соответствует номеру тиристора, см. рис.3.1) и невозможность осуществления рекуперации энергии в сеть. Однако следует отметить некоторые улучшения $\cos \varphi$ по сравнению с полностью управляемым выпрямителем.

При исследовании аномальных режимов работы рассматриваемого выпрямителя (рис.3.1) параметры его нагрузки и действующие значения напряжений питающей сети были приняты такими же, как и при исследовании аномальных режимов работы неуправляемого выпрямителя (рис.2.1).

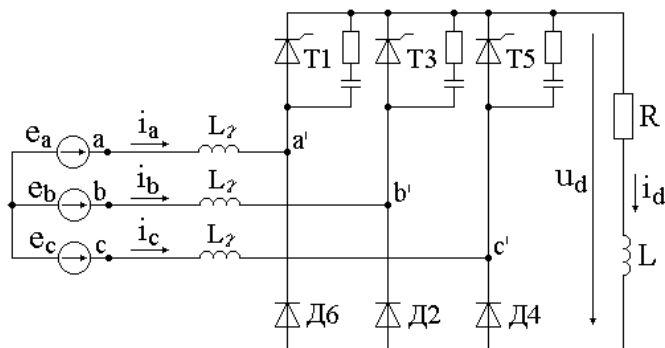


Рис.3.1. Расчетная схема
полууправляемого трехфазного мостового
выпрямителя при RL-нагрузке

3.1.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя

Аномальные режимы работы полууправляемого выпрямителя так же, как и для неуправляемого выпрямителя, могут быть вызваны отказом в работе одного или нескольких плеч его моста. Схема трехфазного мостового несимметричного выпрямителя для расчета таких видов аномальных режимов его работы приведена на рис.3.2.

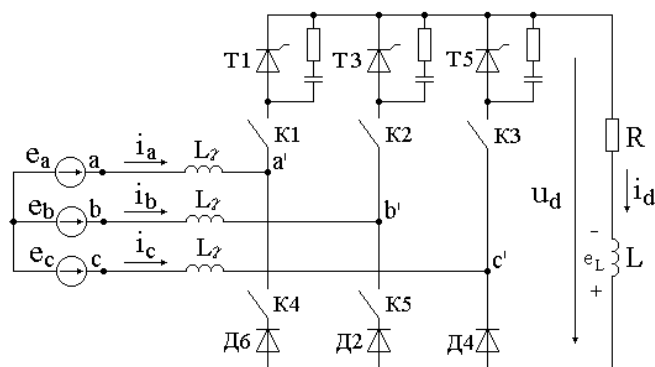


Рис.3.2. Эквивалентная расчетная схема трехфазного мостового
полууправляемого выпрямителя с RL – нагрузкой при отказах в работе
одного или нескольких плеч моста

На рис.3.3, 3.4 показаны расчетные кривые фазных токов и выходного напряжения и спектры их гармоник при отказе в работе плеча катодной

группы вентилях. Данным режимам работы соответствует расчетная схема (рис.3.2) при замкнутых ключах К4, К5 и разомкнутых ключах К1, К2, К3.

Отказу в работе плеча анодной группы вентилях соответствует расчетная схема (рис.3.2) при замкнутых ключах К1, К2, К3, К5 и разомкнутом ключе К4. На рис.3.5 приведены типичные кривые фазных токов и выходного напряжения для случая выхода из строя плеча анодной группы вентилях (плечо с диодом Д6).

Аномальному режиму работы выпрямителя при отказе в работе двух плеч моста с Т1 и Д2 соответствует расчетная схема рис.3.2 при замкнутых ключах К2, К3, К4 и разомкнутых К1, К5. Расчетные кривые токов и напряжения и спектры их гармоник представлены на рис.3.6.

Анализ кривых фазных токов и напряжения, соответствующих отказу в работе одного плеча моста полууправляемого выпрямителя (рис.3.3, 3.4, 3.5), позволил выявить ряд характерных особенностей аномальных режимов несимметричного трехфазного мостового выпрямителя, которые существенно отличаются от аналогичных режимов неуправляемого выпрямителя.

В первую очередь, к ним следует отнести различие форм кривых выходного напряжения при отказе в работе плеч, например, катодной группы вентилях с тиристором Т1 (рис.3.4) и анодной группы с диодом Д6 (рис.3.5 б), примыкающими к фазе “а”. Такое различие можно объяснить, обратившись к расчетной схеме, представленной на рис.3.2, и к кривым выходного напряжения с обозначением линейных напряжений для двух случаев:

- выход из строя плеча катодной группы вентилях (рис.3.7 а);
- выход из строя плеча анодной группы вентилях (рис.3.7 б).

Вначале рассмотрим электромагнитные процессы, протекающие при отказе плеча катодной группы вентилях выпрямителя.

При замкнутых ключах К2, К3, К4, К5 и разомкнутом К1 (рис.3.2) в промежутке времени $u_1 - u_2$ (рис.3.7а) ток будут проводить вентили Т5, Д2, и к нагрузке приложится линейное напряжение u_{cb} . На отрезке времени $u_2 - u_3$ из-за разомкнутого ключа К1 ток нагрузки будет по-прежнему протекать под воздействием линейного напряжения u_{cb} вплоть до момента времени u_3 , когда его значение станет равным нулю. При $u = u_3$ полярность напряжения u_{cb} изменит знак, в результате чего произойдет выключение диода Д2 и вступление в работу диода Д4 под воздействием ЭДС самоиндукции e_L дросселя L. Ток станет протекать по цепи: $(+e_L) - Д4 - Т5 - RL - (-e_L)$ в течение времени $u_3 - u_4$. На этом отрезке преобразователь работает в режиме выпрямителя с шунтирующим диодом, роль которого играют вентили Д4, Т5. При $u = u_4$ включается тиристор Т3 ($\alpha_3 = 0^0$), в результате чего произойдет коммутация тока с тиристора Т5 на Т3, и к нагрузке приложится линейное напряжение u_{bc} .

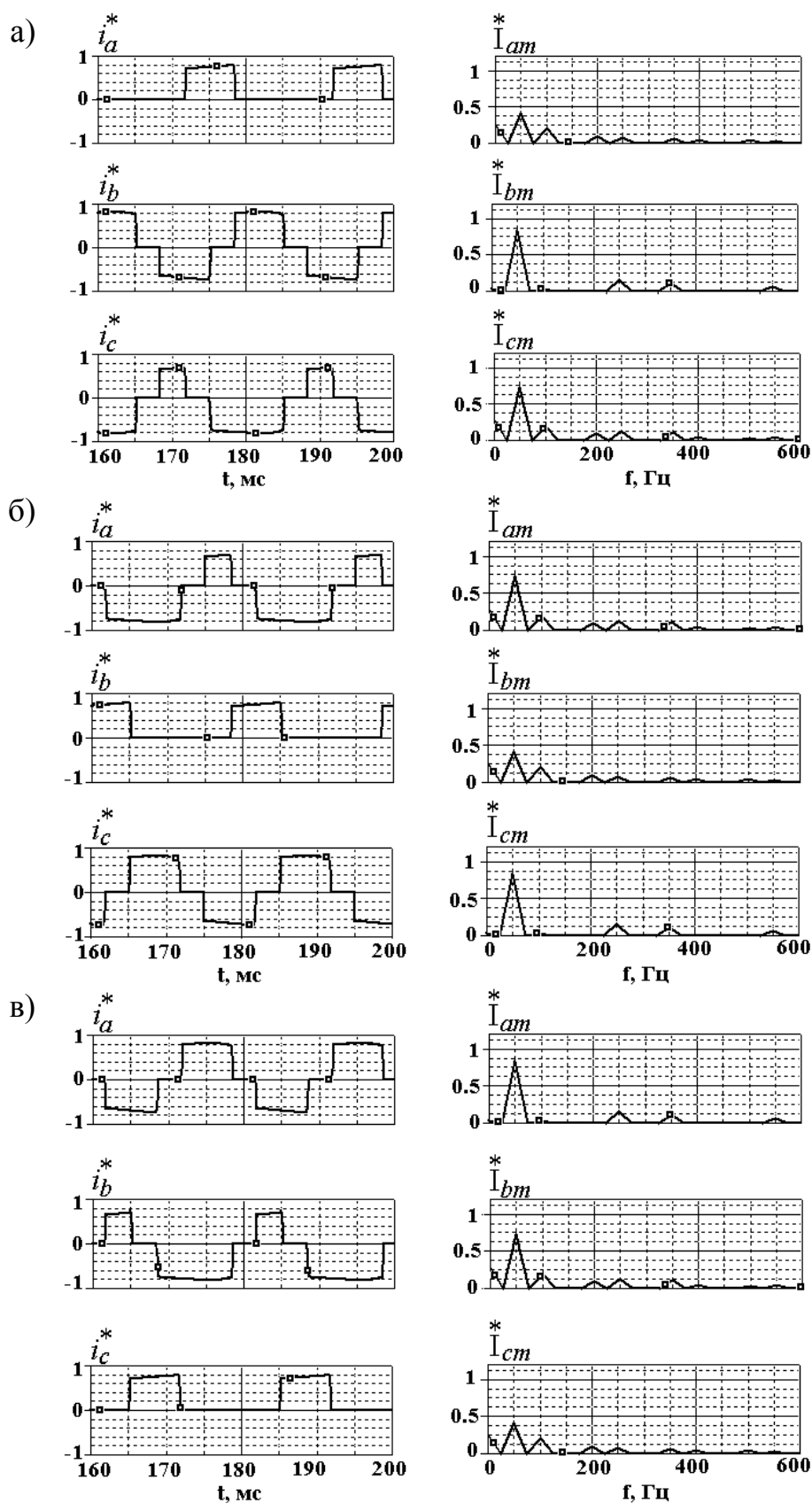


Рис.3.3. Полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Кривые фазных токов и их спектры при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$ и отказе в работе плеча катодной группы вентилей: а – с тиристором Т1; б – с тиристором Т3; в – с тиристором Т5

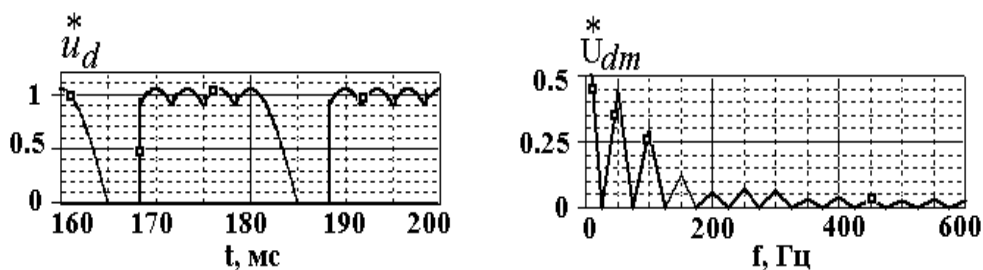


Рис.3.4. Полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Выходное напряжение и спектр его гармоник при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$ и отказе в работе плеча катодной группы вентилей (плечо с тиристором Т1)

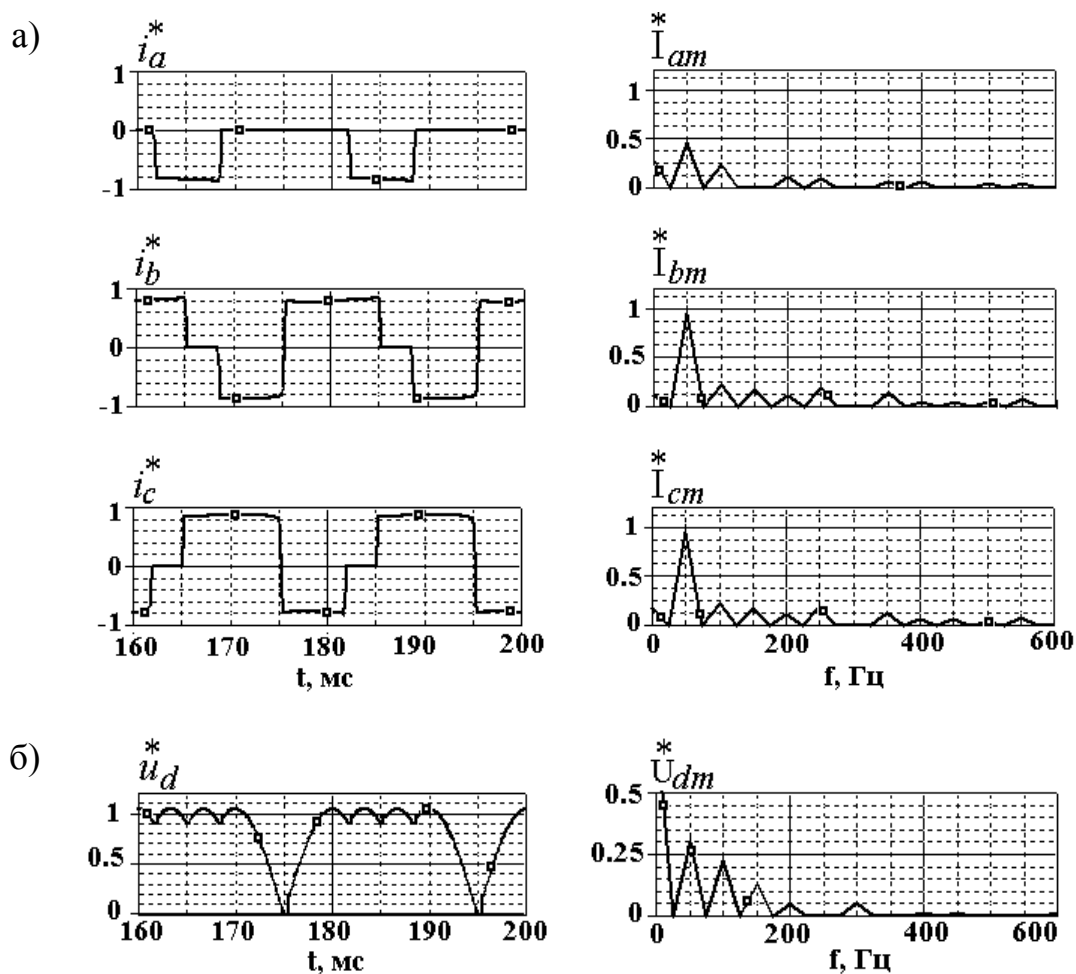


Рис.3.5. Полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Отказ в работе плеча анодной группы моста с диодом Д6 при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

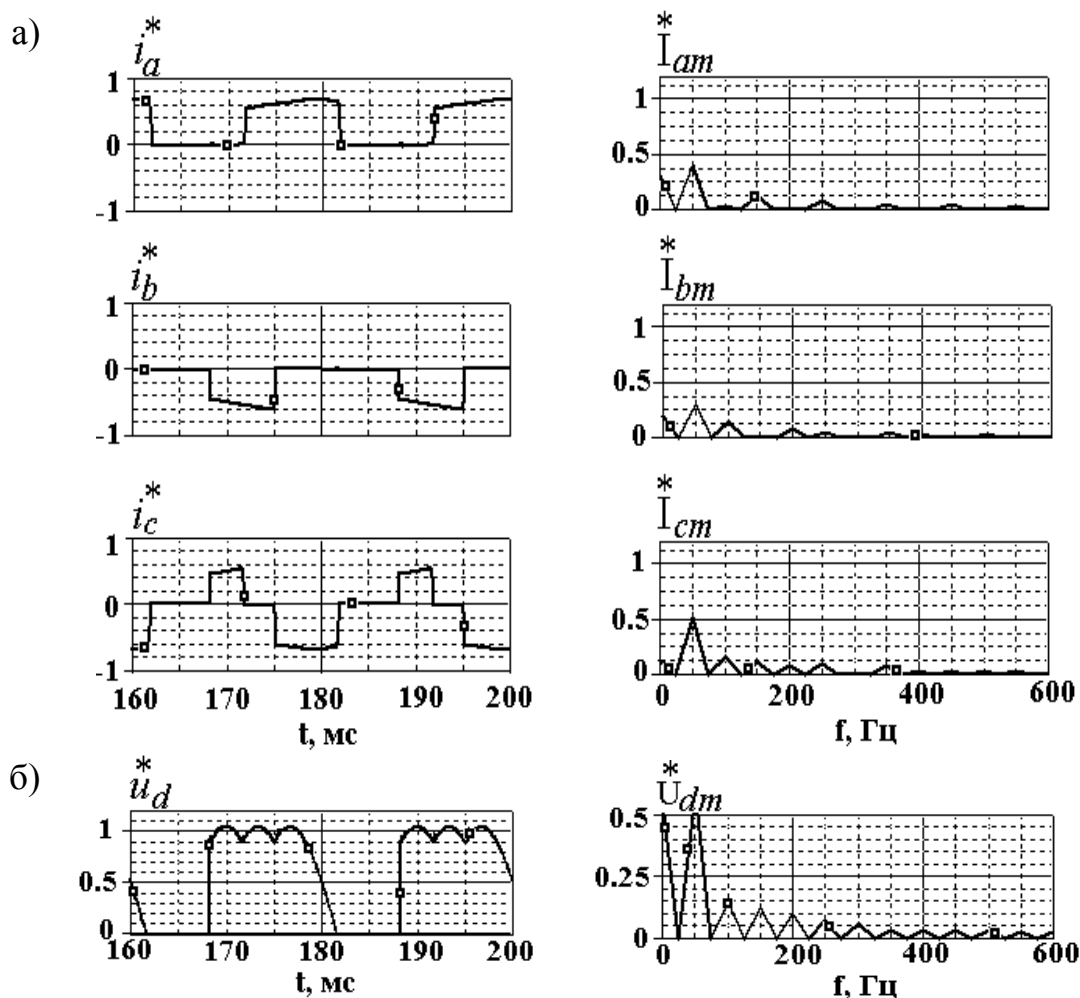


Рис.3.6. Полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Отказ в работе двух плеч моста с тиристором $T1$ и диодом $D2$ при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

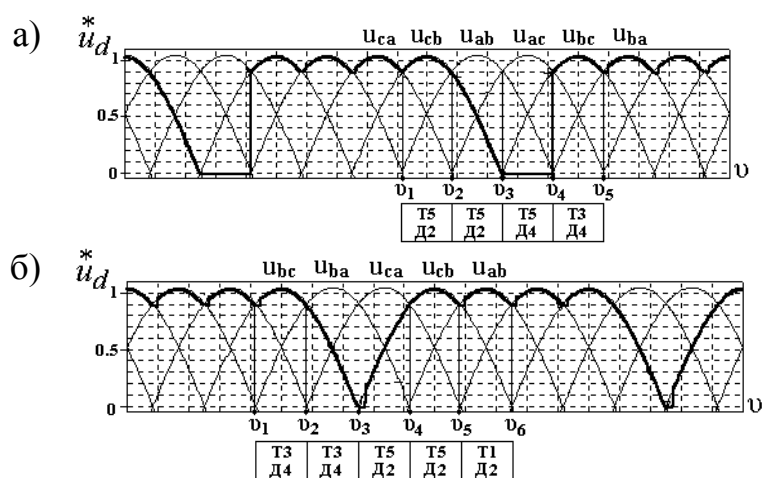


Рис.3.7. Кривые выходного напряжения полууправляемого выпрямителя при отказе одного плеча моста: а – отказ плеча катодной группы; б – отказ плеча анодной группы

Иначе протекают электромагнитные процессы при отказе в работе плеча анодной группы вентилей выпрямителя (рис.3.2, ключ К4 разомкнут).

В отличие от вышерассмотренного случая, из-за разомкнутого ключа К4 в формировании напряжения нагрузки не могут участвовать линейные напряжения u_{ba} и u_{ca} . Поэтому на участке $u_1 - u_3$ (рис.3.7б) ток проводят плечи моста с тиристором Т3 и диодом Д4 под воздействием линейного напряжения u_{bc} . В момент времени $u = u_3$ полярность этого напряжения меняется. Так как в этот момент на тиристор Т5 подается импульс управления ($\alpha_5 = 0^\circ$), то тиристор Т5 и диод Д2 вступают в работу. Происходит коммутация тока с Т3 на Т5 и с Д4 на Д2. В результате к нагрузке прикладывается линейное напряжение u_{cb} . Такое состояние сохраняется до момента времени $u = u_5$ (см. рис.3.7 б) и т.д.

Проведенный анализ электромагнитных процессов подтверждает расчетные данные.

Аналогично протекают электромагнитные процессы при отказе в работе одного плеча в неуправляемом выпрямителе (рис.2.4 а, ключ К разомкнут). Этим объясняется идентичность кривых напряжения полууправляемого выпрямителя при отказе в работе плеча анодной группы и неуправляемого выпрямителя при выходе из строя одного плеча моста (рис.2.7, 3.7 б).

Отличие форм кривых выходного напряжения полууправляемого выпрямителя при отказе в работе плеча моста различных групп вентилей отражается на спектрах их гармоник. Их сравнение показывает, что в спектре выпрямленного напряжения при отказе в работе плеча моста анодной группы вентилей отсутствует 5-я гармоника. В случае отказа плеча катодной группы данная гармоника присутствует. Это даёт возможность по анализу гармонического состава выходного напряжения указать группу вентилей моста полууправляемого выпрямителя, где произошел отказ в работе плеча моста.

Анализ спектров гармоник фазных токов, соответствующих аномальным режимам, вызванных отказом в работе плеч моста катодной и анодной групп вентилей (рис.3.3 а, 3.5 а), показал, что амплитуда первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви с неисправным плечом, меньше амплитуд гармоник тока исправных ветвей моста. Это позволяет по амплитуде первой гармоники фазного тока определить ветвь моста, состоящую из двух плеч анодной и катодной групп, соединенных последовательно, в которой существует неисправность. Конкретное аварийное плечо ветви определяется по полярности импульса тока. Положительный импульс, совпадающий с условным положительным направлением тока, означает выход из строя вентиля катодной группы, отрицательный – анодной группы.

3.1.2. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при заданных значениях углов управления тиристорами, равных нулю, и асимметрии импульса одного плеча

Ниже рассматривается случай, когда на тиристоры Т3 и Т5 (рис.3.1) подаются импульсы с равными углами управления $\alpha_3 = \alpha_5 = 0^0$, а на тиристор Т1 подается аномальный импульс с углом включения α_1 , изменяющимся в пределах от $\alpha_1 = 0^0$ до $\alpha_1 = 120^0$. На практике это возможно в случае нарушения работы устройства управления или из-за коммутационных помех. Исследование таких режимов работы преобразователя позволило выявить ряд особенностей его работы. В первую очередь, к ним следует отнести снижение амплитуды первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви моста с тиристором с углом управления α_1 , по сравнению со значениями амплитуд первых гармоник токов других фаз.

На рис.3.8 представлены зависимости амплитуд 1-й гармоники фазных токов от угла управления аномального импульса включения тиристора Т1

$$\alpha_1: \overset{*}{I_{am(1)}} = f(\alpha_1), \overset{*}{I_{bm(1)}} = f(\alpha_1), \overset{*}{I_{cm(1)}} = f(\alpha_1) \text{ при } \alpha_{3,5} = 0^0.$$

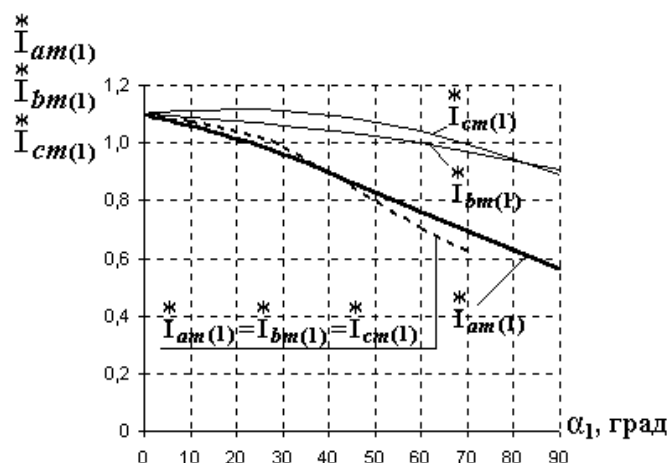
Из рис.3.8 видно, что амплитуда первой гармоники тока $\overset{*}{I_{am(1)}}$ фазы “а” значительно меньше амплитуд других фаз $\overset{*}{I_{bm(1)}}$ и $\overset{*}{I_{cm(1)}}$. Их сравнение между собой дает возможность сразу определить ветвь моста с тиристором, угол управления которого отличен от заданных (нормальных) значений углов управления $\alpha_{3,5} = 0^0$. На этом же рисунке (пунктиром) приведены зависимости амплитуд первых гармоник фазных токов при нормальном режиме работы преобразователя $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5$. Амплитуды токов всех фаз равны между собой. Выявленная особенность позволяет составить алгоритм диагностики для рассмотренного случая.

На рис.3.9 в качестве примера приведены, соответственно, кривые токов и напряжения и спектры их гармоник для нормального режима при $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5 = 0^0$.

На рис.3.10 показаны аналогичные кривые и спектры их гармоник при углах управления $\alpha_{3,5} = 0^0$ и $\alpha_1 = 10^0$.

Анализ приведенных кривых и соответствующих спектров амплитуд гармоник позволил выявить ряд особенностей при таком виде аномальных режимов несимметричного управляемого выпрямителя.

К ним следует отнести следующие. Всякое отклонение от симметрии управления тиристорами сказывается на составе гармоник фазных токов и выходного напряжения, а также на значениях их амплитуд. Так, например, отклонение угла управления тиристором Т1 на 10^0 (рис.3.10) приводит к возникновению практически всех гармоник в спектре выходного напряжения и в спектрах фазных токов. Асимметрия в управлении сказывается на форме тока и напряжения.



— $I_{am}^*(1), I_{bm}^*(1), I_{cm}^*(1)$ при аномальном режиме $\alpha_{3,5} = 0, \alpha_1 = 0 - 90^\circ$;

--- $I_{am}^*(1), I_{bm}^*(1), I_{cm}^*(1)$ при нормальном режиме $\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5$

Рис.3.8. Зависимости амплитуд первой гармоники фазных токов трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с RL - нагрузкой от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 0^\circ$:

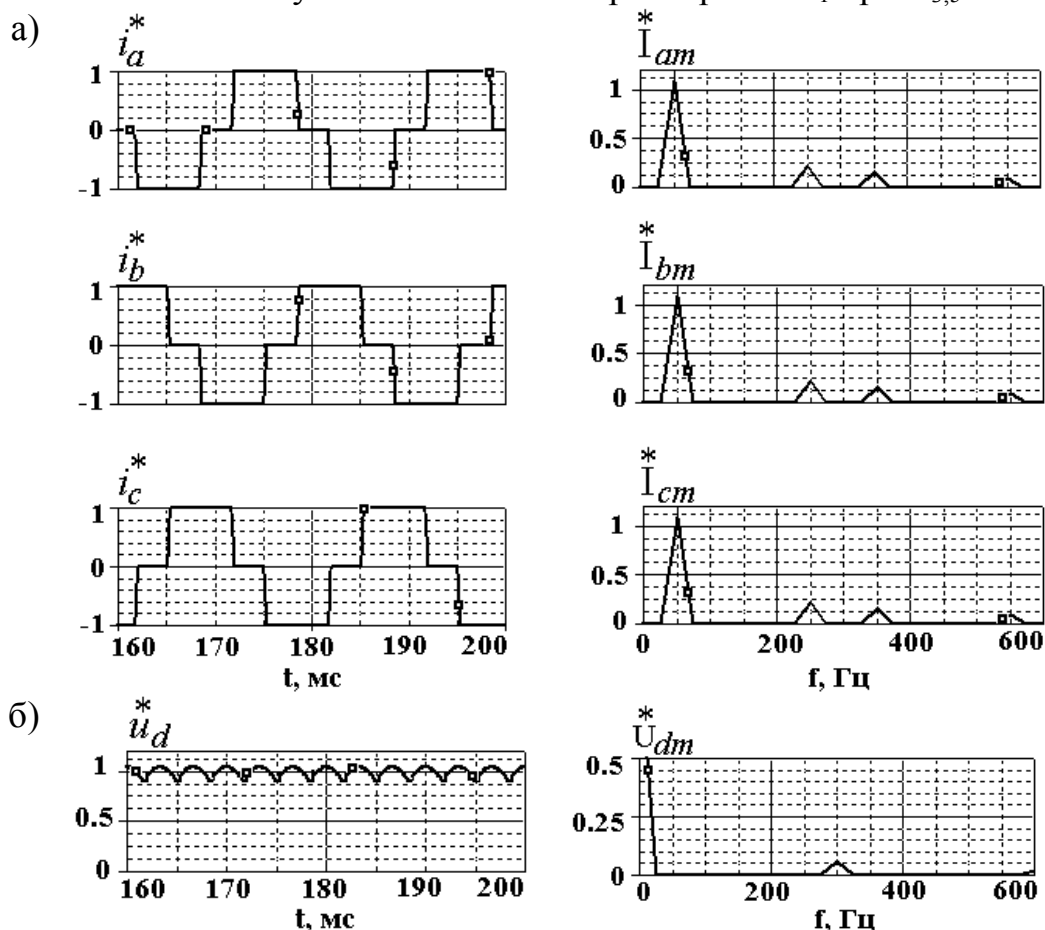


Рис.3.9. Трехфазный мостовой полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Нормальный режим работы при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$ и $\gamma = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

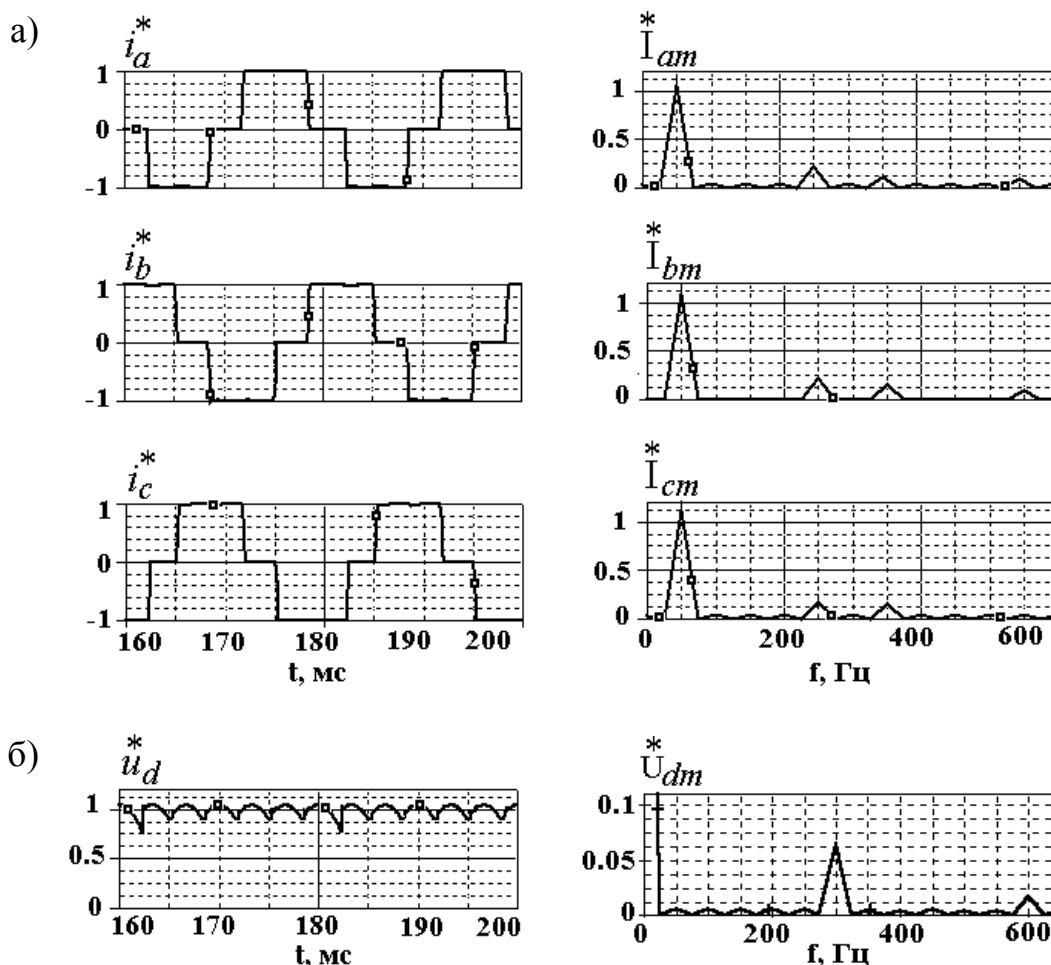


Рис.3.10. Трехфазный мостовой полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 0^0$ и $\alpha_1 = 10^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

Визуальная оценка формы напряжения даже при таком незначительном отклонении угла управления позволяет сделать вывод, что нарушение в системе управления произошло в одном тиристоре с углом $\alpha = 10^0$ при остальных углах управления $\alpha = 0^0$. Конкретно, в какой ветви моста произошло нарушение работы, можно определить по сравнению амплитуд первых гармоник. Наименьшее значение амплитуды в фазе “а” показывает, что отклонение от нормальной работы произошло в ветви, примыкающей к фазе “а” с тиристором Т1 и диодом Д6.

Это подтверждается несколько меньшей продолжительностью протекания тока в отрицательный период (рис.3.10 а). С увеличением угла управления α_1 при постоянных значениях $\alpha_3 = \alpha_5 = 0^0$ эта тенденция сохраняется.

Таким образом, основным признаком, по которому можно диагностировать работу преобразователя в рассматриваемом аномальном режиме, является уменьшение амплитуды первой гармоники тока фазы,

примыкающей к ветви с неисправным плечом, по сравнению с амплитудами тока других фаз.

3.1.3. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при заданных значениях углов управления, отличных от нуля, и асимметрии импульса одного плеча

В рассматриваемом случае, в отличие от предыдущего, аномальный импульс включения тиристора Т1, вызванный коммутационными процессами или другими причинами, подается с углом α_1 , который изменяется в пределах $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$, т.е. слева от заданных (нормальных) значений углов управления, когда $\alpha_{3,5} = 30^\circ$, и справа от заданных значений, когда $30^\circ < \alpha_1 \leq 60^\circ$ (рис. 3.11). Первому случаю ($\alpha_1 = 0^\circ$) соответствуют расчетные кривые фазных токов и выходного напряжения, представленные на рис.3.12. Аномальные кривые, приведенные на рис.3.13, соответствуют второму случаю, когда $\alpha_1 = 40^\circ$.

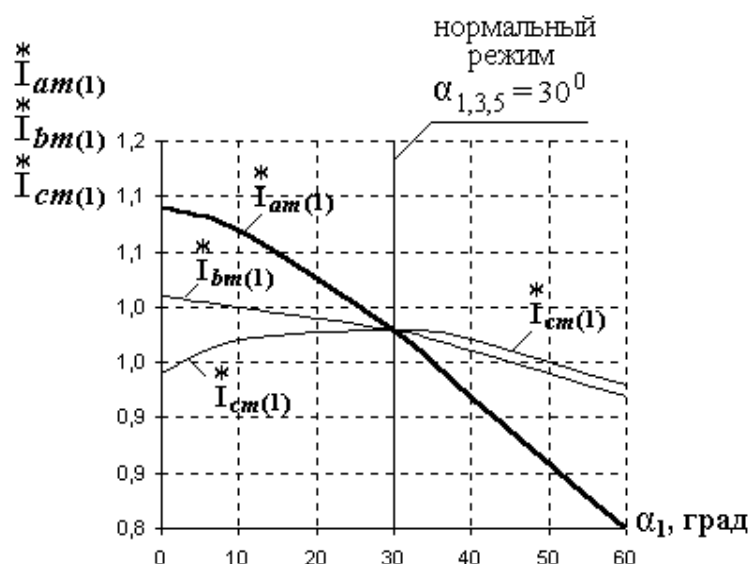


Рис.3.11. Зависимости амплитуд первых гармоник фазных токов полууправляемого выпрямителя от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 30^\circ$

Анализ кривых, приведенных на рис.3.11, показывает, что при $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 30^\circ$ амплитуда первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви с отклонением от нормального управления, превышает амплитуды первых гармоник тока остальных фаз.

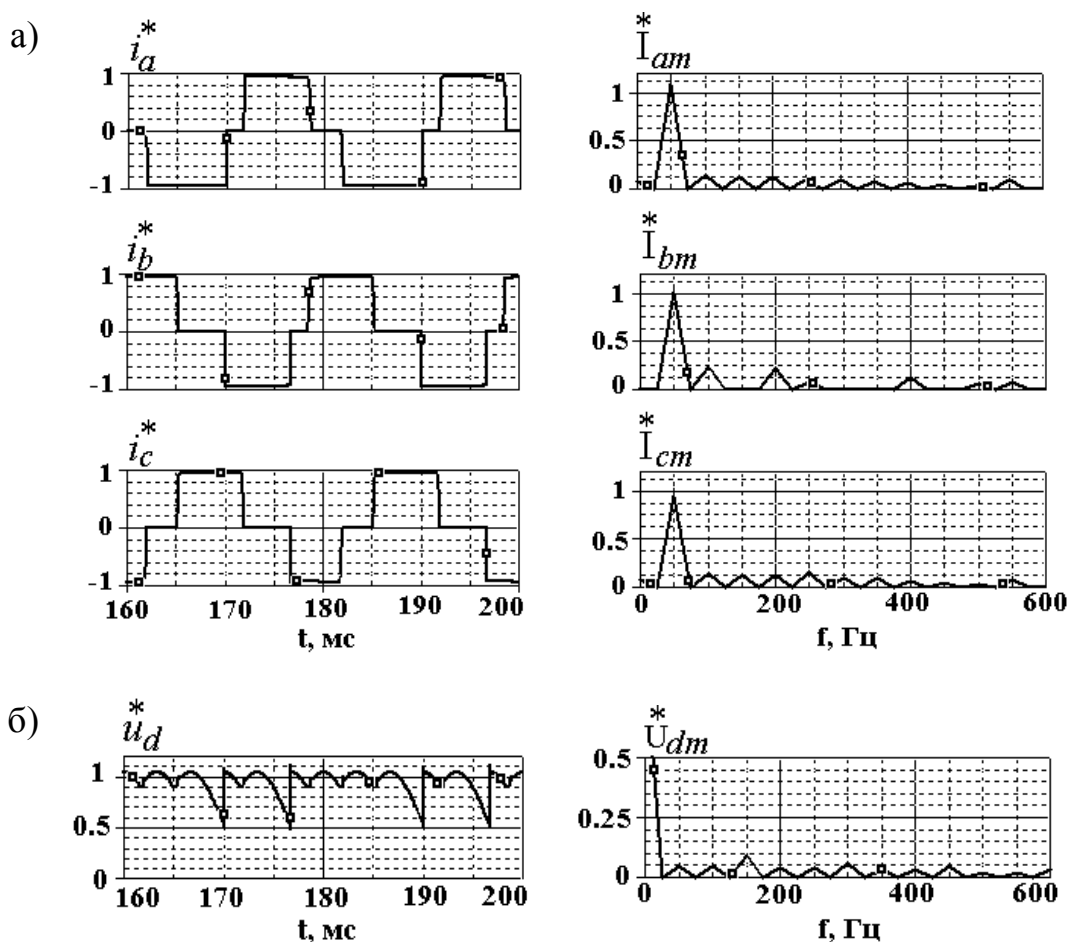


Рис.3.12. Трехфазный мостовой полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 30^\circ$ и $\alpha_1 = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

При $30^\circ < \alpha_1 \leq 60^\circ$, когда угол управления тиристором Т1 превышает заданные значения углов управления Т3, Т5 ($\alpha_3 = \alpha_5 = 30^\circ$), наблюдается обратная картина: амплитуда первой гармоники тока фазы “а” значительно ниже амплитуд первых гармоник фаз “b” и “с”. Это объясняется тем, что при углах управления α_1 , меньших нормальных значений углов $\alpha_n = \alpha_{3,5} = 30^\circ$, ток фазы “а” превышает токи остальных фаз за счет увеличения продолжительности протекания тока фазы “а” (рис.3.12 а). При $\alpha_1 > 30^\circ$ наблюдается обратная картина (рис.3.13 а). Поэтому при таком аномальном режиме может быть предложен следующий алгоритм диагностирования. По кривой выходного напряжения (рис.3.12 б, рис.3.13 б) определяют значение угла α_1 . При $\alpha_1 \leq \alpha_n$ (рис.3.12) это будет означать, что отклонение от нормального режима будет происходить в той ветви моста, к которой примыкает фаза с током, амплитуда первой гармоники которого (или действующего значения) наибольшая по сравнению с амплитудами первых гармоник (или действующих значений) токов остальных фаз.

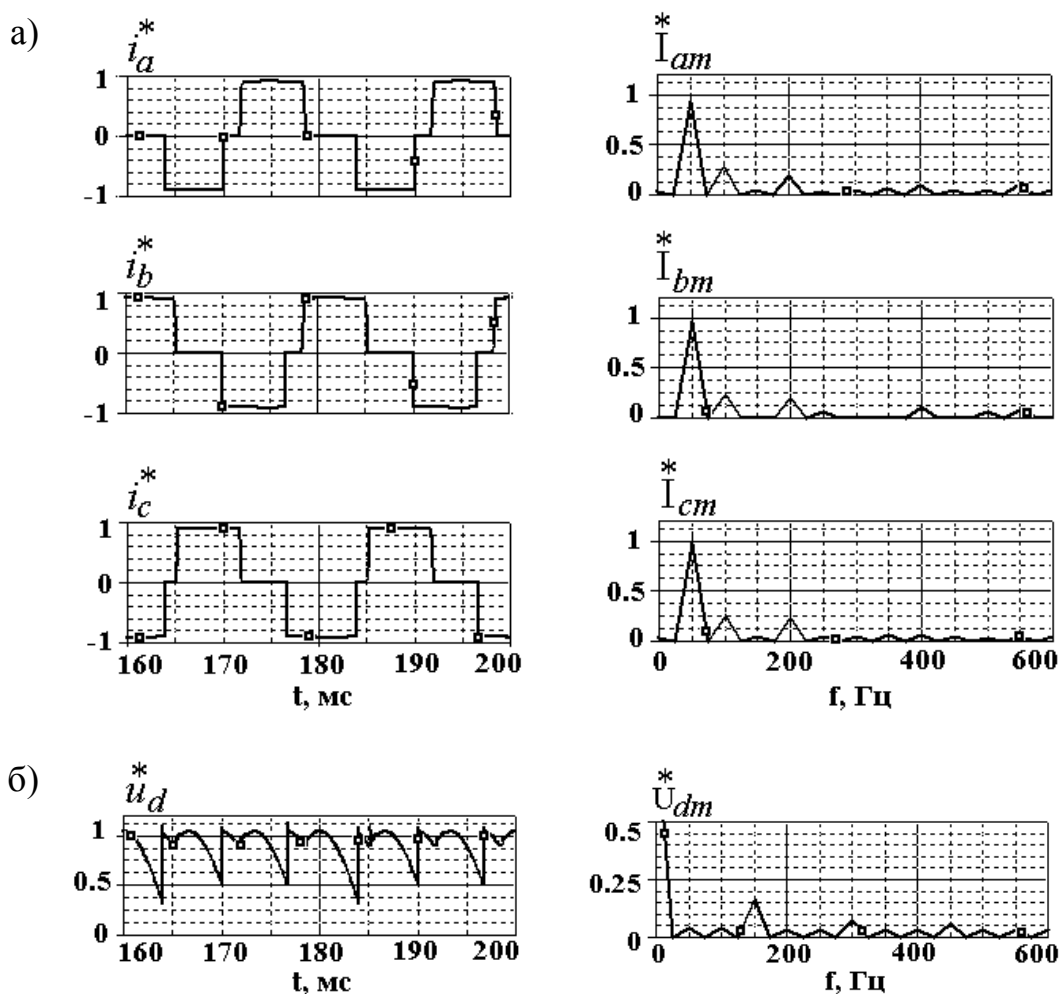


Рис.3.13. Трехфазный мостовой полууправляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 30^\circ$ и $\alpha_1 = 40^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

При $\alpha_1 > 30^\circ$, например, $\alpha_1 = 40^\circ$ (рис.3.13), можно говорить, что управление тиристором Т1 отлично от нормального, и по кривым выходного напряжения можно довольно точно определить, на сколько градусов отличается угол управления α_1 от заданных значений.

В рассматриваемом случае, как и в предыдущем ($\alpha_{3,5} = 0^\circ$; $\alpha_1 = \text{var}$), по сравнению амплитуд первых гармоник можно определить лишь неисправную ветвь моста. Для определения конкретного плеча следует использовать третий способ диагностики путем совместного анализа кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения.

3.2. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС

3.2.1. Аномальные режимы выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя

Расчетная схема выпрямителя для математического моделирования такого вида аномальных режимов приведена на рис.3.14. Параметры нагрузки и питающей сети выпрямителя при анализе его нормальных и аномальных режимов работы приведены в табл.3.1. Действующие значения напряжения фаз питающей сети приняты такими же, как и в ранее рассмотренных схемах выпрямителей.

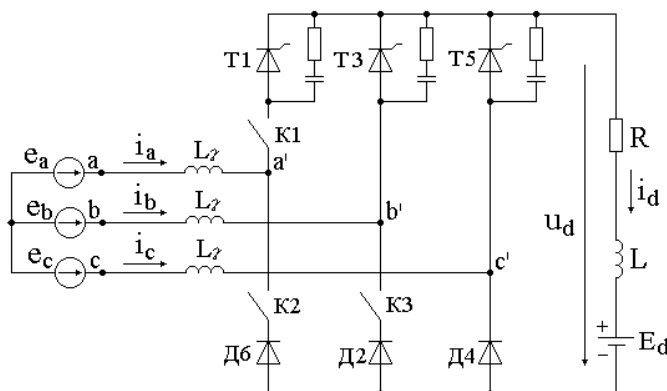


Рис.3.14. Расчетная схема трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС

При указанных в табл.3.1 параметрах ток нагрузки составлял $I_d = 100$ А, т.е. соответствовал принятому выше базовому значению $I_{баз}$, которое равно номинальному току двигателя.

Таблица 3.1

E_d , В	L , мГн	R , Ом	L_γ , мГн
449	5,3	0,23	0,06

Представленная расчетная схема преобразователя при замкнутых ключах K2, K3 и разомкнутом K1 соответствует отказу в работе одного плеча моста катодной группы вентилей. При замкнутых K1, K3 и разомкнутом K2 – выходу из строя плеча анодной группы диодов. При замкнутом K2 и разомкнутых K1, K3 расчетная схема соответствует одновременному отказу в работе плеч катодной и анодной групп вентилей.

Прежде чем перейти к исследованию аномальных режимов, проведем расчет преобразователя в нормальном режиме, когда ключи K1, K2, K3

замкнуты. Затем полученные данные сравним с данными аномальных режимов работы с целью выявления диагностических признаков.

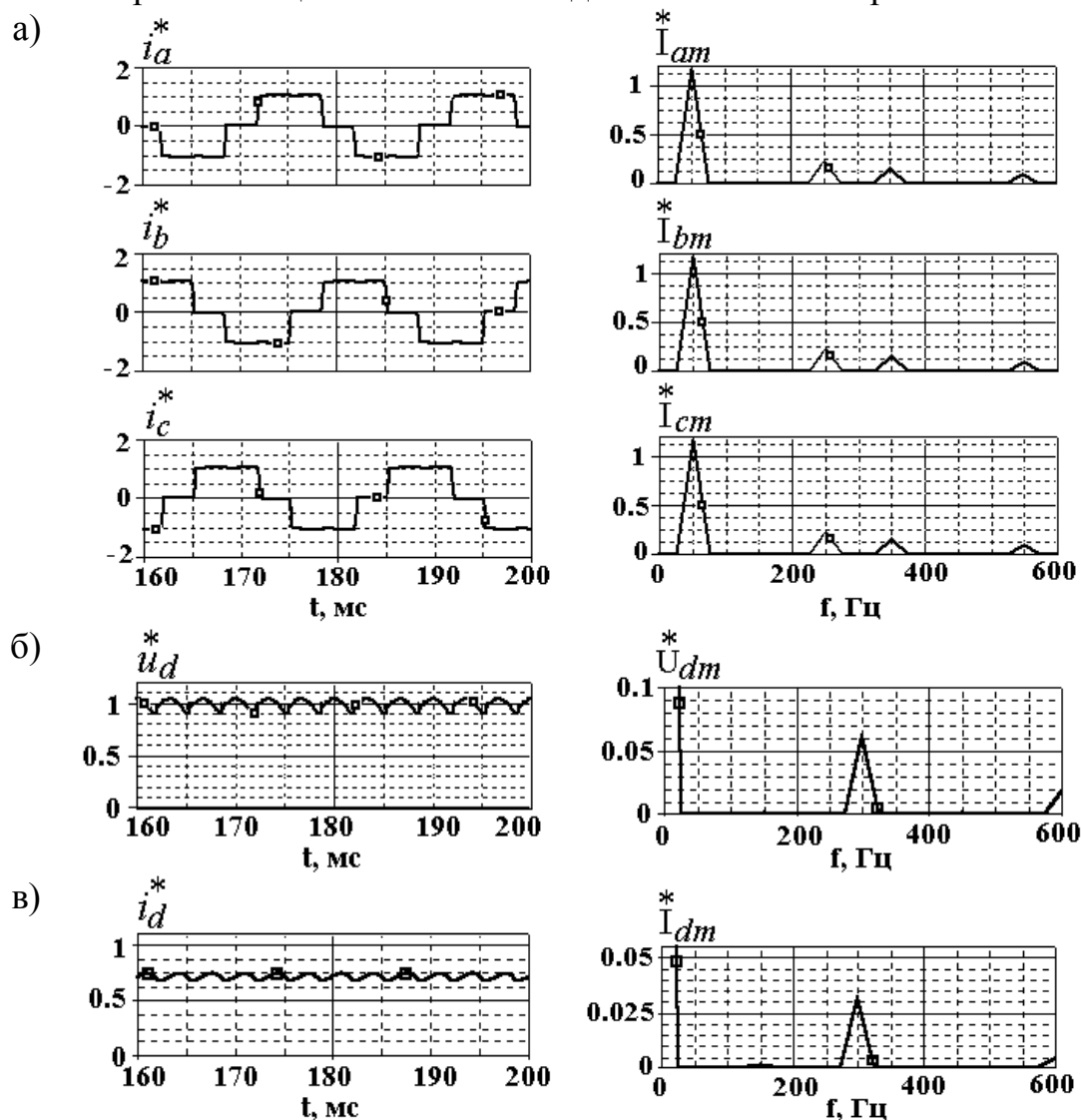


Рис.3.15. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Нормальный режим работы при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$ и $\gamma = 10^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

На рис.3.15 приведены кривые фазных токов, тока нагрузки и выпрямленного напряжения и спектры их гармоник при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$ и $\gamma = 10^0$. При аномальных режимах форма кривых тока и напряжения и спектры их гармоник резко меняются.

На рис.3.16, 3.17 изображены кривые токов и напряжений и спектры их гармоник при аномальных режимах работы, связанных с отказом одного плеча моста катодной группы вентилей (рис.3.16) и одновременным выходом из строя вентилей катодной и анодной групп моста (рис.3.17).

Анализ кривых фазных токов и соответствующих им спектров амплитуд гармоник аномальных режимов, связанных с отказом в работе

одного плеча моста, показывает, что несмотря на значительные отличия форм токов по сравнению с аналогичными данными при активно-индуктивной нагрузке (рис.3.16 а, 3.17), критерии для диагностики остаются теми же. При нарушении в работе плеча катодной группы моста (рис.3.16) импульс тока фазы, примыкающей к данной ветви моста, имеет положительное значение, а амплитуда его первой гармоники меньше аналогичных гармоник двух других фаз.

Рассмотрение случая одновременного отказа в работе двух плеч моста (рис.3.17) показало, что определить конкретное плечо с нарушением в работе можно лишь по форме фазных токов сети. Тенденция снижения амплитуды первой гармоники соответствующего тока фазы не соблюдается. Так,

например, амплитуда тока $I_{am(1)}$ оказывается выше амплитуды $I_{cm(1)}$ тока фазы “с”, примыкающей к исправной ветви моста.

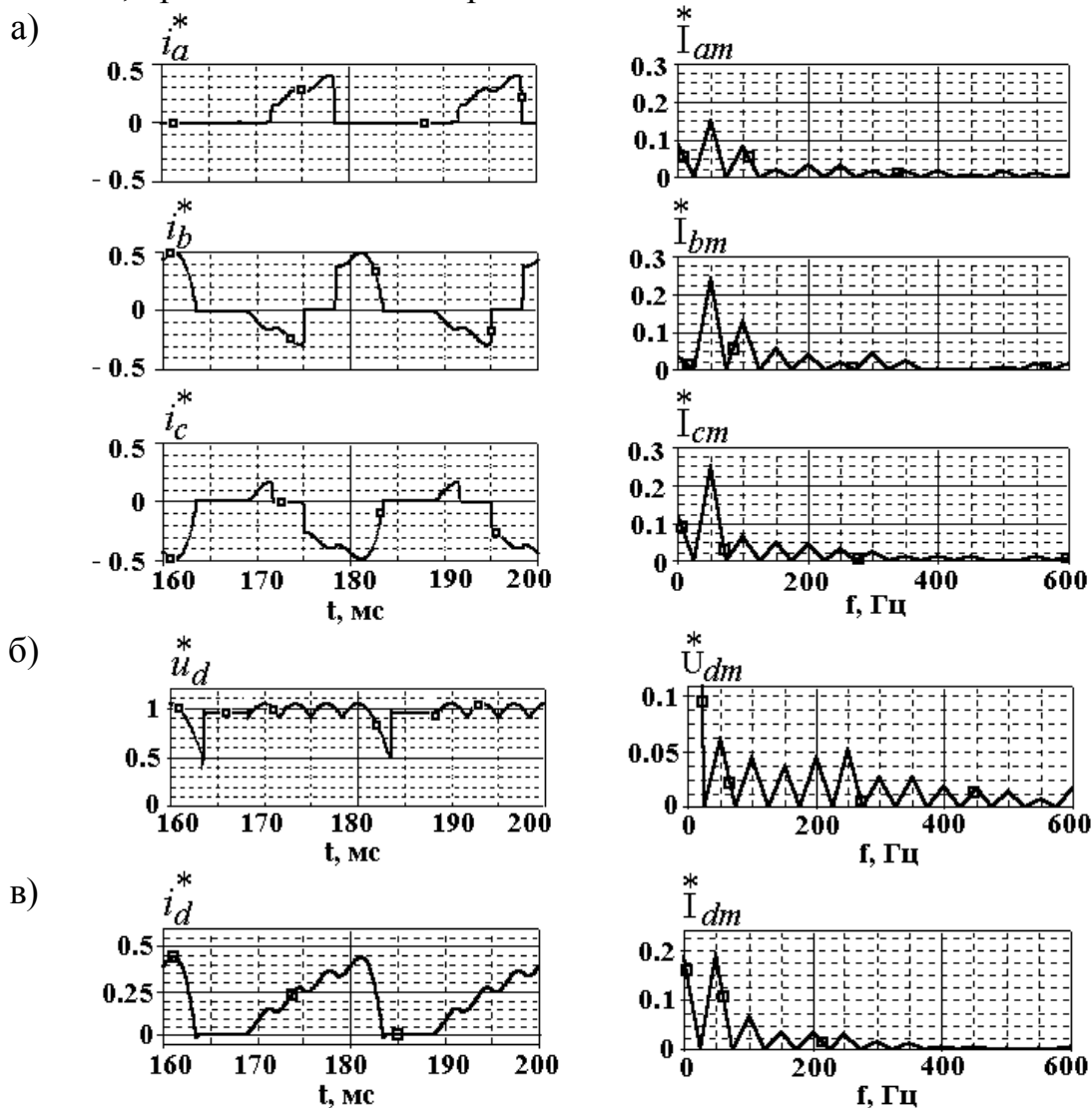


Рис.3.16. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на против-ЭДС. Отказ в работе плеча моста с тиристором Т1 при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

При сравнении кривой выходного напряжения, представленной на рис.3.16 б, с аналогичной кривой, полученной в результате расчета такого же аномального режима полууправляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой (рис.3.4), нетрудно заметить отличие их форм. Проведем анализ электромагнитных процессов, аналогичный случаю с RL-нагрузкой (см. рис.3.7 а).

При анализе электромагнитных процессов выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС обратимся к его расчетной схеме (рис.3.14), кривым выходного напряжения с обозначением линейных напряжений и тока нагрузки, приведенными на рис.3.18 а,б. Кривые соответствуют режиму работы выпрямителя при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$ и отказе плеча моста катодной группы вентилей с тиристором Т1 (рис.3.16 б,в).

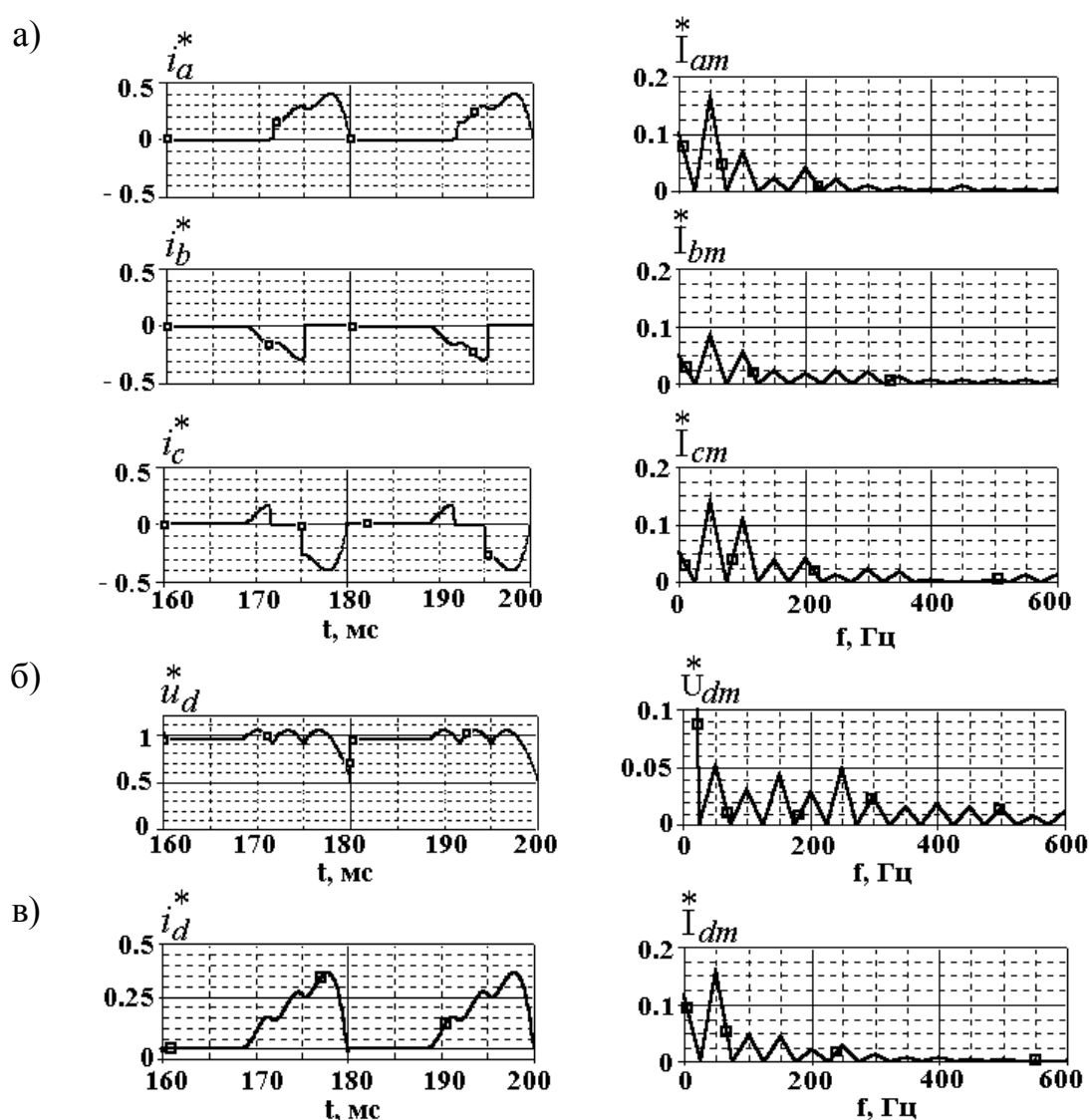


Рис.3.17. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе двух плеч моста с тиристором Т1 и диодом Д2 при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

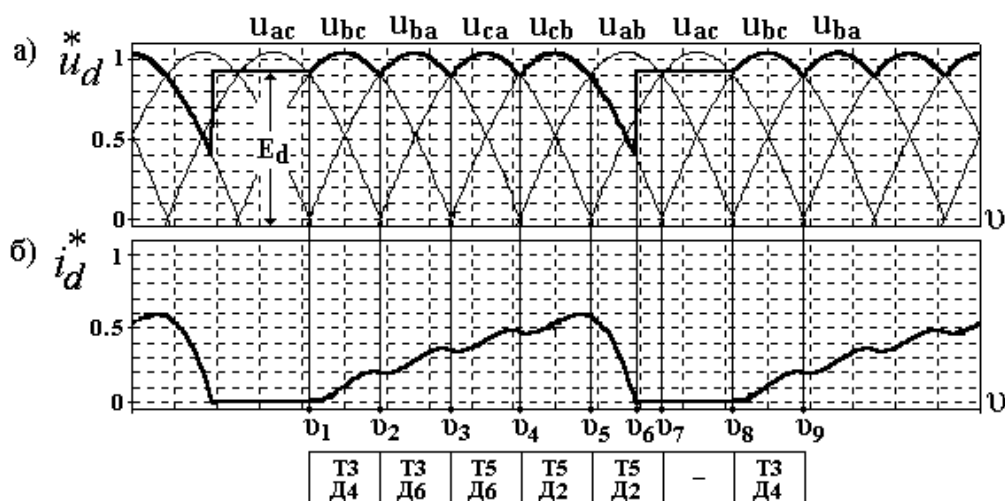


Рис.3.18. Кривые выходного напряжения (а) и тока нагрузки (б) полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$ и отказе в работе плеча катодной группы вентилей с тиристором Т1

Рассматриваемому виду аномального режима соответствует расчетная схема выпрямителя, представленная на рис.3.14, при разомкнутом ключе К1 и замкнутых ключах К2, К3.

До момента времени $v = v_1$ из-за разомкнутого ключа К1 ток нагрузки равен нулю, в результате чего напряжение нагрузки равно значению противо-ЭДС.

В промежутке времени $v_1 - v_5$ плечо с разомкнутым ключом К1 не участвует в работе выпрямителя, что обуславливает нормальную его работу.

При $v = v_5$ из-за разомкнутого ключа К1 (см. рис.3.14) линейное напряжение u_{ab} не принимает участие в формировании напряжения нагрузки. Это ведет к тому, что в промежутке времени $v_5 - v_6$ ток под воздействием напряжения u_{cb} и ЭДС самоиндукции продолжает протекать через вентили Т5, Д2.

При $v = v_6$ значение тока нагрузки становится равным нулю, в результате чего напряжение u_d на участке времени $v_6 - v_7$ вновь принимает значение E_d . Далее электромагнитные процессы повторяются.

Выше был рассмотрен случай отказа в работе одного и двух плеч моста при заданных значениях углов управления, равных нулю ($\alpha_{1,3,5} = 0^0$). Ниже рассматривается случай отказа в работе одного плеча моста при заданных значениях углов управления, отличных от нуля ($\alpha_{1,3,5} \neq 0^0$).

В начале проведем расчет кривых токов и напряжения полууправляемого выпрямителя при нормальном режиме и $\alpha_{1,3,5} \neq 0^0$. Далее сравним их спектральный состав со спектрами аналогичных кривых, полученных выше при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$. При расчете нормального режима работы угол управления был принят $\alpha_{1,3,5} = 30^0$, $E_d = 449$ В. При этих значениях ток нагрузки в нормальном режиме составлял $I_d = 100$ А.

На рис.3.19 представлены расчетные кривые токов и выходного напряжения выпрямителя в нормальном режиме работы при $\alpha_{1,3,5} = 30^\circ$. Сравнительный анализ спектров полученных кривых (рис.3.19) со спектрами аналогичных кривых, рассчитанных для $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$ (рис.3.15), показал следующее.

Наличие угла управления $\alpha_{1,3,5} \neq 0^\circ$ приводит к изменению гармонического состава расчетных кривых. Кроме 6-й и 12-й гармоник, существующие в спектрах кривых выпрямленного тока и выходного напряжения выпрямителя при нормальном режиме работы и $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$, в случае $\alpha_{1,3,5} \neq 0^\circ$ появляются 3-я и 9-я гармоники. Кроме того, изменение гармонического состава наблюдается в кривых фазных токов. В их спектрах появляются 2-я, 4-я и 8-я гармоники (см. рис. 3.19), которые отсутствуют при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$ (рис.3.15 а).

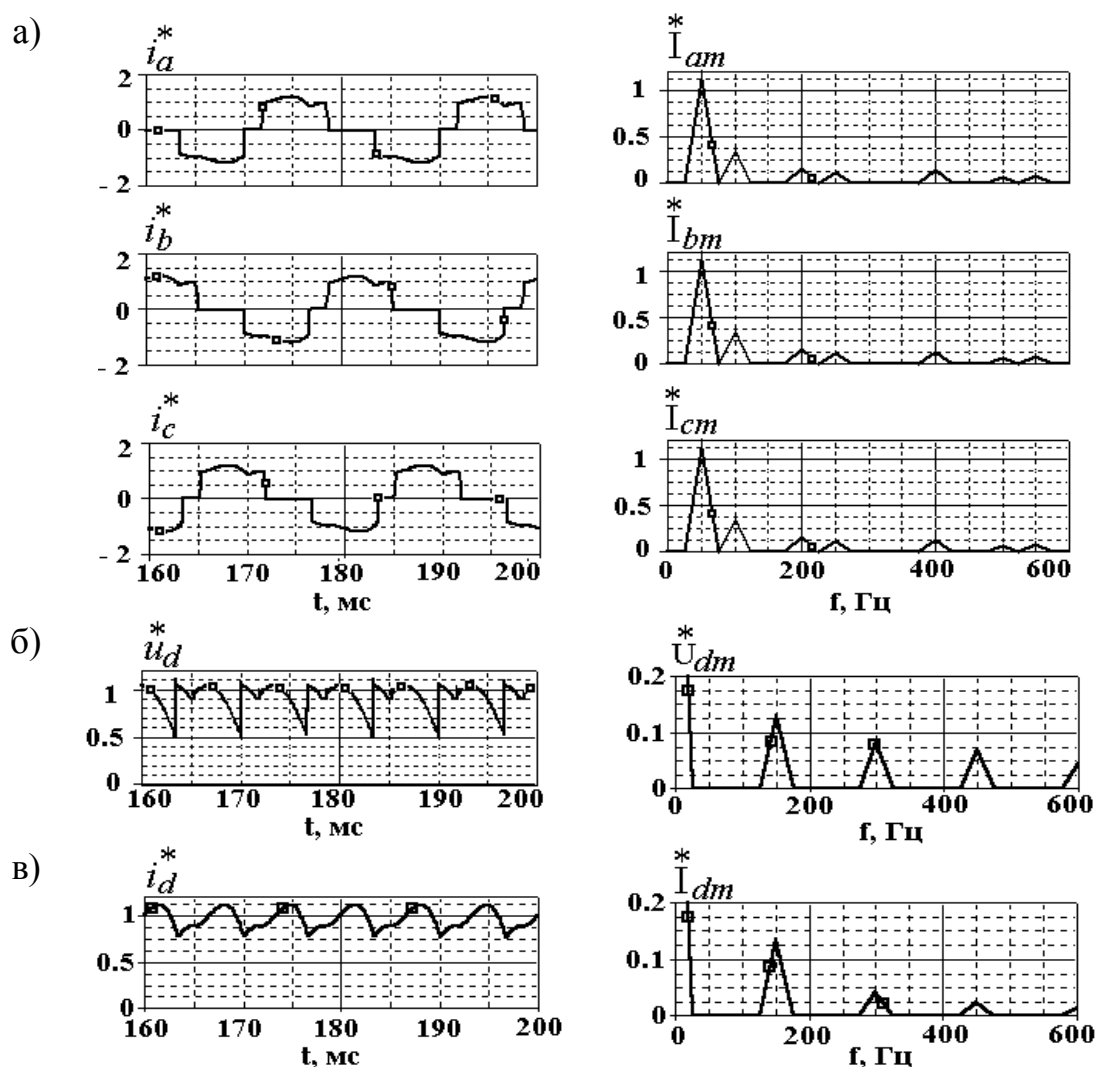


Рис.3.19. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Нормальный режим $\alpha_{1,3,5} = 30^\circ$, $\gamma = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

Рассмотрим влияние угла управления, отличного от нуля $\alpha_{1,3,5} \neq 0^0$, на соотношение амплитуд первых гармоник фазных токов сети при отказе в работе одного плеча моста выпрямителя.

На рис.3.20 приведены временные диаграммы токов и напряжения для аномального режима работы, соответствующего отказу в работе плеча катодной группы моста.

Выход из строя тиристора Т1 подтверждается положительным импульсом тока фазы “а” (рис.3.20 а) и наименьшей амплитудой первой гармоники по сравнению с токами остальных фаз.

Отметим также, что, как и в случае $\alpha_{1,3,5} = 0^0$, при $\alpha_{1,3,5} = 30^0$ гармонический состав одноименных кривых в нормальном режиме работы и аномальном отличается (см. рис.3.19, 3.20).

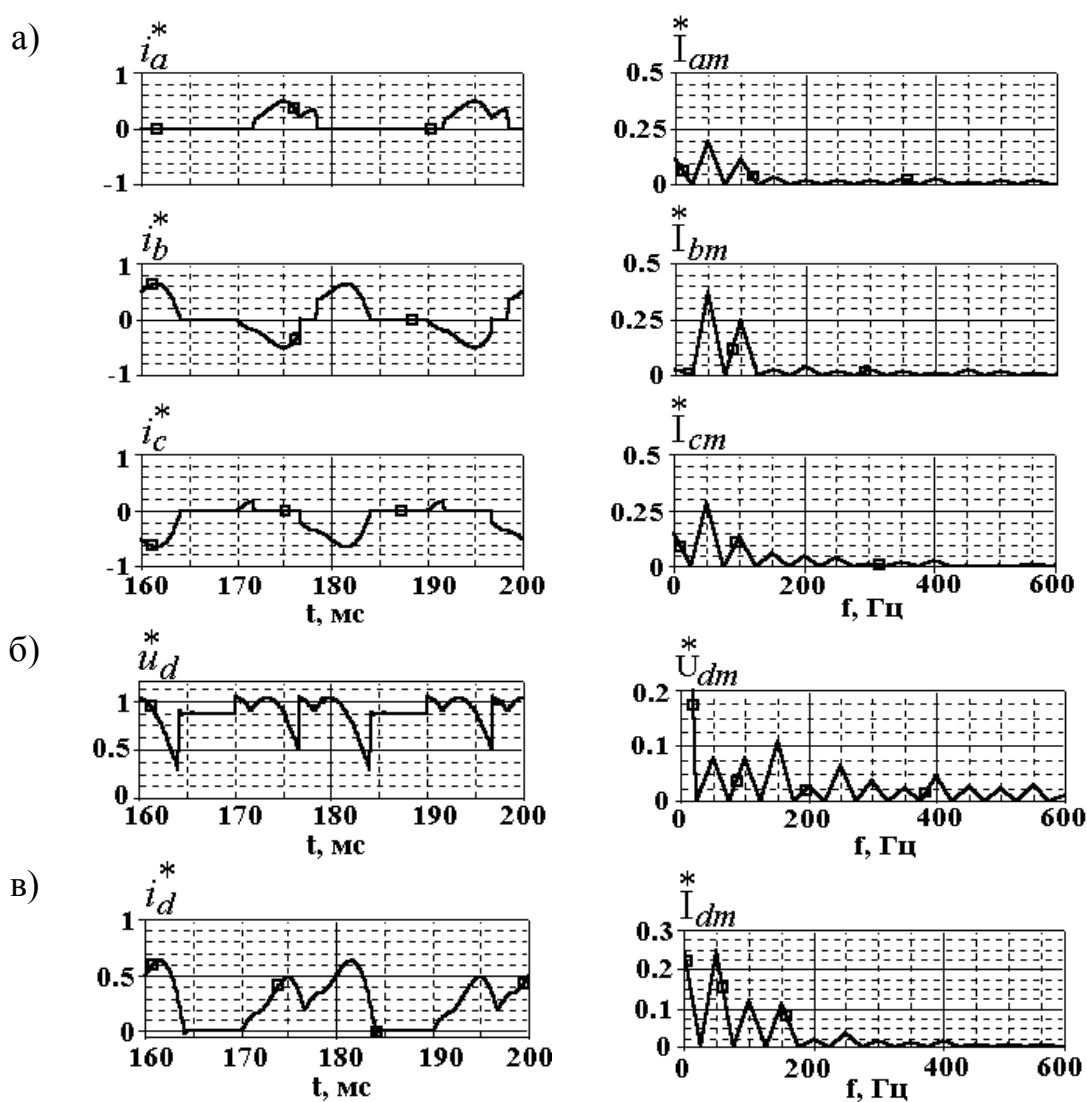


Рис.3.20. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе одного плеча моста катодной группы вентилей с тиристором Т1 при $\alpha_{1,3,5} = 30^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

Кроме того, данный вид аномального режима приводит к работе полууправляемого выпрямителя с прерывистым током, при этом амплитуда первой его гармоники составляет 26 % относительно базового значения. Постоянная составляющая уменьшается в 3,5 раза по сравнению с нормальным режимом работы выпрямителя.

Это отражается на спектре высших гармоник в кривой выходного напряжения. При аномальном режиме работы амплитуды первых пяти гармоник, значения которых в нормальном режиме работы равны нулю, достигают 3...9 % относительно базового значения. Это позволяет фиксировать изменения спектрального состава кривой напряжения и выявлять данный вид аномального режима выпрямителя, не прибегая к использованию спектра гармоник фазных токов. Однако конкретно место аварии таким способом определить нельзя.

Таким образом, исследование аномальных режимов при значениях $\alpha_{1,3,5} \neq 0^0$ показало, что для их диагностики могут быть использованы все диагностические признаки, которые выявлены выше при $\alpha_{1,3,5} = 0^0$.

3.2.2. Аномальные режимы выпрямителя при асимметрии импульсов управления

Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления $\alpha_{3,5} = 0^0$ и аномальном импульсе одного плеча

Проведем исследования, аналогичные рассмотренным, для случая активно-индуктивной нагрузки.

В качестве примера, на рис.3.21 приведены кривые фазных токов сети, тока нагрузки и выходного напряжения преобразователя при заданных значениях углов управления тиристорами Т3, Т5 $\alpha_{3,5} = 0^0$ и аномальном угле управления тиристором Т1 $\alpha_1 = 10^0$.

На рис.3.22 приведены зависимости амплитуды 1-й гармоники кривых фазных токов от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 0^0$.

Сравнивая зависимости, представленные на рис.3.22, с аналогичными зависимостями для случая активно-индуктивной нагрузки (рис.3.8), нетрудно заметить их сходство. Амплитуда 1-й гармоники тока фазы, примыкающей к ветви моста с отклонением от нормальной работы, так же меньше, чем в двух других фазах. При этом в случае работы выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС уменьшение амплитуды первой гармоники тока во всех фазах питающей сети более значительно, чем при работе выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.

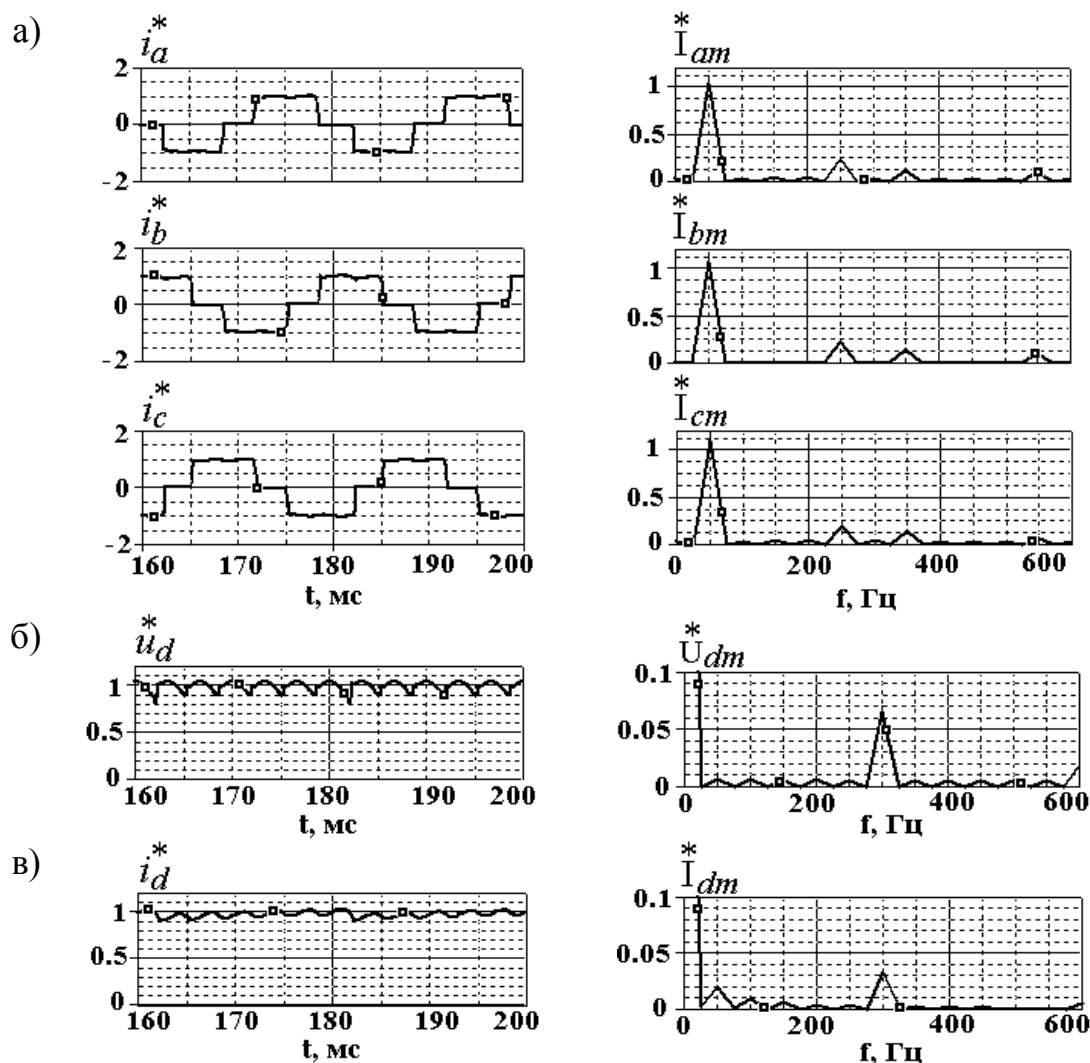


Рис.3.21. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 0^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

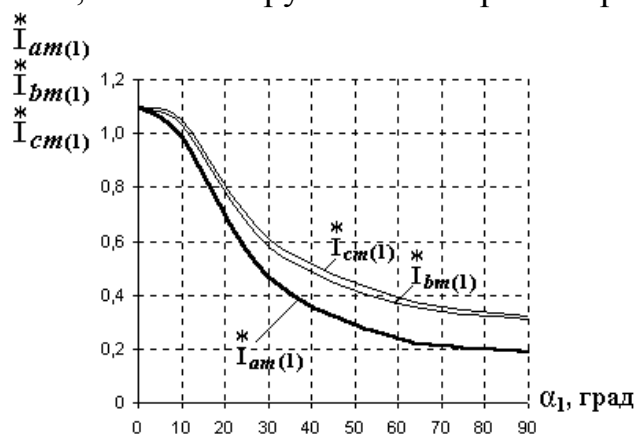


Рис.3.22. Зависимости амплитуды первой гармоники фазных токов от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 0^\circ - \text{const}$

Отмеченное отличие не изменяет характеристические признаки, выявленные при исследовании аналогичных аномальных режимов работы полууправляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой. Поэтому

для диагностирования таких аномальных режимов преобразователя при нагрузке на противо-ЭДС справедливы те же характеристические признаки, что и при активно-индуктивной нагрузке.

К ним, в первую очередь, следует отнести уменьшение амплитуды первой гармоники тока фазы с отклонением от заданного режима работы по сравнению с токами других фаз, примыкающих к ветвям моста с нормальным управлением. Кроме этого, как и в случае с активно-индуктивной нагрузкой, даже незначительное отклонение угла импульса включения тиристора Т1 ($\alpha_1 = 10^\circ$) от заданных значений ($\alpha_{3,5} = 0^\circ$) приводит к появлению ряда новых гармоник (1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 7-й), отсутствующих при нормальном режиме работы (см. рис.3.21).

Анализ зависимостей $U_{dmv}^* = f(\alpha_1)$ и $I_{dmv}^* = f(\alpha_1)$, приведенных на рис.3.23, показывает следующее.

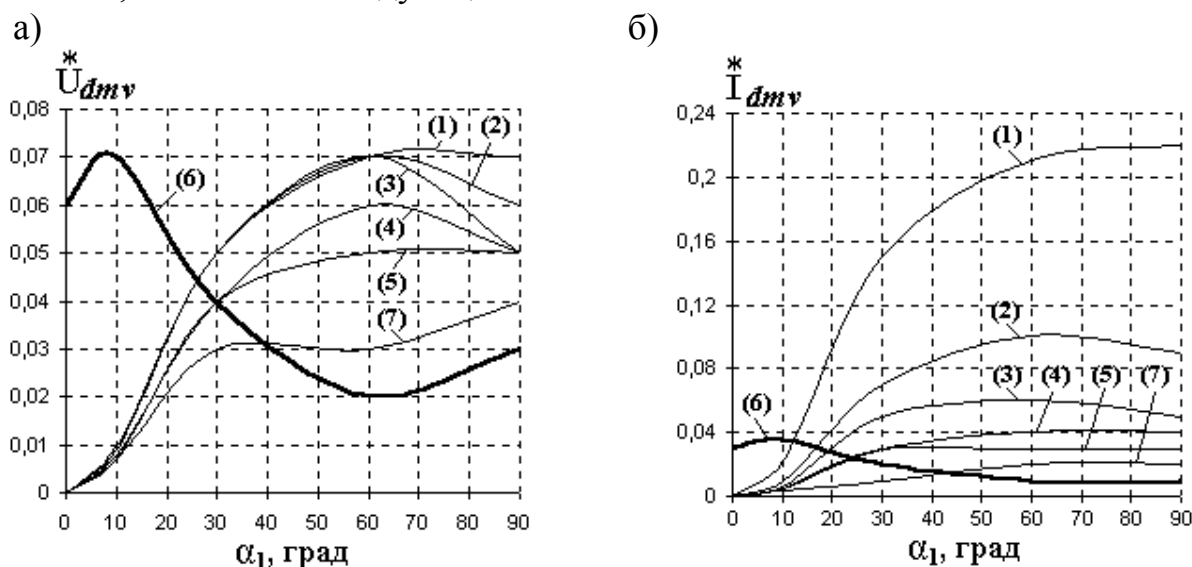


Рис.3.23. Зависимости амплитуд гармоник спектра расчетных кривых полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 0^\circ$: а – выходное напряжение; б – ток нагрузки

Амплитуды гармоник кривых выходного напряжения и тока нагрузки выпрямителя при $\alpha_{3,5} = 0^\circ$ возрастают по мере увеличения рассогласования между α_1 и $\alpha_{3,5}$ в пределах $\alpha_1 \leq 60^\circ$. Значения амплитуд гармоник выпрямленного напряжения находятся в пределах 3...7 %, а в токе нагрузки 4...23 % относительно базовых значений. В диапазоне $60^\circ < \alpha_1 \leq 90^\circ$ амплитуды 2-й, 3-й и 4-й гармоник выходного напряжения уменьшаются в пределах 1 %, амплитуды 1-й и 5-й гармоник практически не изменяются, а амплитуда 7-й возрастает на 1 %. В кривой выпрямленного тока амплитуды 2-й и 3-й гармоник также уменьшаются на 1 %, 1-й гармоник – возрастает на 2 %, при этом амплитуды остальных гармоник остаются практически неизменными, и их значения составляют 2...4 %. Амплитуда 6-й гармоники, которая характерна для нормального режима работы, при незначительном

отличии угла α_1 от заданных углов $\alpha_{3,5}$ в напряжении и в токе увеличивается на 1 %. При дальнейшем увеличении значения α_1 она уменьшается практически в 2,5 раза и составляет относительно базовых значений напряжения 2 % и в токе 1,5 %.

Приведенные зависимости могут быть использованы при диагностике аномальных режимов.

Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления $\alpha_{3,5} = 30^\circ$ и аномальном импульсе одного плеча

На рис.3.24, 3.25 приведены расчетные кривые токов и выходного напряжения для случаев, когда $\alpha_1 < \alpha_{3,5}$ и $\alpha_1 > \alpha_{3,5}$ при $\alpha_{3,5} = 30^\circ$.

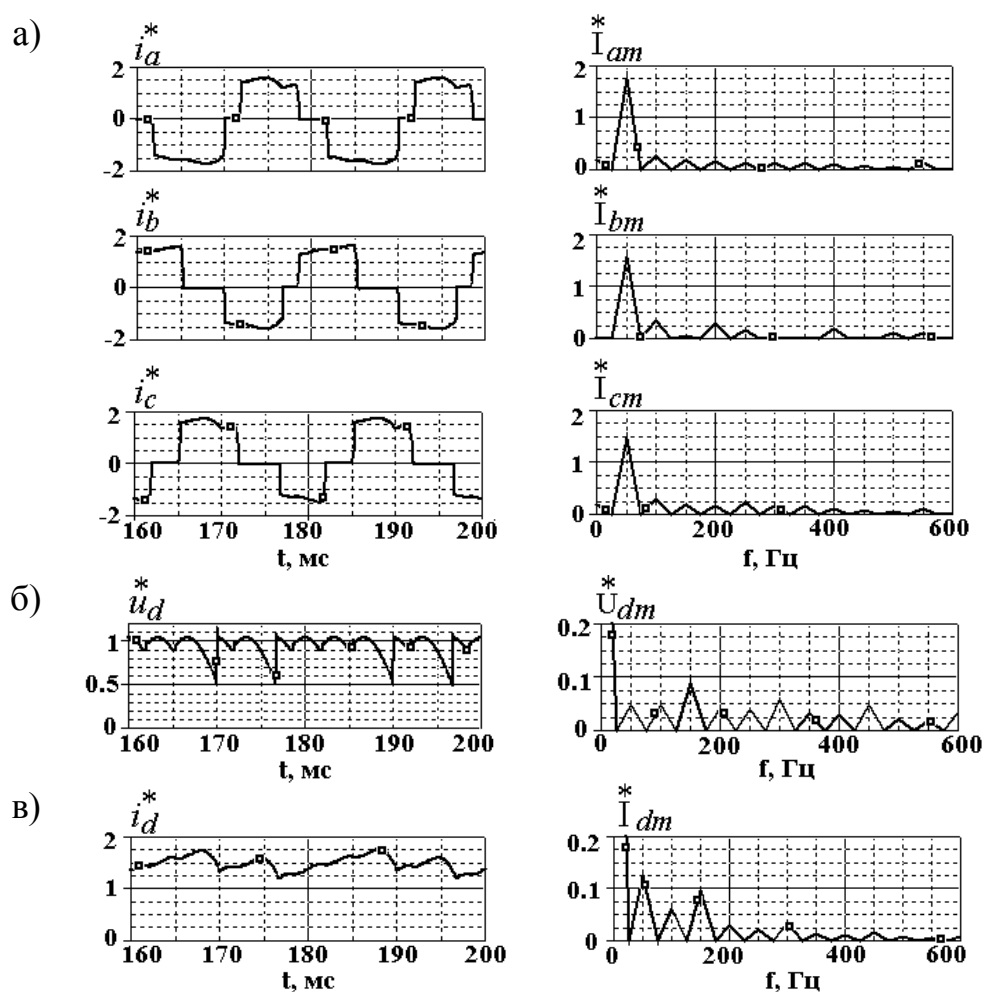


Рис.3.24. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

Анализ данных кривых показывает, что характер соотношения амплитуд первых гармоник токов сети при нагрузке на противо-ЭДС такой же, как и при активно-индуктивной нагрузке. А именно: при $\alpha_1 < \alpha_{3,5}$ амплитуда первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви с

отклонением от нормальной работы (плечо моста с T1), больше чем амплитуда такой же гармоники в двух других фазах (см. рис.3.24). В случае $\alpha_1 > \alpha_{3,5}$ наблюдается обратная картина.

На рис.3.26,3.27 представлены зависимости, аналогичные зависимостям, приведенным на рис.3.22,3.23.

Зависимости (рис.3.26), подтверждают полученные ранее соотношения амплитуд первых гармоник фазных токов сети между собой.

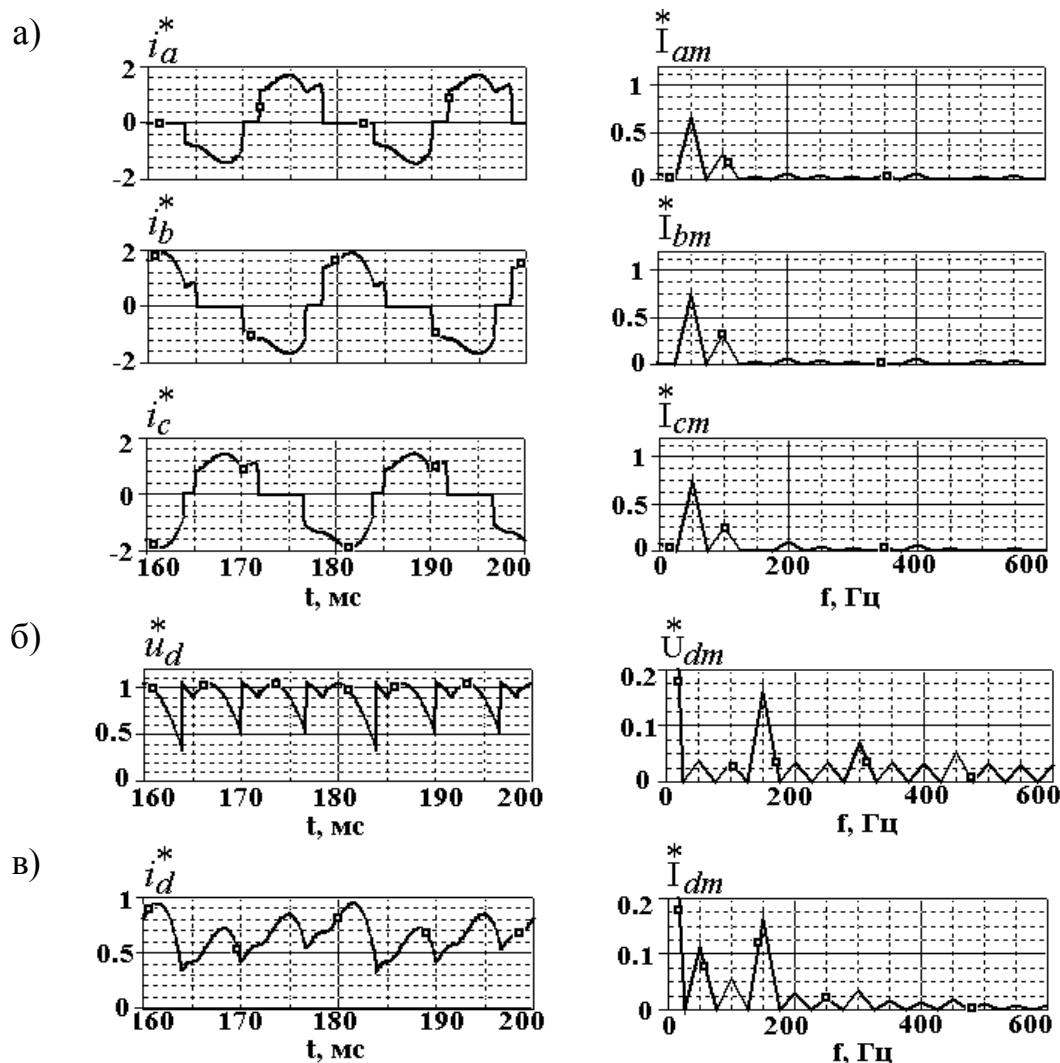


Рис.3.25. Полууправляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{3,5} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 40^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник; в – ток нагрузки и спектр его гармоник

Анализ зависимостей, представленных на рис.3.27 а,б, показывает, что при $\alpha_{1,3,5} = 30^\circ$ в кривых выходного напряжения выпрямителя и тока нагрузки отсутствуют 1-я, 2-я, 4-я, 5-я и 7-я гармоники, что характерно для нормального режима выпрямителя. Появление указанных гармоник при $\alpha_1 \neq \alpha_{3,5}$ свидетельствует о возникновении аномального режима. В

рассматриваемом случае (рис.3.27) уровень амплитуд этих гармоник, как при $\alpha_{3,5} = 0^\circ$ (см. рис.3.23), так же возрастает с увеличением рассогласования между углами α_1 и $\alpha_{3,5}$, независимо от того, больше или меньше значение углов $\alpha_{3,5}$, угол α_1 .

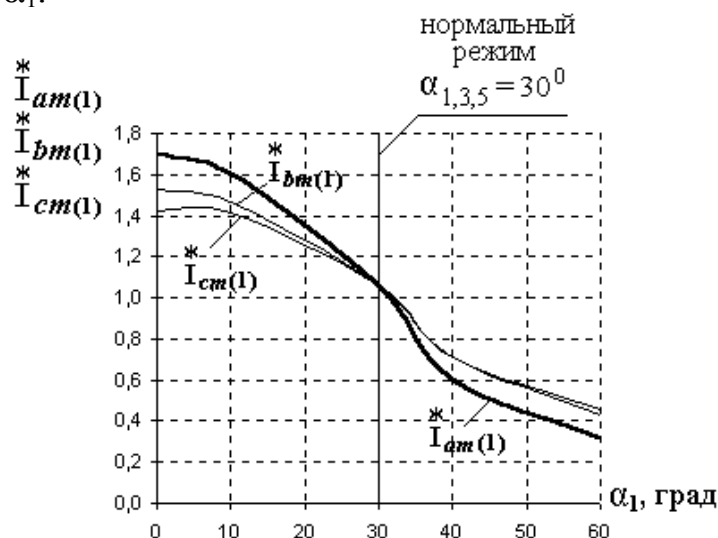
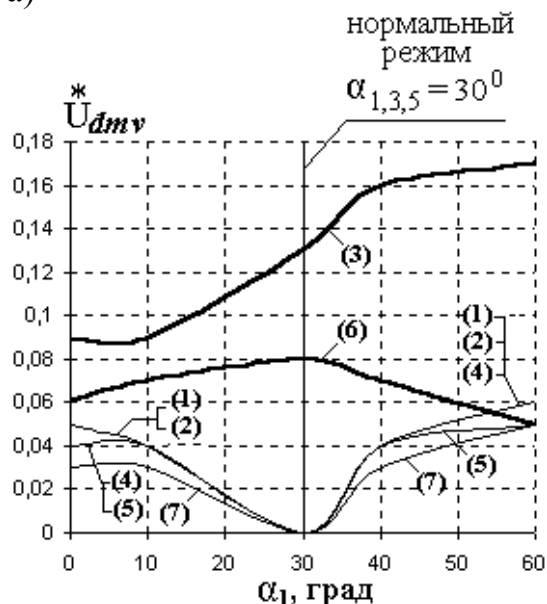


Рис.3.26. Зависимости амплитуды первой гармоники фазных токов трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 30^\circ$

а)



б)

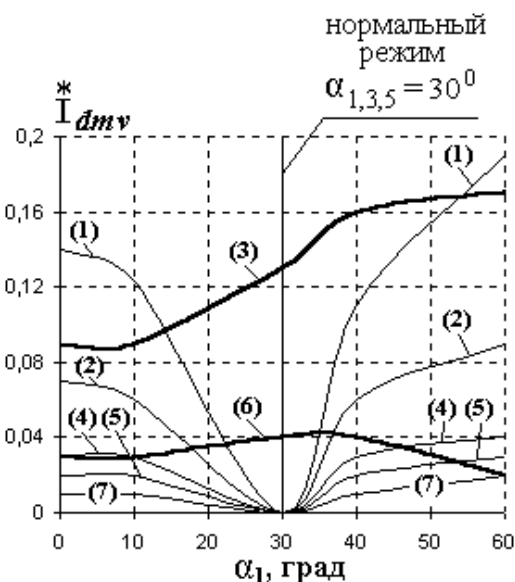


Рис.3.27. Зависимости амплитуд гармоник в спектре расчетных кривых трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{3,5} = 30^\circ$: а – выходное напряжение; б – ток нагрузки

Приведенные на рис.3.27 зависимости могут быть использованы при диагностике аномальных режимов трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС.

Таким образом, диагностические признаки аномальных режимов трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС, вызванные аномальным импульсом управления одного плеча моста, при заданных значениях углов управления, равных нулю или отличных от нуля, такие же, как и в случае активно-индуктивной нагрузки.

ГЛАВА 4. АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ДИАГНОСТИКА ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

4.1. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового управляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой

Вначале проведем исследование нормального режима работы при углах управления $\alpha = 0^0$ и $\alpha \neq 0^0$ с целью определения влияния угла управления на гармонический состав кривых токов и напряжения.

Эквивалентная расчетная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя при нормальном режиме его работы приведена на рис.4.1.

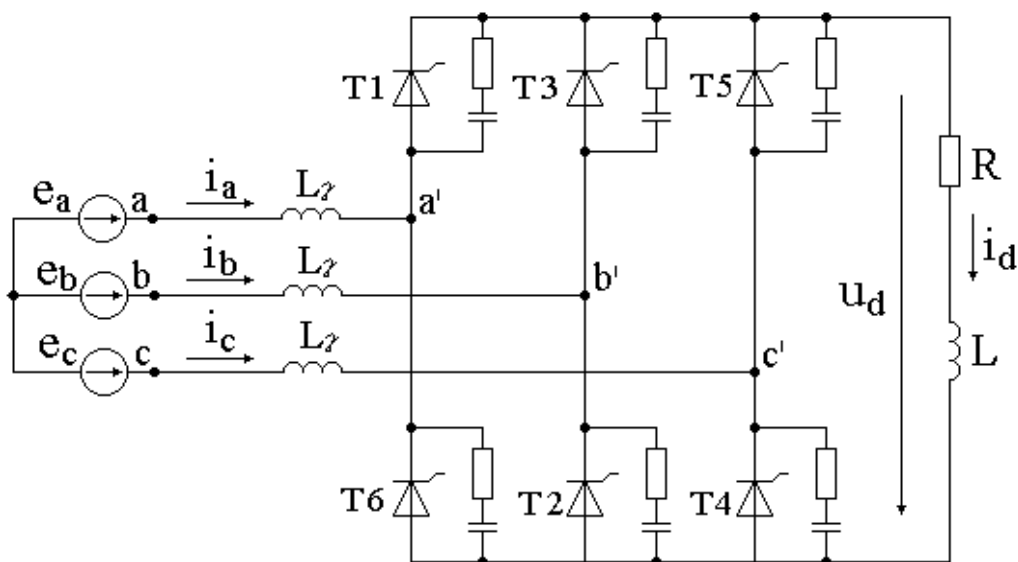


Рис.4.1. Расчетная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой

В качестве примера на рис.4.2, 4.3 приведены расчетные кривые токов и напряжения при нормальной работе управляемого выпрямителя с углом управления $\alpha_{1...6} = 0^0$ и $\alpha_{1...6} \neq 0^0$, где α_1 – угол управления тиристором $T1$; α_2 – угол управления тиристором $T2$; α_3 – угол управления тиристором $T3$ и

т.д. (см. рис.4.1). На рис.4.2, 4.3 приведены расчетные кривые фазных токов и выпрямленного напряжения и спектры их гармоник.

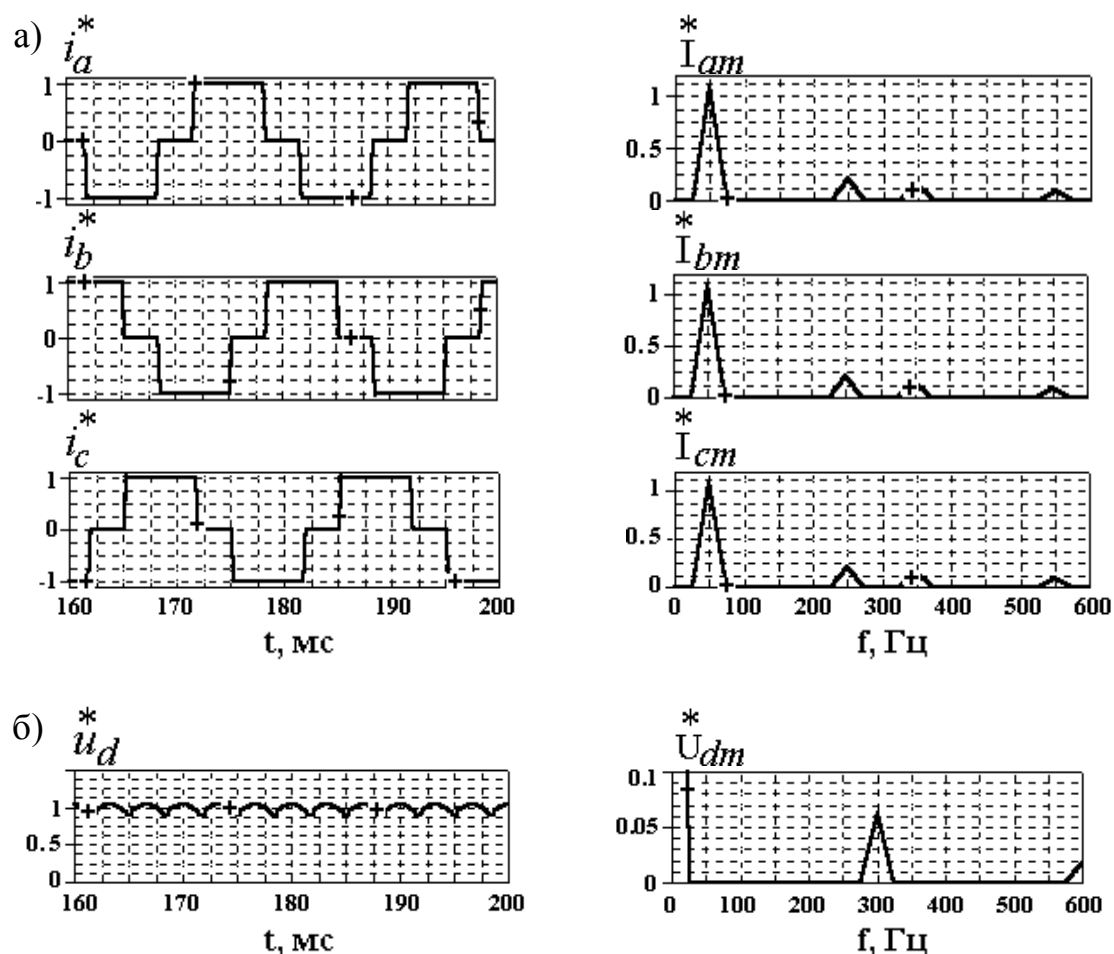


Рис.4.2. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Нормальный режим работы при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$, $\gamma = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Их анализ показывает, что гармонический состав одноименных расчетных кривых (рис.4.2, 4.3) одинаков. Отличия существуют только по амплитуде гармоник. Так, например, при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$ амплитуда шестой гармоники выходного напряжения составляет 6,3 %. При $\alpha_{1...6} = 30^\circ$ она равна 18,8 % относительно базового значения $U_{баз}$. При $\alpha_{1...6} = 0^\circ$ амплитуда 1-й гармоники фазных токов сети - 110 %. При $\alpha_{1...6} = 30^\circ$ она составляет 94,2 % относительно значения $I_{баз}$. Спектры гармоник рассматриваемых расчетных кривых практически полностью совпадают со спектрами аналогичных кривых неуправляемого выпрямителя (рис.2.2) и полууправляемого выпрямителя (рис. 3.9) при $\alpha_{1,3,5} = 0^\circ$.

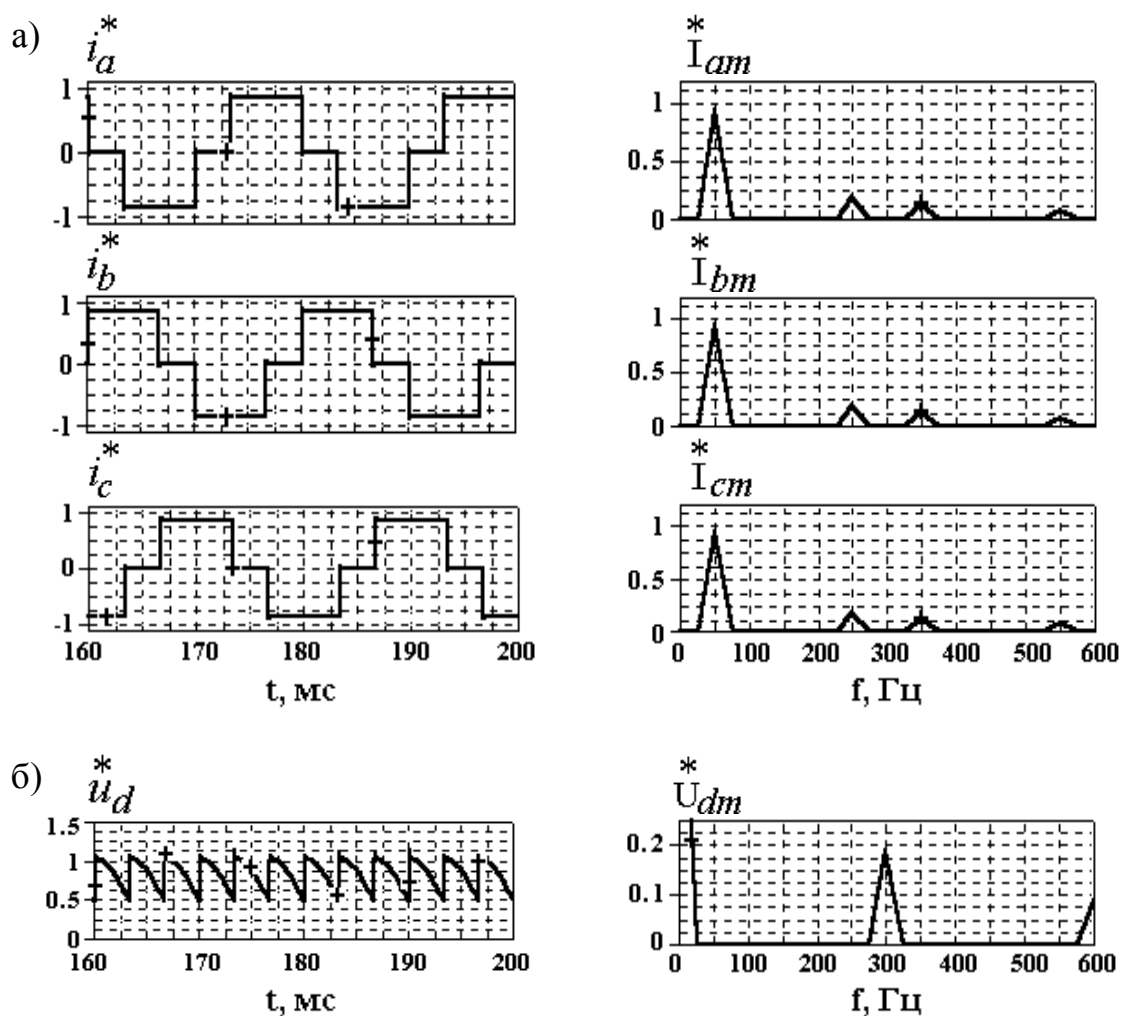


Рис.4.3. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Нормальный режим работы при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

4.1.1. Аномальные режимы выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя

Расчетная схема выпрямителя для математического моделирования такого вида аномальных режимов управляемого выпрямителя приведена на рис.4.4.

Представленная расчетная схема преобразователя при замкнутых ключах К2, К3 и разомкнутом ключе К1 соответствует отказу в работе одного плеча моста катодной группы вентилей. При замкнутых ключах К1, К3 и разомкнутом К2 – выходу из строя плеча анодной группы тиристоров. При замкнутом К2 и разомкнутых К1, К3 расчетная схема соответствует одновременному отказу в работе плеч катодной и анодной групп вентилей.

Для всех трех перечисленных аномальных режимов работы преобразователя на рис.4.5, 4.6, 4.7, соответственно, приведены расчетные кривые и спектры их гармоник при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$ и параметрах RL - нагрузки,

идентичных параметрам рассмотренных ранее схем выпрямления (рис.2.1, 3.1).

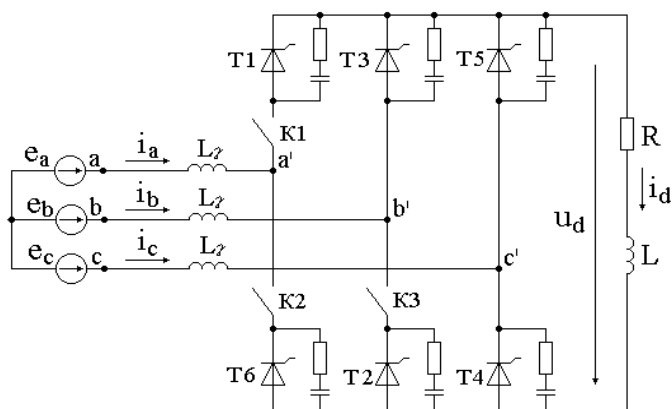


Рис.4.4. Расчетная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя для аномальных режимов работы с RL-нагрузкой

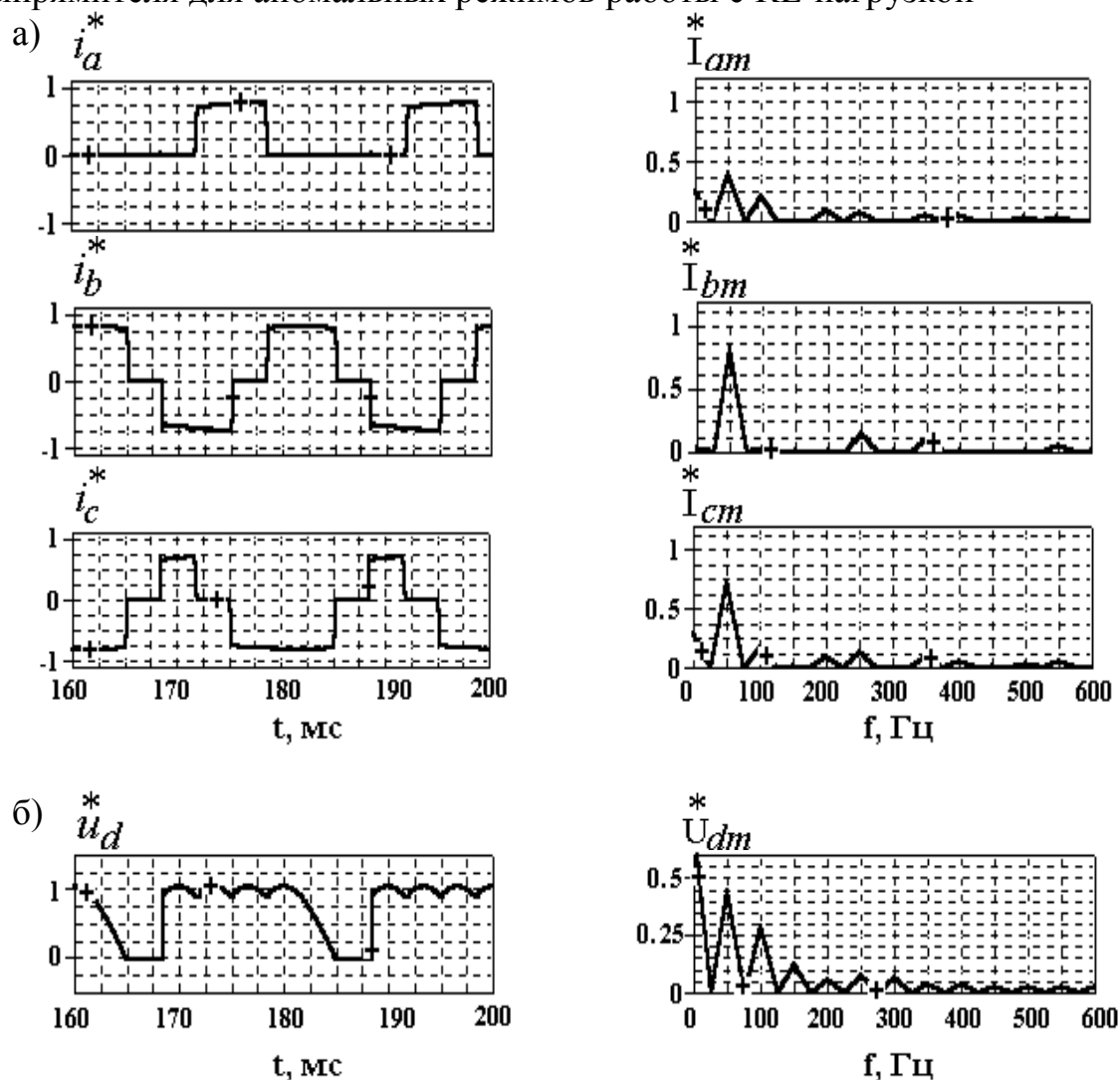


Рис.4.5. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Отказ в работе плеча выпрямителя с T1 при $\alpha_{1...6} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Сравнение результатов расчета аномальных режимов работы управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой, вызванных отказом в работе плеча моста, в одном случае – катодной группы с тиристором Т1 (рис.4.5) и в другом – анодной группы с Т6 (рис.4.6), показывает полное совпадение гармонического состава кривых фазных токов. Амплитуда первой гармоники тока фазы “а”, примыкающей к ветви моста с аварийным плечом, имеет наименьшее значение по сравнению с амплитудой такой же гармоники токов двух других фаз. Таким образом, диагностический признак наименьшей амплитуды 1-й гармоники тока фазы, примыкающей к ветви моста с нарушением в работе, по сравнению с амплитудой 1-й гармоники токов других фаз, выявленный при исследовании неуправляемого и полупроводяемого выпрямителей с RL-нагрузкой (см. рис.2.5 а, 2.7, 3.3 а, 3.5 а), сохраняется для управляемого выпрямителя.

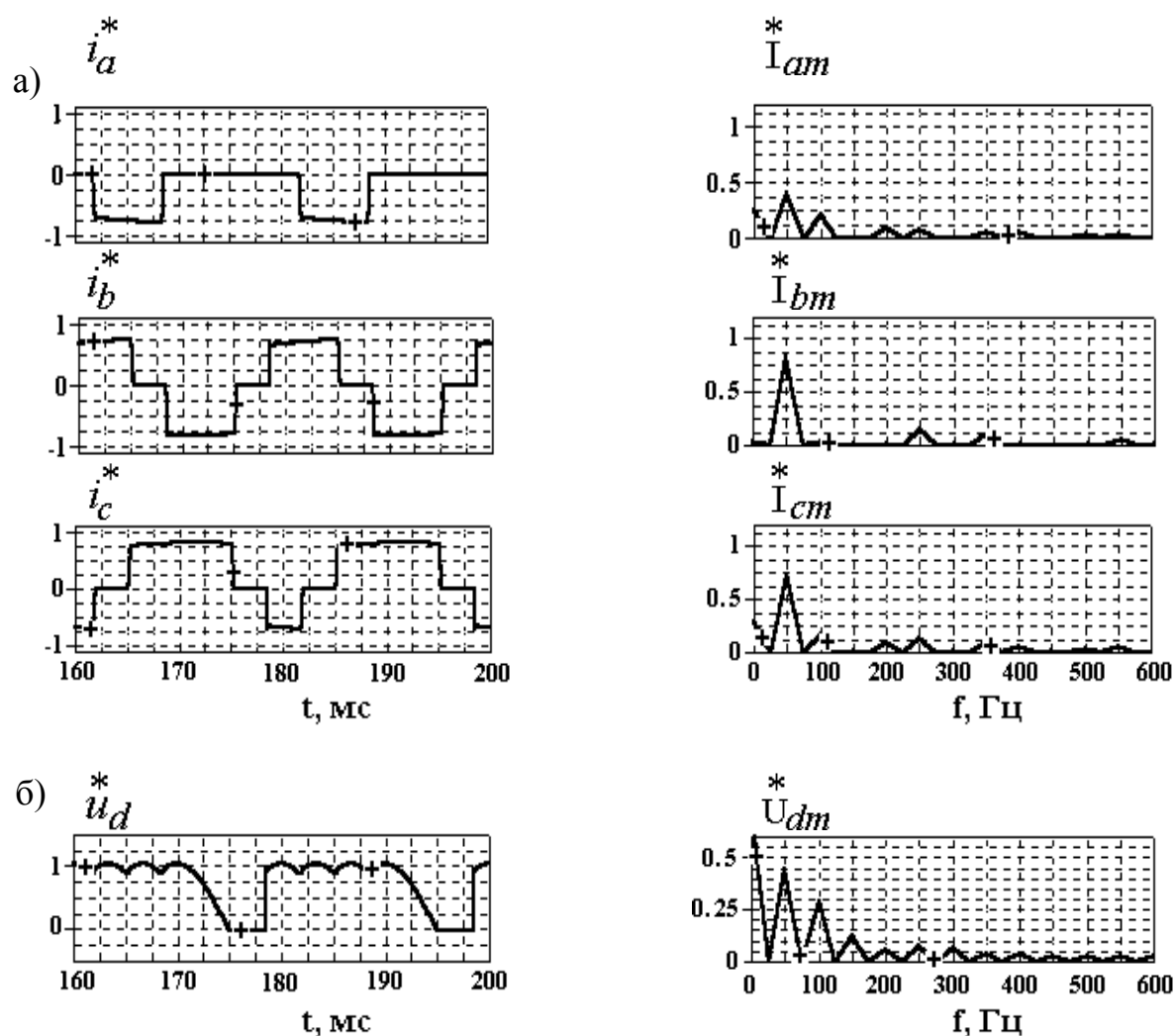


Рис.4.6. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Отказ в работе плеча выпрямителя с Т6 при $\alpha_{1...6} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Конкретное аварийное плечо, как и в случае неуправляемого и полууправляемого выпрямителей, может быть определено по знаку импульсов тока: положительный импульс тока означает отказ плеча с тиристором Т1 (рис.4.5 а), отрицательный – отказ в работе тиристора Т6 (рис.4.6 а).

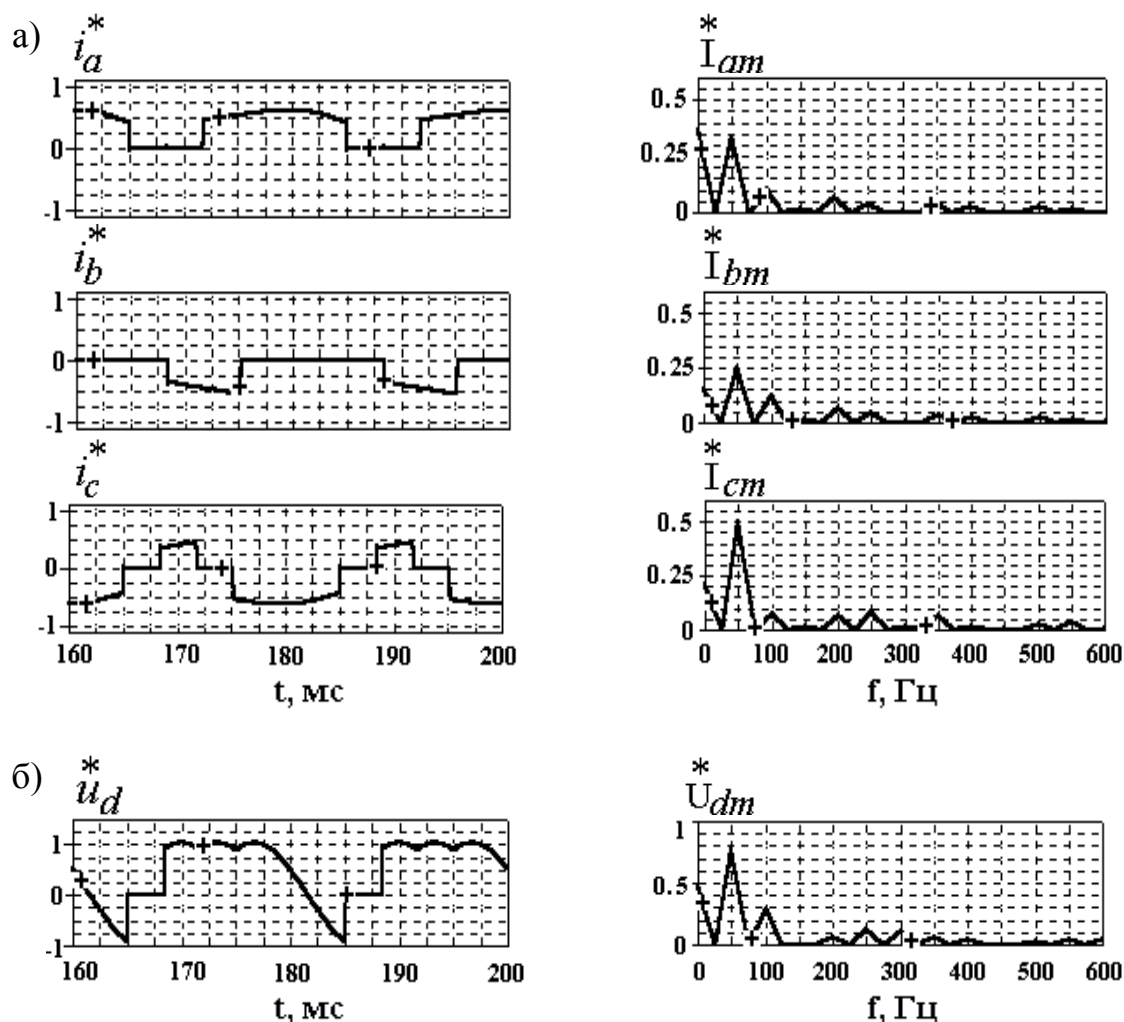


Рис.4.7. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Отказ в работе двух плеч выпрямителя с Т1 и Т2 при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Форма и спектр гармоник кривой выходного напряжения управляемого выпрямителя при отказе в работе плеч катодной (рис.4.5 б) и анодной (рис.4.6 б) групп моста, в отличие от полууправляемого выпрямителя, полностью совпадают, что не дает возможности определить по данным параметрам группу вентиля с неисправным плечом.

При аномальном режиме работы управляемого выпрямителя, связанным с одновременным выходом из строя плеч анодной и катодной групп моста (рис.4.7 а), диагностические признаки остаются теми же, что и для неуправляемого и полууправляемого выпрямителей.

Особого внимания заслуживают рассмотрение и анализ кривой формы выходного напряжения управляемого выпрямителя при таком виде аномального режима (рис.4.7 б) и сравнение её с аналогичными кривыми неуправляемого (рис.2.12 б) и полууправляемого (рис.3.6 б) выпрямителей.

На рис.4.8 приведены кривые напряжения всех трех схем с обозначением линейных напряжений и диаграммой включения вентилей на обозначенных участках времени.

Рассмотрим вначале кривую и проведем анализ электромагнитных процессов полностью управляемого выпрямителя (рис.4.8 а). Сразу отметим, что из-за разомкнутых ключей К1, К3 (К2 замкнут) в схеме управляемого выпрямителя (рис.4.4), разомкнутых ключей К1, К2 в схеме неуправляемого выпрямителя (рис.2.10 б) и разомкнутых ключах К1, К5 (К2, К3, К4 замкнуты) в схеме полууправляемого выпрямителя (рис.3.2) линейные напряжения u_{cb} , u_{ab} и u_{ac} не могут участвовать в формировании выходного напряжения выпрямителя.

На интервале времени $\nu_1 - \nu_2$ ток проводят тиристоры Т5 и Т6 (рис.4.4) под воздействием линейного напряжения u_{ca} , которое прикладывается к нагрузке (рис.4.8 а). Такое состояние сохранится до момента времени $\nu = \nu_3$. В данный момент времени ($\nu = \nu_3$) происходит смена полярности линейного напряжения u_{ca} . На интервале времени $\nu_3 - \nu_4$ ток нагрузки под воздействием ЭДС самоиндукции дросселя L будет протекать через тиристоры Т6 и Т5 в том же направлении – встречно прикладываемому напряжению u_{ca} . В результате происходит рекуперация энергии в сеть вплоть до момента времени $\nu = \nu_4$. В данный момент времени ($\nu = \nu_4$) подаётся импульс управления на тиристор Т4 ($\alpha_4 = 0^0$). При этом происходит коммутация тока с тиристора Т6 на Т4 под воздействием напряжения u_{ac} . Тиристор Т6 выключается, и нагрузка отключается от сети. Это вызывает появление ЭДС самоиндукции, которая будет проводить ток через тиристоры Т4, Т5. В течение времени $\nu_4 - \nu_5$ вентили Т4 и Т5 играют роль шунтирующего диода, как и в случае с отказом одного плеча моста полууправляемого выпрямителя. При $\nu = \nu_5$ включается тиристор Т3 ($\alpha_3 = 0^0$). В результате образуется контур коммутации $b - L\gamma - b' - T3 - T5 - c' - L\gamma - c$ тока с тиристора Т5 на тиристор Т3. На интервале времени $\nu_5 - \nu_6$ к нагрузке прикладывается линейное напряжение u_{bc} . В дальнейшем электромагнитные процессы повторяются.

В полууправляемом (рис.4.8 б) и неуправляемом (рис.4.8 в) выпрямителях на отрезке времени $\nu_1 - \nu_3$ электромагнитные процессы протекают, как и в полностью управляемом выпрямителе. Отличия возникают при изменении полярности напряжения u_{ca} в момент времени $\nu = \nu_3$, когда потенциал точки “а” становится более потенциальным относительно потенциала точки “с”. В полууправляемом и не управляемом выпрямителе это приводит к запираанию диода Д6 и отключению нагрузки от сети, в результате чего возникает ЭДС самоиндукции, которая будет проводить ток в полууправляемом выпрямителе через вентили Т5, Д4, в

неуправляемом – Д5, Д4. Благодаря этому, оба преобразователя вступают в режим работы выпрямителя с шунтирующим диодом.

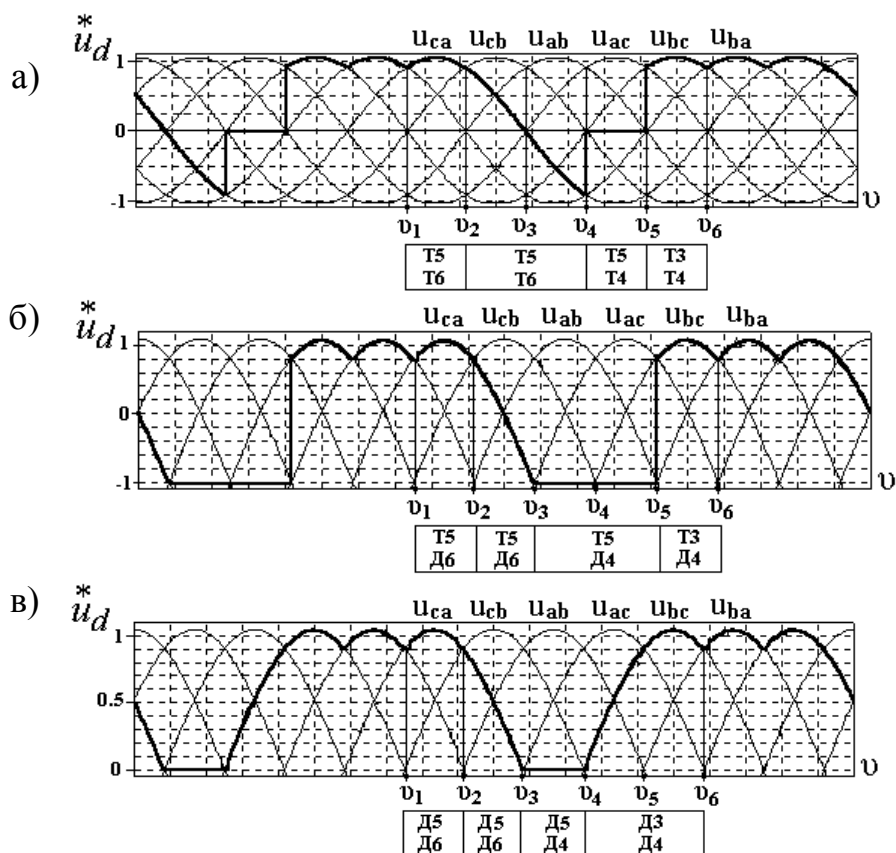


Рис.4.8. Кривые выходного напряжения при одновременном отказе в работе плеч моста анодной и катодной групп выпрямителя с RL – нагрузкой: а – управляемый выпрямитель ($\alpha_{1...6} = 0^0$); б – полууправляемый выпрямитель ($\alpha_{1,3,5} = 0^0$); в – неуправляемый выпрямитель

В неуправляемом выпрямителе при $u = u_4$ (рис.4.8 в) напряжение u_{bc} принимает положительное значение. Это вызывает коммутацию тока с диода Д5 на диод Д4 (рис.2.10 б), и к нагрузке приложится напряжение сети. Этого не произойдет в полууправляемом выпрямителе (рис.3.2), поскольку на тиристор Т3 импульс управления еще не будет подан ($\alpha_3 = 0^0$), благодаря чему преобразователь сохраняет режим с шунтирующим диодом до момента включения тиристора Т3 при $u = u_5$ (рис.4.8 б)

Таким образом, анализ такого вида аномальных электромагнитных процессов выпрямителей позволил выявить ряд особенностей их протекания.

В управляемом выпрямителе при $\alpha = 0^0$ кроме обычного режима возникают режимы полууправляемого выпрямителя и рекуперации. При нормальной работе выпрямителя, как известно, рекуперация энергии в сеть возможна лишь при $\alpha > 90^0$. В неуправляемом выпрямителе в отдельные моменты времени возникают процессы, присущие полууправляемому выпрямителю или выпрямителю с шунтирующим диодом.

4.1.2. Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления, равных нулю, и асимметрии импульса одного плеча

Определение характеристических признаков диагностики таких аномальных режимов были проведены для полупроводящего выпрямителя. С целью проверки возможности их применения для диагностирования управляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке были проведены его исследования при аналогичных аномальных режимах.

В качестве примера на рис.4.9 приведены расчетные кривые фазных токов и напряжения и спектры их гармоник при заданных углах управления $\alpha_{2...6} = 0^\circ$ и отличающимся от них угле аномального импульса включения тиристором Т1 $\alpha_1 = 30^\circ$.

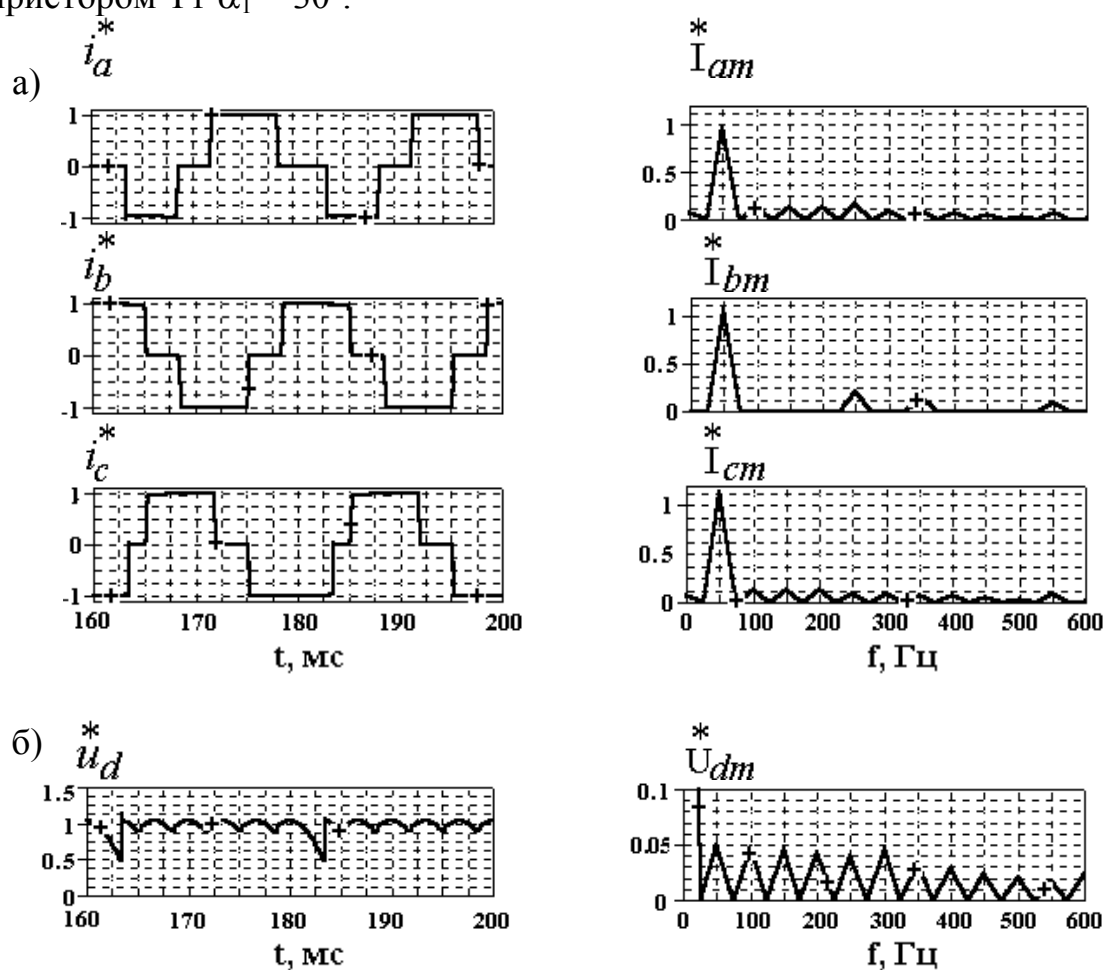


Рис.4.9. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL – нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_1 = 30^\circ$ при $\alpha_{2...6} = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выходное напряжение и спектр его гармоник

Анализ амплитуд первых гармоник фазных токов сети управляемого выпрямителя показывает, что наименьшую амплитуду имеет та фаза, которая примыкает к ветви моста с отклонением от нормальной работы (плечо с тиристором Т1). Это отмечалось и в случае полупроводящего выпрямителя.

Аналогичные диагностические признаки справедливы и для действующих значений фазного тока. Наименьшее его значение также оказывается в той фазе, которая примыкает к ветви с отклонением от нормальной работы.

На рис.4.10, 4.11 приведены расчетные зависимости амплитуды первой гармоники фазных токов $I_{am(1)}^* = f(\alpha_1)$, $I_{bm(1)}^* = f(\alpha_1)$, $I_{cm(1)}^* = f(\alpha_1)$ и их действующих значений $I_a^* = f(\alpha_1)$, $I_b^* = f(\alpha_1)$, $I_c^* = f(\alpha_1)$ от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 0^0$.

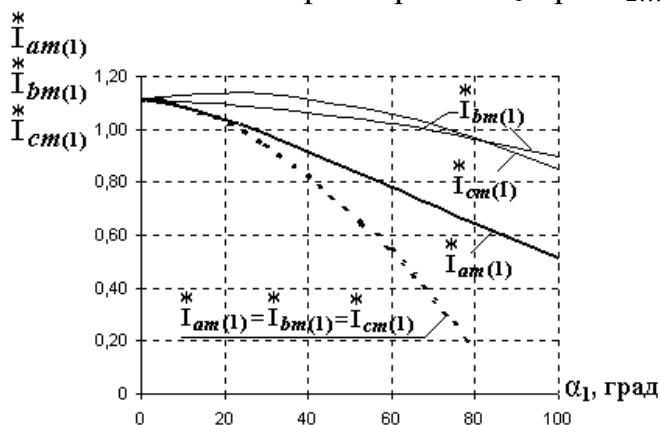


Рис.4.10. Зависимости амплитуд первой гармоники фазных токов управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 0^0$:

— $I_{am(1)}^*$, $I_{bm(1)}^*$, $I_{cm(1)}^*$ при аномальном режиме $\alpha_{2...6} = 0$, $\alpha_1 = 0 \div 100^0$;
 --- $I_{am(1)}^*$, $I_{bm(1)}^*$, $I_{cm(1)}^*$ при нормальном режиме $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6$

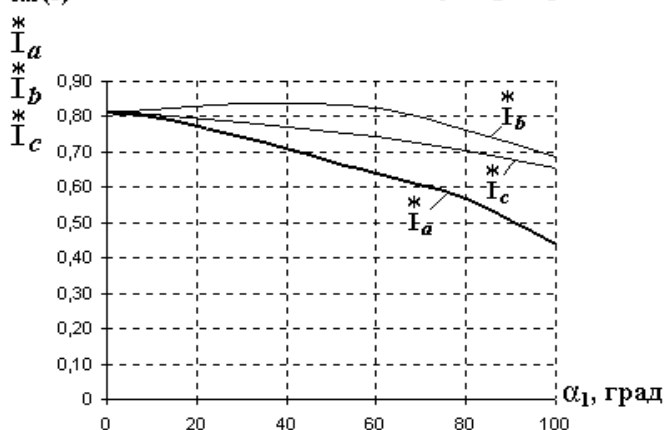


Рис.4.11. Зависимости действующих значений фазных токов управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 0^0$

Зависимости, представленные на рис.4.10, 4.11, наглядно отражают основной диагностический признак наименьшего значения амплитуды первой гармоники тока фазы и его действующего значения по сравнению с

токами других фаз в диапазоне изменения угла аномального импульса включения тиристора $T1 \alpha_1 > 10^0$.

Исследуемый вид асимметрии импульсов управления отрицательно сказывается на гармоническом составе кривой выходного напряжения. Это наглядно отражает рис.4.12, на котором представлены зависимости амплитуд 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й гармоник выходного напряжения от угла аномального импульса включения тиристора $T1 \alpha_1$.

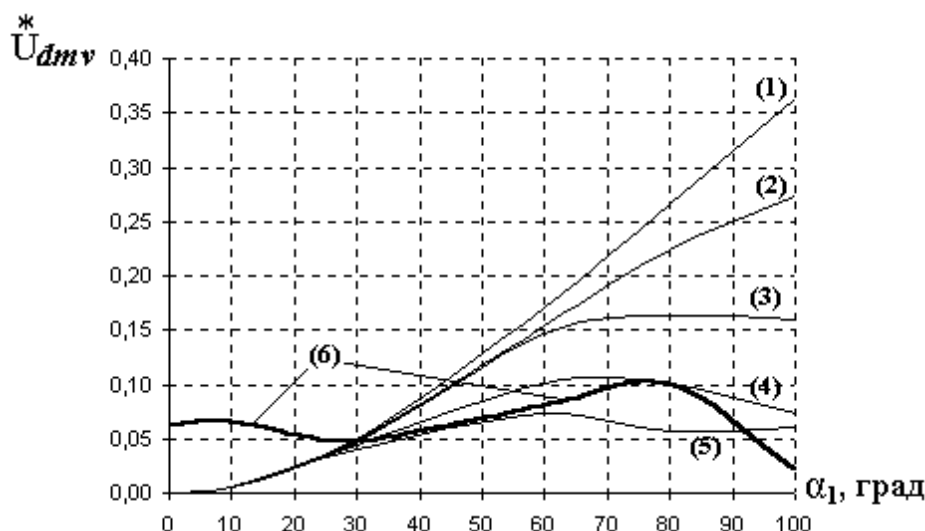


Рис.4.12. Зависимости амплитуд 1...6 гармоник выходного напряжения управляемого выпрямителя от угла аномального импульса включения тиристора $T1 \alpha_1$ при $\alpha_{2...6} = 0^0$

Рассмотрение данных зависимостей показывает, что в диапазоне изменения угла $\alpha_1 \leq 60^0$ амплитуды 1-й, 2-й, 3-й гармоник увеличиваются от 0 до 15...17,5 % относительно базового значения $U_{баз}$ и превосходят амплитуду 6-й гармоники практически в два раза. Изменение амплитуд 4-й и 5-й гармоник происходит аналогично первым трем гармоникам в диапазоне $\alpha_1 \leq 30^0$. При $30^0 \leq \alpha_1 \leq 60^0$ их изменение менее заметно, а амплитуды мало отличаются от амплитуды 6-й гармоники.

В диапазоне $\alpha_1 > 60^0$ амплитуда 1-й и 2-й гармоник сохраняет тенденцию к увеличению. Амплитуда 3-й гармоники практически неизменна и составляет 16 %, а амплитуды 4-й и 5-й гармоник уменьшаются незначительно.

Приведенные зависимости могут быть использованы при общей оценке работы выпрямителя без указания конкретного места неисправности.

4.1.3. Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления, отличных от нуля, и асимметрии импульса одного плеча

Основной задачей приведенных ниже результатов исследования являлось выявление характеристических признаков для диагностирования управляемого выпрямителя в таких случаях, когда $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$ и $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$. При этом заданные значения углов управления $\alpha_{2...6}$ не равнялись нулю.

На рис.4.13, 4.14 в качестве примера представлены кривые мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения управляемого выпрямителя и их спектры при $\alpha_1 = 0^\circ$ и $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (рис.4.13), а также при $\alpha_1 = 40^\circ$ и $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (рис.4.14).

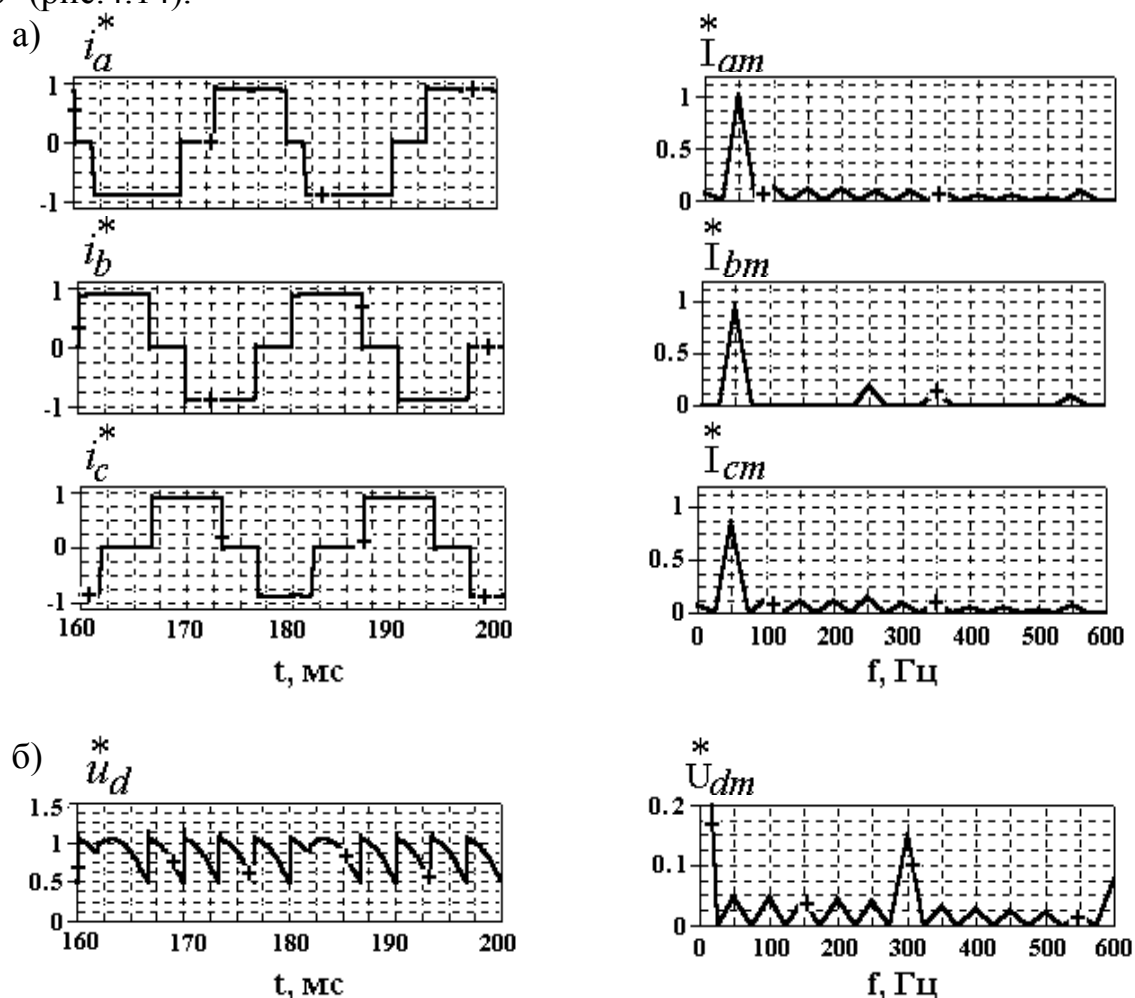


Рис.4.13. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

Общим для представленных на рис.4.13 б, 4.14 б кривых выходного напряжения является наличие в их спектрах практически всех гармоник. Однако 6-я гармоника, значение которой при $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$ составляет 15,3 % от значения $U_{\delta аз}$ и 18 % при $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$, явно превосходит амплитуды всех остальных гармоник, значения которых практически равны и находятся в

пределах 3,5...5 %. Отметим, что при нормальном режиме работы управляемого выпрямителя их амплитуды практически равны нулю (см. рис.4.3 б). Сравнение расчетных кривых показывает, что кривые при $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$ и $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$ по гармоническому составу практически одинаковы, но отличаются по значению амплитуд.

Амплитуда первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви моста с отклонением от нормальной работы, при $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$ имеет наибольшие значения. Данное соотношение между амплитудами первых гармоник фазных токов сети было выявлено при исследовании аналогичных аномальных режимов работы полууправляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой при $\alpha_1 < \alpha_{3,5}$ (см. рис.3.12 а). При других значения угла α_1 , когда $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$, соотношение между амплитудами первых гармоник фазных токов сети меняется на обратное. Такое изменение также наблюдается в случае полууправляемого выпрямителя, когда $\alpha_1 > \alpha_{3,5}$ (см. рис.3.13 а).

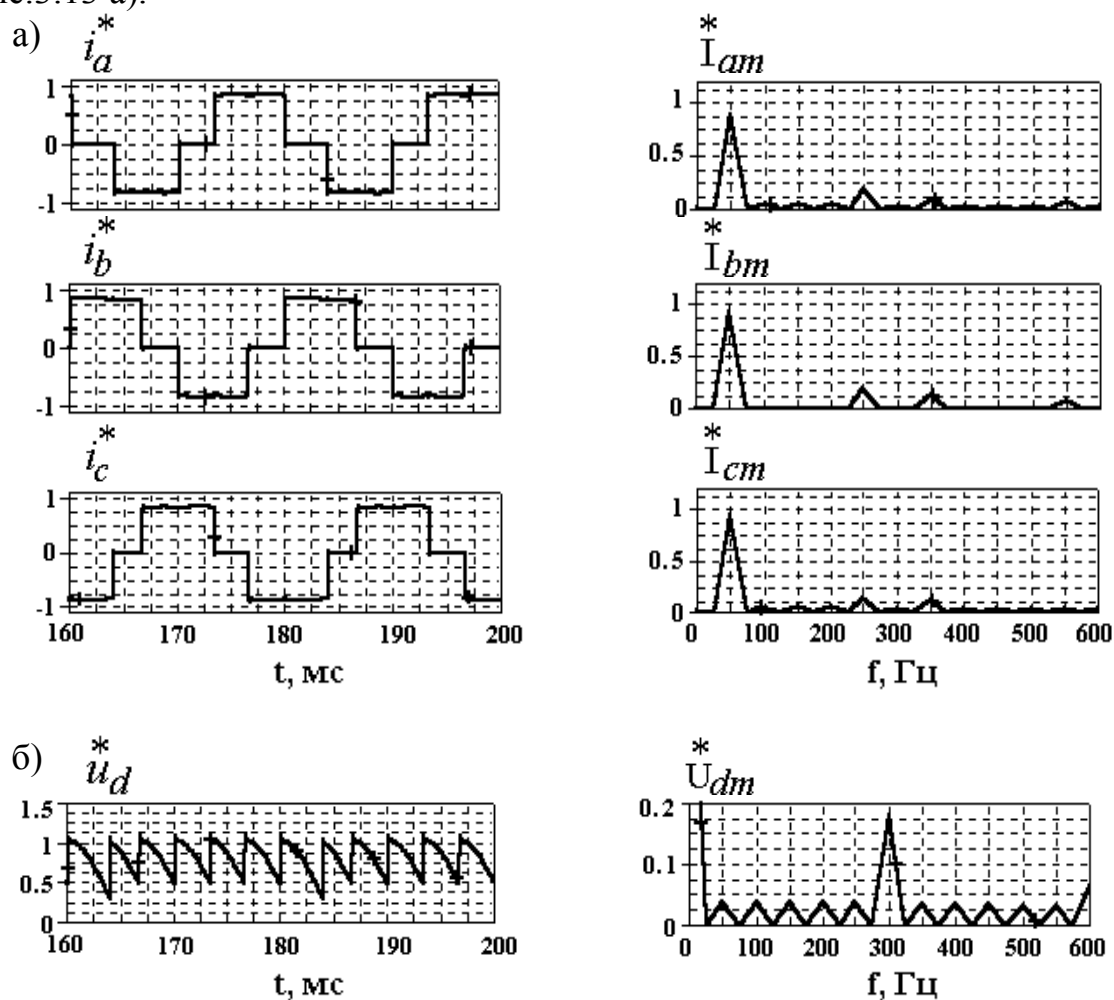


Рис.4.14. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с RL-нагрузкой. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 40^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник

При сравнении действующих значений фазных токов следует отметить, что их соотношение между собой аналогично рассмотренному выше соотношению амплитуд первых гармоник фазных токов. При $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$, за счет увеличения длительности протекания отрицательного импульса тока фазы “а” относительно положительного, действующее значение тока этой фазы оказывается больше, чем в фазах “b” и “с” (см. рис.4.13 а). В случае $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$ действующее значение тока фазы “а” снижается (см. рис.4.14 а).

Ниже приведены расчетные зависимости:

*
- $I_{am(1)} = f(\alpha_1)$, $I_{bm(1)} = f(\alpha_1)$, $I_{cm(1)} = f(\alpha_1)$ при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (рис.4.15);

*
- $I_a = f(\alpha_1)$, $I_b = f(\alpha_1)$, $I_c = f(\alpha_1)$ при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (рис.4.16);

*
- $U_{dmv} = f(\alpha_1)$ при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (рис.4.17).

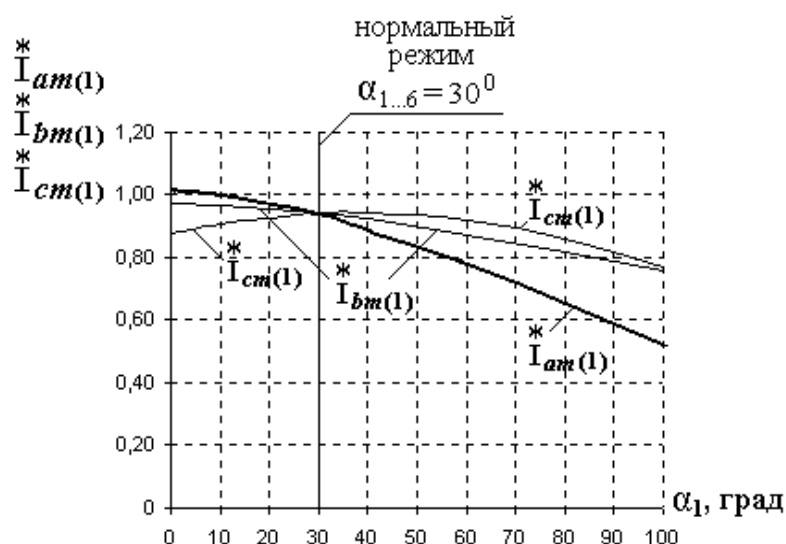


Рис.4.15. Зависимости амплитуды первой гармоники фазных токов управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой от угла аномального импульса включения тиристора T1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$

Сравнивая зависимости, приведенные на рис.4.15, с аналогичными зависимостями (рис.3.11) полууправляемого выпрямителя, полученными при таком же виде асимметрии импульсов управления, нетрудно отметить одинаковый характер их изменения.

Это говорит о том, что диагностирование управляемого выпрямителя при таком аномальном режиме возможно путем сравнения амплитуд первых гармоник фазных токов сети, как и в случае полууправляемого выпрямителя.

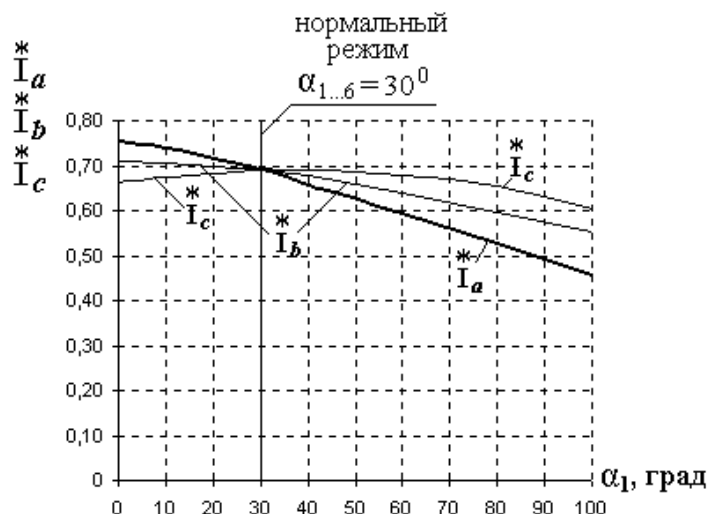


Рис.4.16. Зависимости действующего значения фазных токов управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$

Зависимости, приведенные на рис.4.16, также позволяют диагностировать управляемый выпрямитель при таком аномальном режиме его работы по действующим значениям фазных токов, поскольку характер их изменения (рис.4.16) практически полностью совпадает с характером изменения амплитуды первых гармоник фазных токов (рис.4.15).

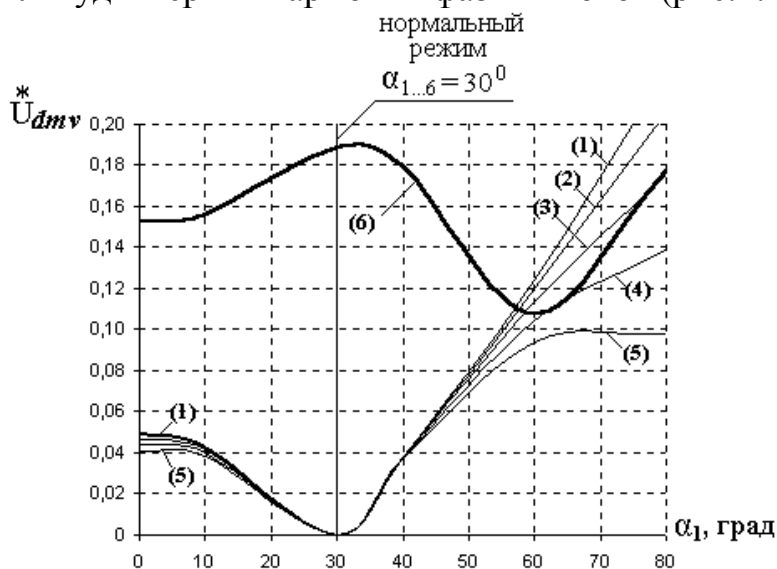


Рис.4.17. Зависимости амплитуды 1...6 гармоник выходного напряжения управляемого выпрямителя от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$

Зависимости, представленные на рис.4.17, наглядно отражают изменение амплитуд гармоник кривой выходного напряжения при данном виде асимметрии импульсов управления. Кроме того, при рассмотрении этих

зависимостей видно, что при $\alpha_1 = 30^\circ$, т.е. при нормальном режиме работы выпрямителя, в кривой выходного напряжения присутствует лишь шестая гармоника с максимальной амплитудой, равной 18,8 % относительно базового значения $U_{\text{баз}}$.

Приведенные на рис.4.17 зависимости могут быть использованы при общей оценке работы управляемого выпрямителя без указания конкретного плеча с отклонением от нормальной работы.

4.2. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на против-ЭДС при непрерывном токе

При исследовании аномальных режимов параметры расчетной схемы задавались близкими к значениям параметров электропривода постоянного тока, эксплуатируемого на предприятии ОАО «Котласский ЦБК».

Фазное напряжение питающего напряжения составляло $e_a = e_b = e_c = 220$ В; номинальная мощность двигателя $P_n = 37$ кВт, номинальное значение тока $I_n = 100$ А, угол коммутации $\gamma = 10^\circ$.

Целью данных исследований являлось изучение аномальных режимов управляемого выпрямителя и выявление диагностических признаков при таких же нарушениях в работе, которые рассматривались при исследовании аномальных режимов полууправляемого выпрямителя. К ним относятся: отказ в работе плеч моста катодной и анодной групп вентилей; одновременный отказ в работе двух плеч моста; влияние аномального импульса и асимметрии импульсов на режимы работы преобразователя. Кроме перечисленных аномальных режимов, дополнительно исследовались случаи отклонения углов управления тиристорами от заданных значений углов управления нескольких плеч моста, рассматривались вопросы влияния обратных связей на характеристические признаки диагностирования.

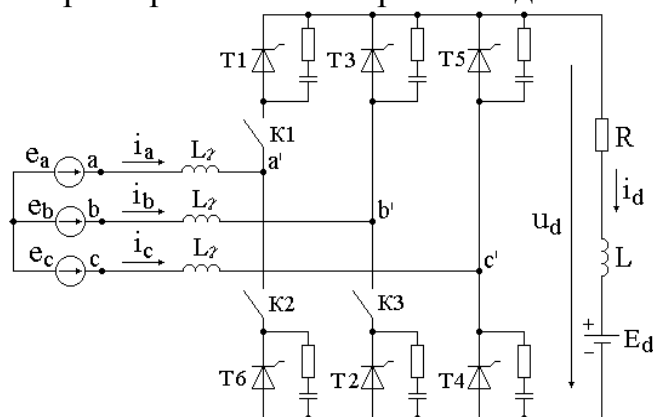


Рис.4.18. Расчетная схема трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на против-ЭДС

Расчетная схема для исследований перечисленных аномальных режимов работы приведена на рис.4.18.

При замкнутых ключах К1, К2 и К3 (рис.4.18) расчетная схема преобразователя соответствует нормальному режиму его работы.

При разомкнутом ключе К1 и замкнутых К2, К3 данная схема эквивалентна аномальному режиму работы, связанному с отказом в работе плеча моста катодной группы вентилей с тиристором Т1.

При разомкнутом ключе К2 и замкнутых ключах К1, К3 схема соответствует режиму работы с выходом из строя плеча моста анодной группы вентилей с тиристором Т6.

В случае замкнутого ключа К2 и разомкнутых ключах К1 и К3 аномальный режим работы преобразователя соответствует одновременному отказу в работе плеч катодной и анодной групп вентилей моста.

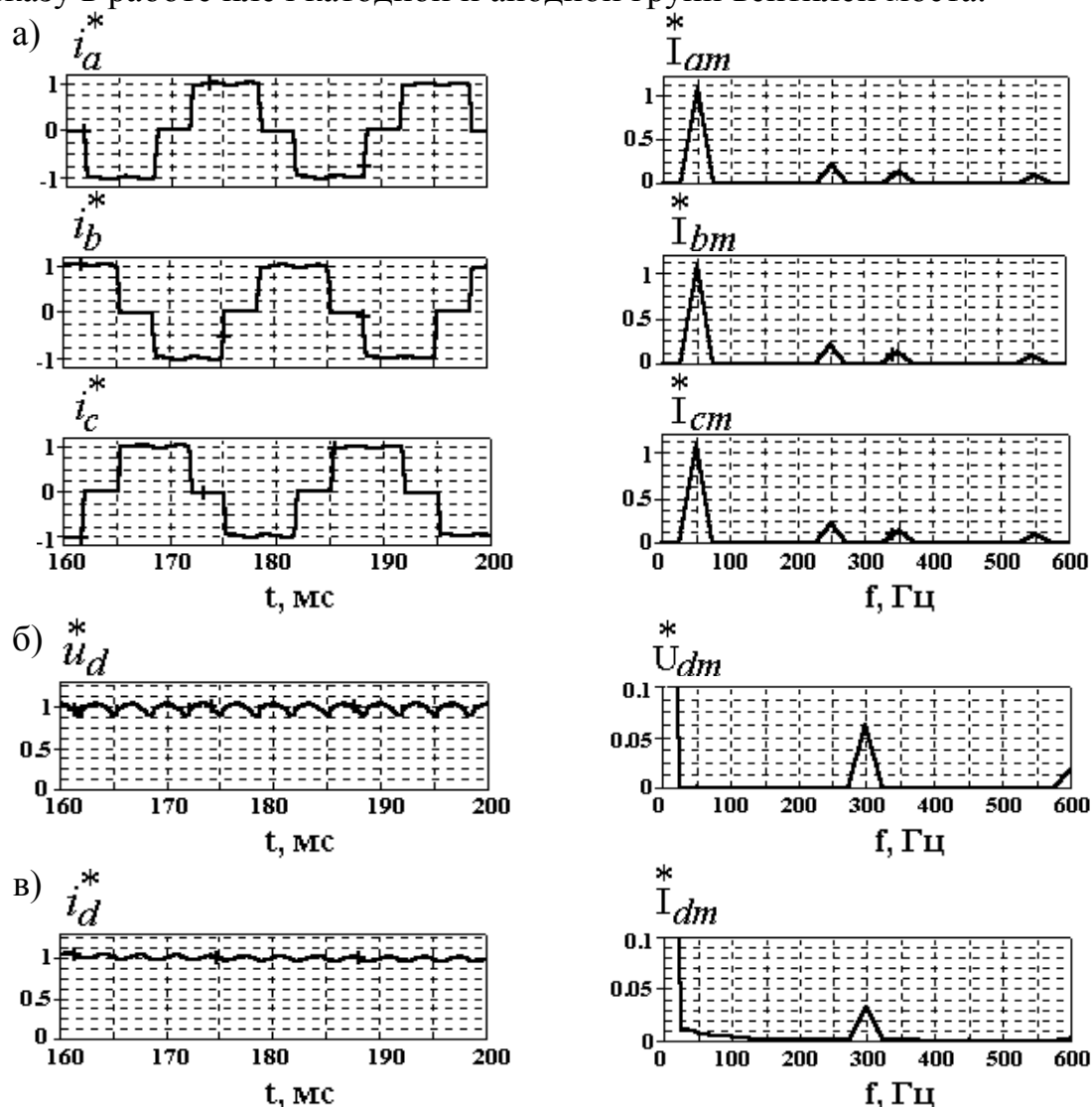


Рис.4.19. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Нормальный режим работы при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$, $\gamma = 10^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

Исследования аномальных режимов проводились в направлении сравнения с нормальными, при которых выполнялась полная симметрия заданных углов управления. Для этого вначале были заданы два нормальных режима работы выпрямителя $\alpha_{1...6} = 0^\circ$ и $\alpha_{1...6} = 30^\circ$ и рассчитаны кривые токов и напряжений и спектры их гармоник. Результаты таких расчетов приведены на рис.4.19, 4.20.

Следует отметить, что форма данных кривых и гармонический их состав (рис.4.19, 4.20) управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС в нормальном режиме практически не отличаются от формы и гармонического состава аналогичных кривых, полученных в случае активно-индуктивной нагрузки (см. рис.4.2, 4.3).

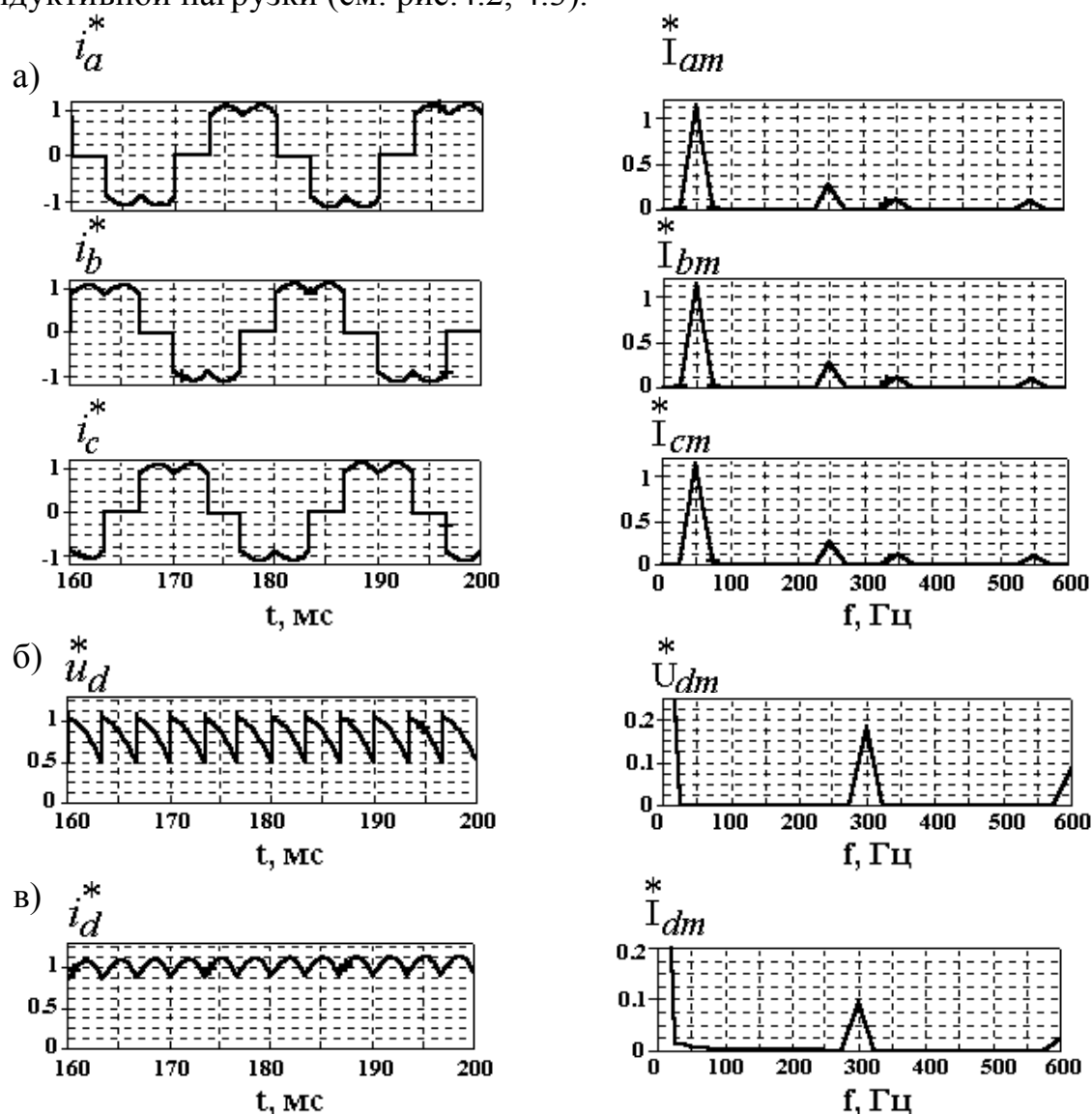


Рис.4.20. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Нормальный режим работы при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

4.2.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного и двух плеч моста

На рис.4.21-4.24 приведены расчетные кривые токов и напряжений и спектры их гармоник для случаев выхода из строя плеч катодной (рис.4.21, 4.22) и анодной (4.23, 4.24) групп вентилях моста, соответственно, при заданных значениях $\alpha_{1...6} = 0^\circ$ и $\alpha_{1...6} = 30^\circ$. Их анализ показывает, что выявленные характеристические признаки диагностики для полууправляемого выпрямителя справедливы и для полностью управляемого выпрямителя. При этом данные признаки диагностики приемлемы для любых углов управления преобразователя.

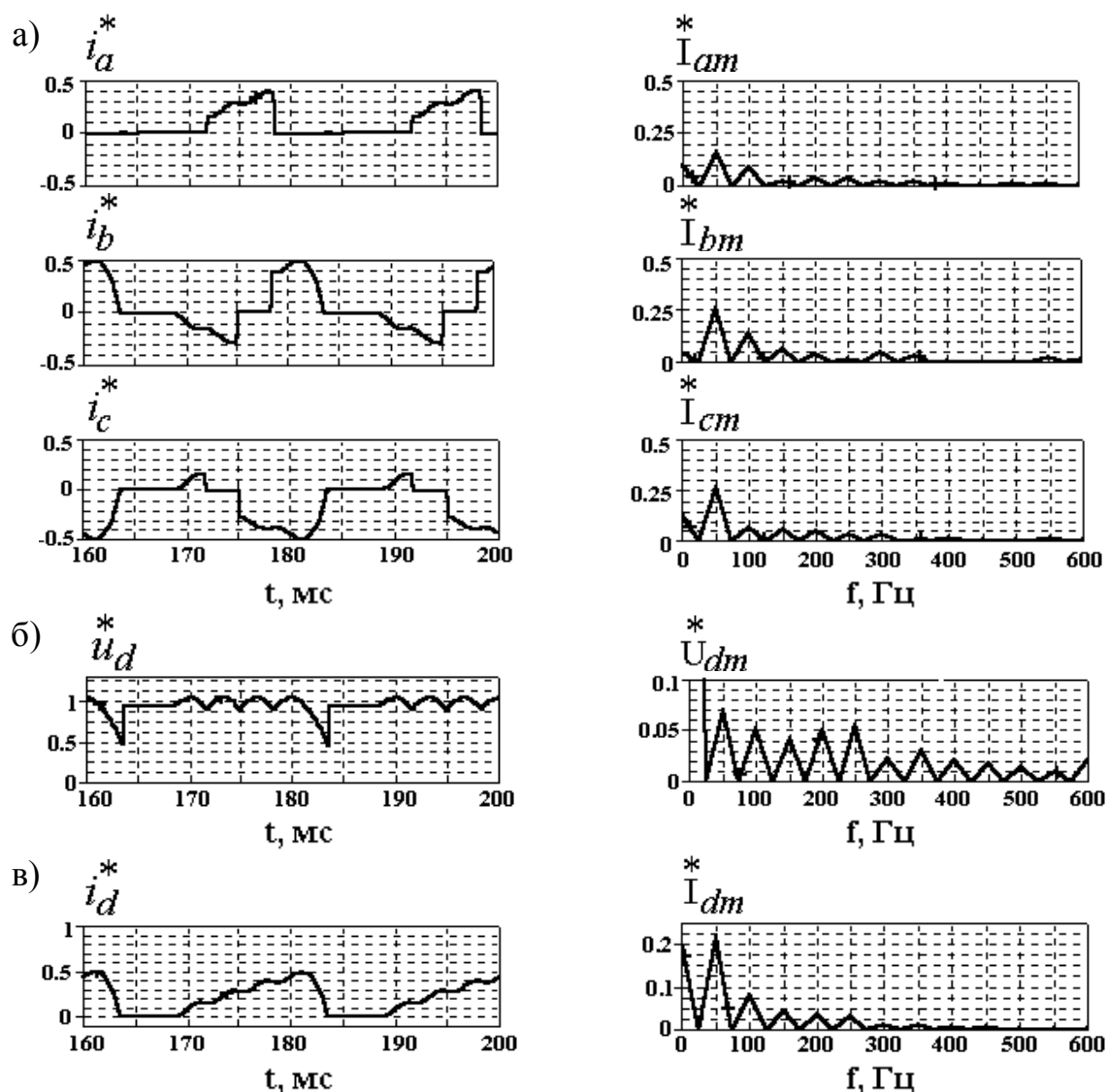


Рис.4.21. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе плеча моста катодной группы вентилях с тиристором Т1 при $\alpha_{1...6} = 0^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

Действительно, отказ плеча катодной группы вентилей моста, характеризуемый однополярным положительным импульсом и наименьшей амплитудой первой гармоники тока фазы, примыкающей к ветви с аномальной работой плеча, наглядно демонстрирует положительный импульс тока фазы “а” при $\alpha_{1...6} = 0^0$ (рис.4.21 а) и $\alpha_{1...6} = 30^0$ (рис.4.22 а). Аналогичные признаки выхода из строя плеча анодной группы вентилей: отрицательный импульс и наименьшая амплитуда тока аномальной фазы “а” (рис.4.23 а, 4.24 а).

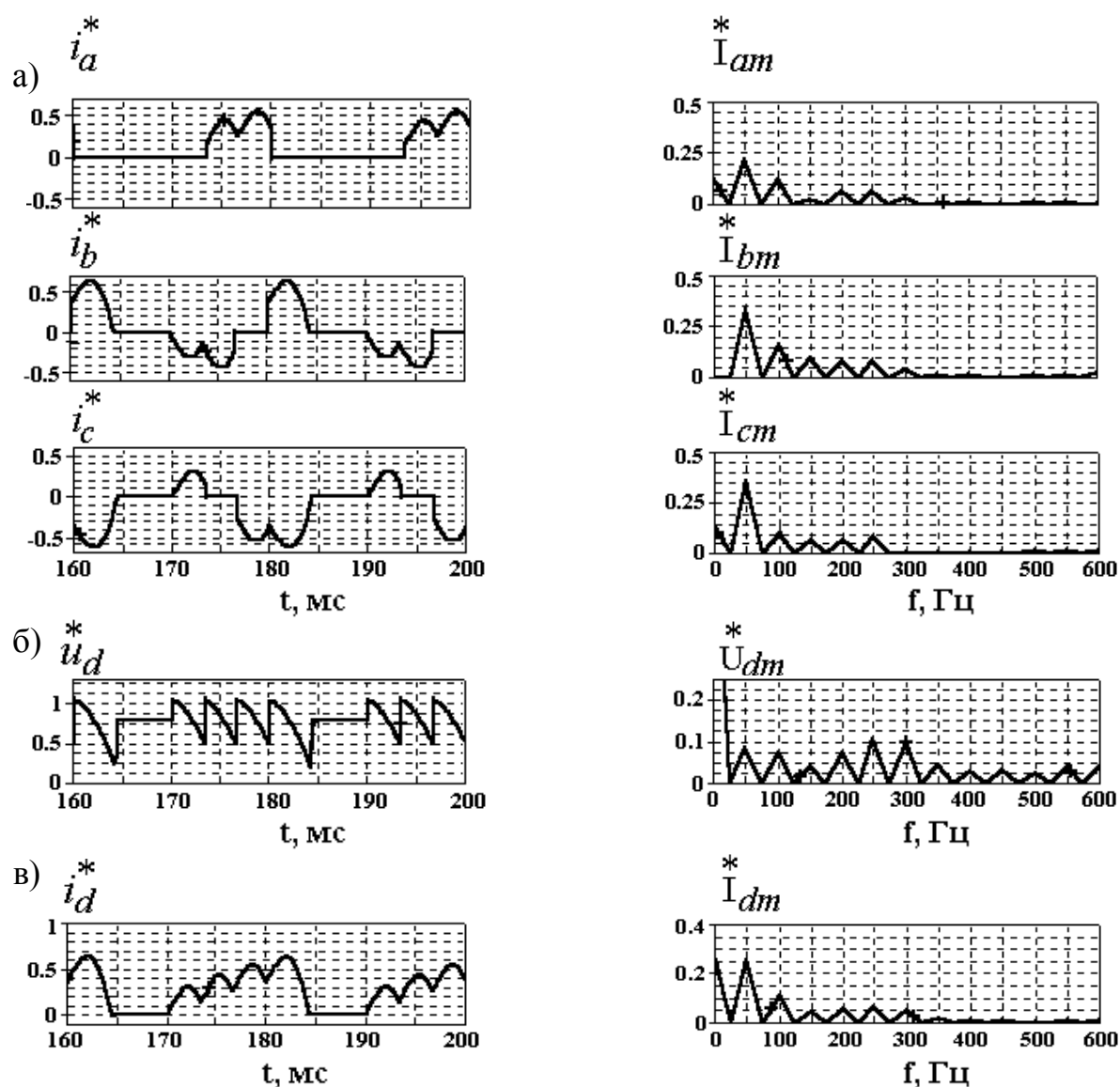


Рис.4.22. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе плеча моста катодной группы вентилей с тиристором Т1 при $\alpha_{1...6} = 30^0$: а – кривые фазных токов и спектр их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

Одновременный отказ двух плеч моста характеризуют расчетные кривые и данные, приведенные на рис.4.25 при $\alpha_{1...6} = 0^0$ и на рис.4.26 при $\alpha_{1...6} = 30^0$. Их анализ показывает, что выявление конкретного аномального плеча моста возможно лишь визуальной оценкой импульсов тока. Характеристический признак наименьшей амплитуды первой гармоники или действующих значений аномального тока фазы в данном случае не применим.

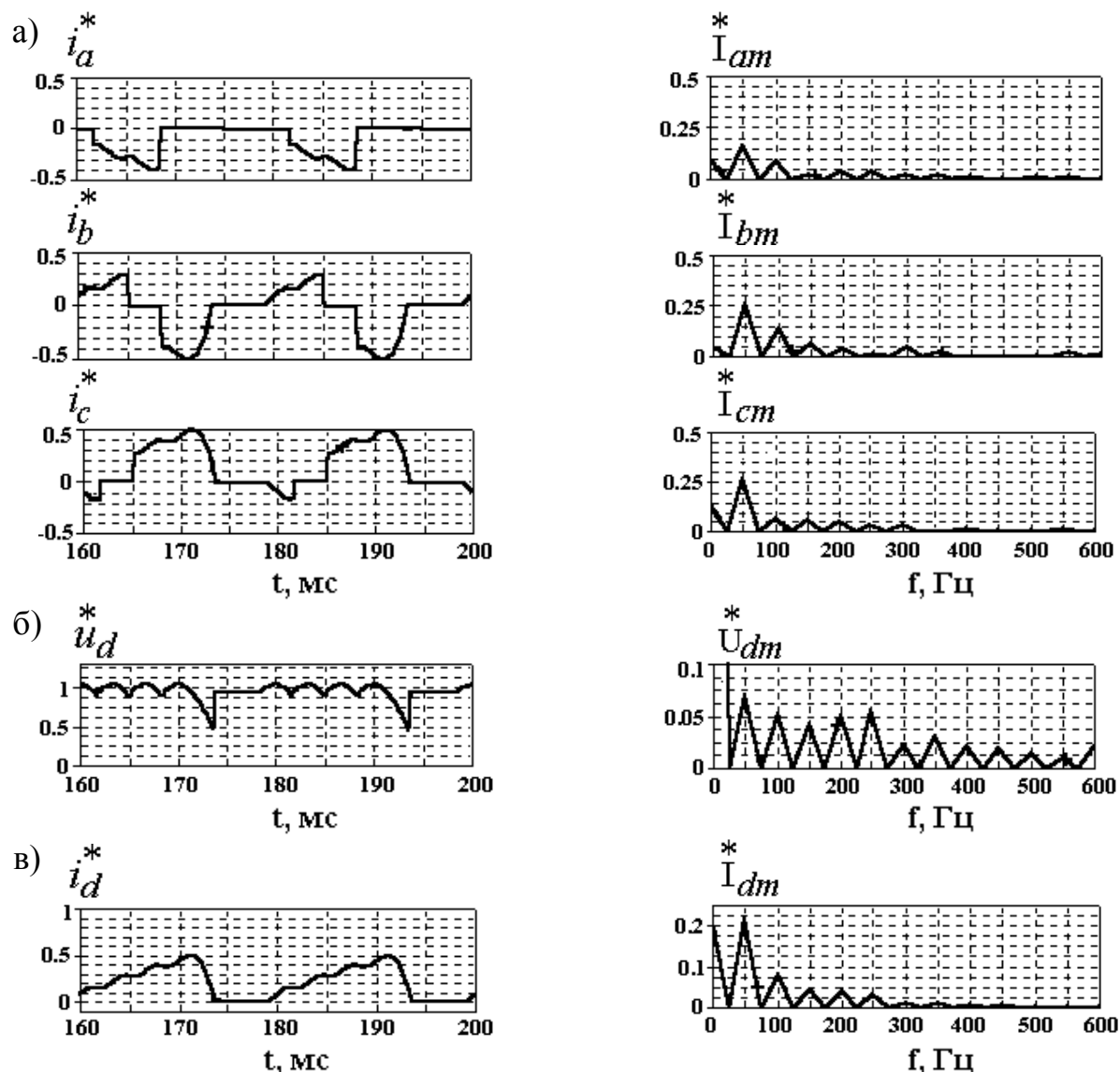


Рис.4.23. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе плеча моста анодной группы вентилей с тиристором Т6 при $\alpha_{1...6} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

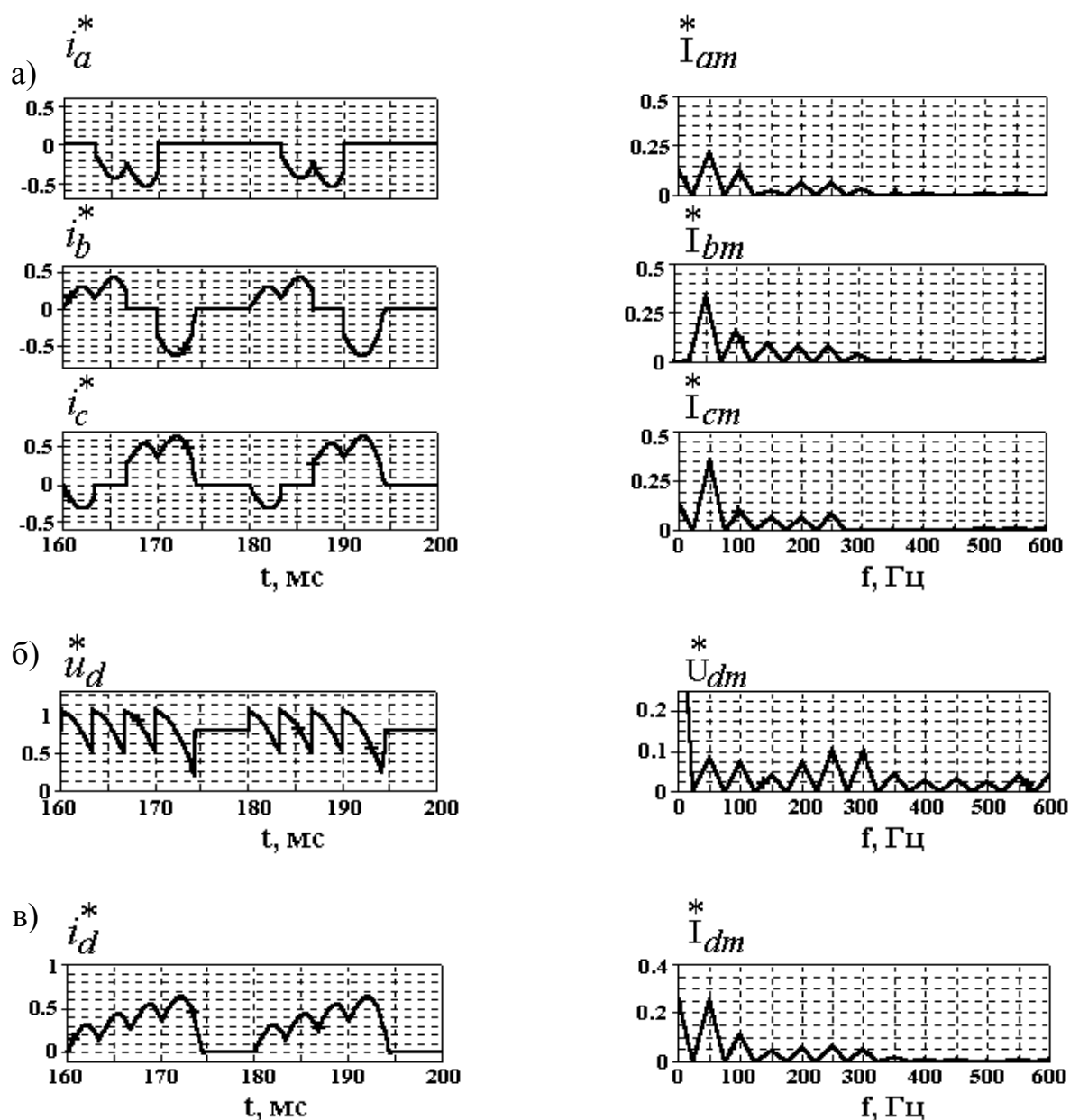


Рис.4.24. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Отказ в работе плеча моста анодной группы вентилей с тиристором Т6 при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

При общей оценке рассмотренных аномальных режимов управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС следует отметить схожесть формы и гармонического состава его кривых мгновенных значений фазных токов, выходного напряжения и тока нагрузки с аналогичными кривыми полупроводникового выпрямителя при таких же аномальных режимах и таком же виде нагрузки.

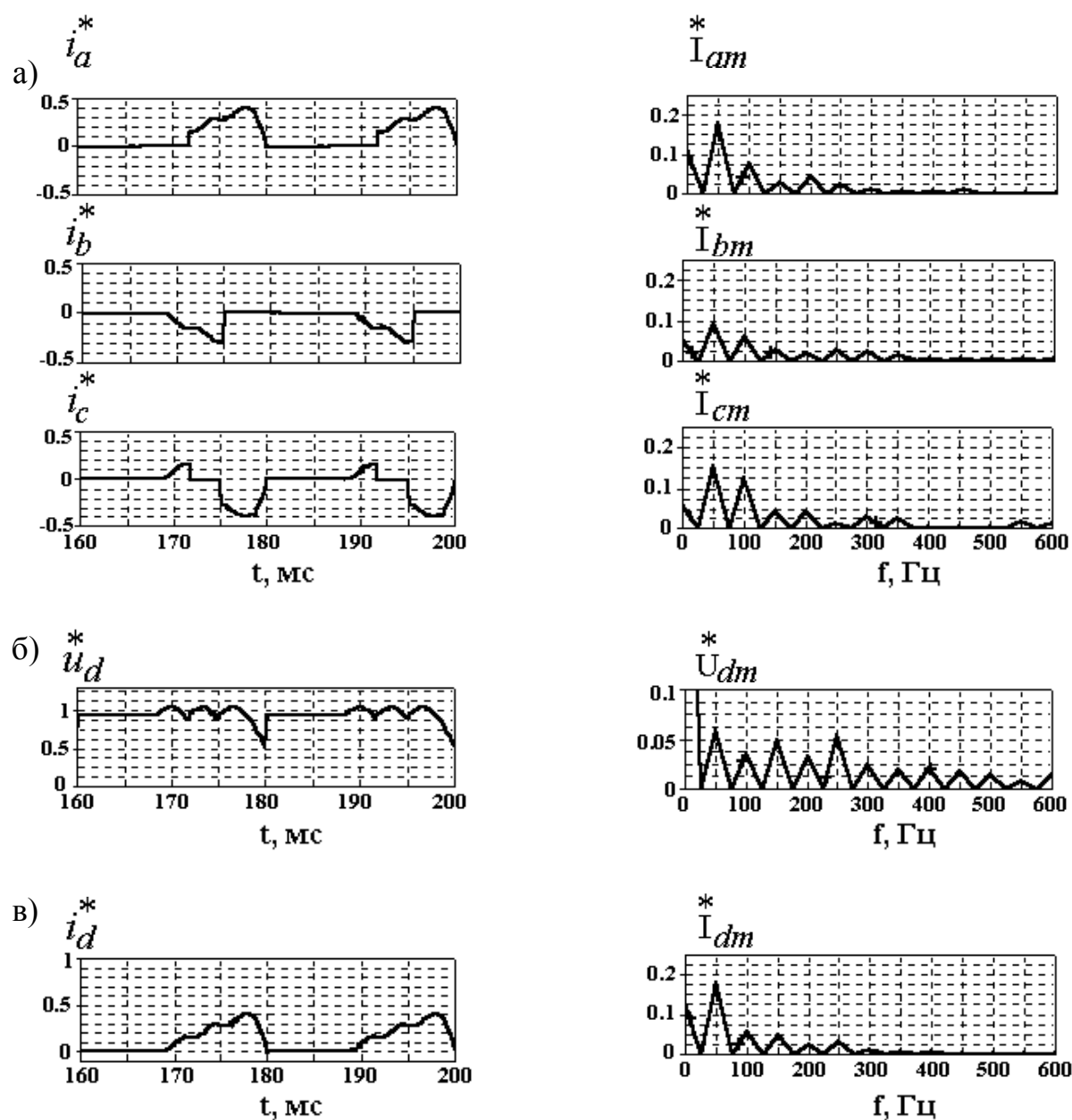


Рис.4.25. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Одновременный отказ в работе двух плеч моста выпрямителя с тиристором Т1 и Т2 при $\alpha_{1...6} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

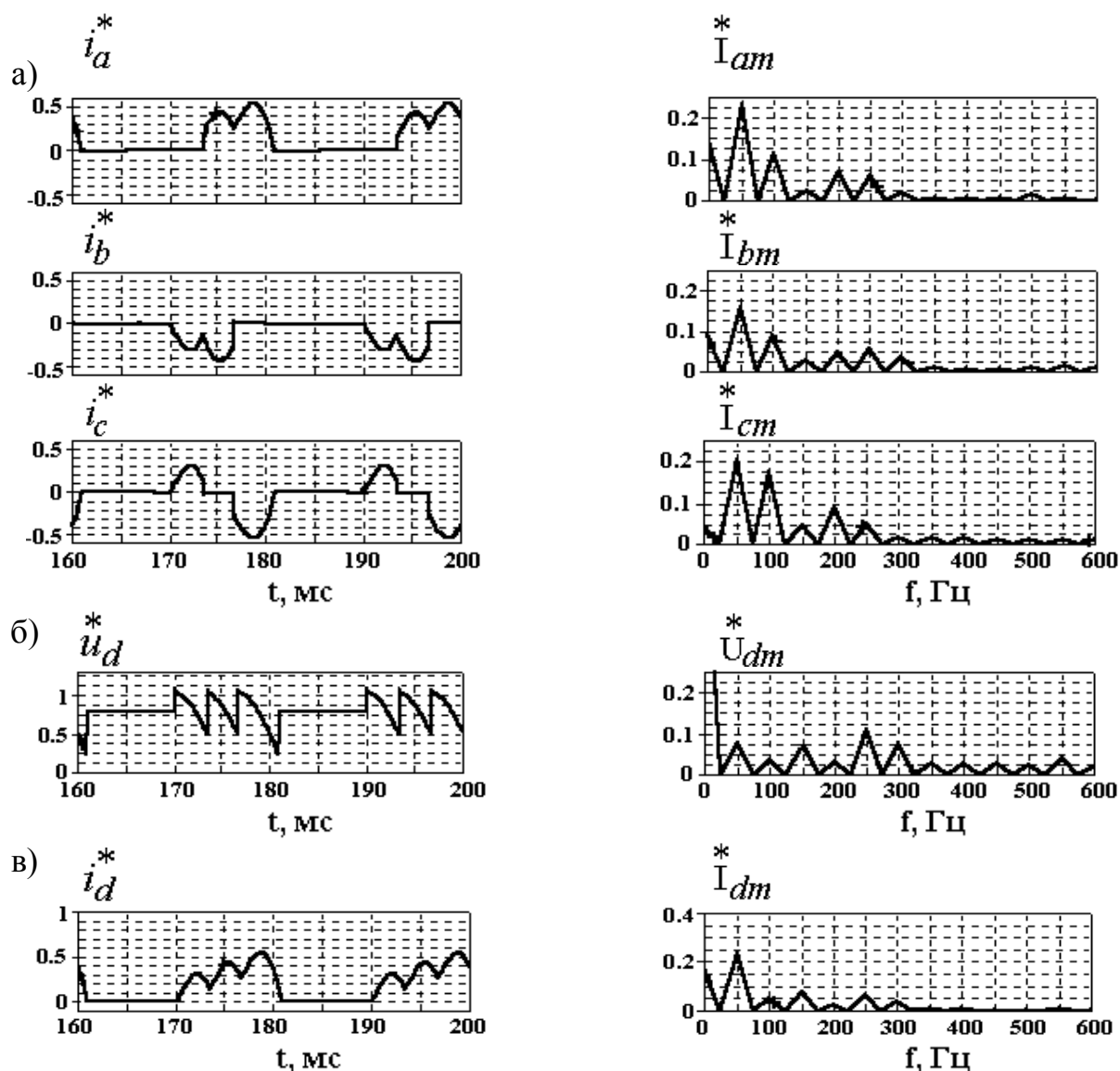


Рис.4.26. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Одновременный отказ в работе плеч моста выпрямителя с тиристорами T1 и T2 при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

4.2.2. Влияние аномального импульса включения тиристора одного плеча моста на работу выпрямителя

На практике часто наблюдается случаи, когда по разным причинам, например, из-за коммутационных процессов или из-за сбоя в работе устройства управления, на один из тириستоров моста попадает импульс с углом включения α_1 , отличным от заданного значения. Угол аномального импульса может превосходить значения заданного, т.е. $\alpha_1 > \alpha_{2...6}$, или принимать меньшие значения, когда $\alpha_1 < \alpha_{2...6}$. Для выявления

характеристических признаков диагностирования при таких аномальных режимах был произведен расчет кривых фазных токов, выходного напряжения и тока нагрузки при изменении угла α_1 аномального импульса в пределах $\alpha_1 = 0 \dots 100^\circ$ и постоянных значениях заданных углов управления $\alpha_{2\dots 6} = 0^\circ$ и $\alpha_{2\dots 6} = 30^\circ$.

Рассмотрим вначале первый случай, когда $\alpha_{2\dots 6} = 0^\circ$.

На основании расчетных данных были построены зависимости амплитуд первых гармоник и действующих

значений фазных токов от аномального угла α_1 : $I_{am(1)} = f(\alpha_1)$,

$I_{bm(1)} = f(\alpha_1)$, $I_{cm(1)} = f(\alpha_1)$; $I_a = f(\alpha_1)$, $I_b = f(\alpha_1)$, $I_c = f(\alpha_1)$

при $\alpha_{2\dots 6} = 0^\circ$. Данные зависимости приведены на рис.4.27 а,б.

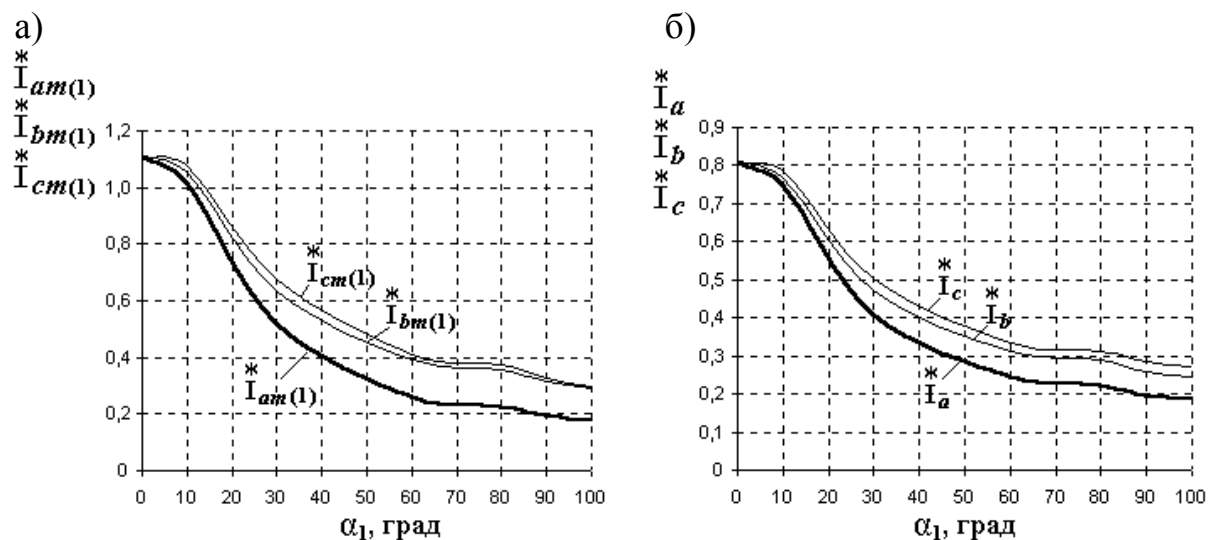


Рис.4.27. Зависимости амплитуд первой гармоники фазных токов (а) и их действующих значений (б) от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2\dots 6} = 0^\circ$

Их рассмотрение показывает, что амплитуда первой гармоники и действующее значение тока фазы, примыкающей к неисправной ветви, меньше по сравнению с аналогичными значениями токов других фаз. При этом разница амплитуд увеличивается по мере увеличения α_1 . Это говорит о сохранении тех же характеристических признаков диагностики, которые были выявлены для полууправляемого выпрямителя. Определенный интерес представляет определение влияния угла α_1 на изменение состава амплитуд гармоник тока нагрузки и выходного напряжения. На основании расчетных данных были построены зависимости $U_{mdv} = f(\alpha_1)$ и $I_{mdv} = f(\alpha_1)$ (рис.4.28).

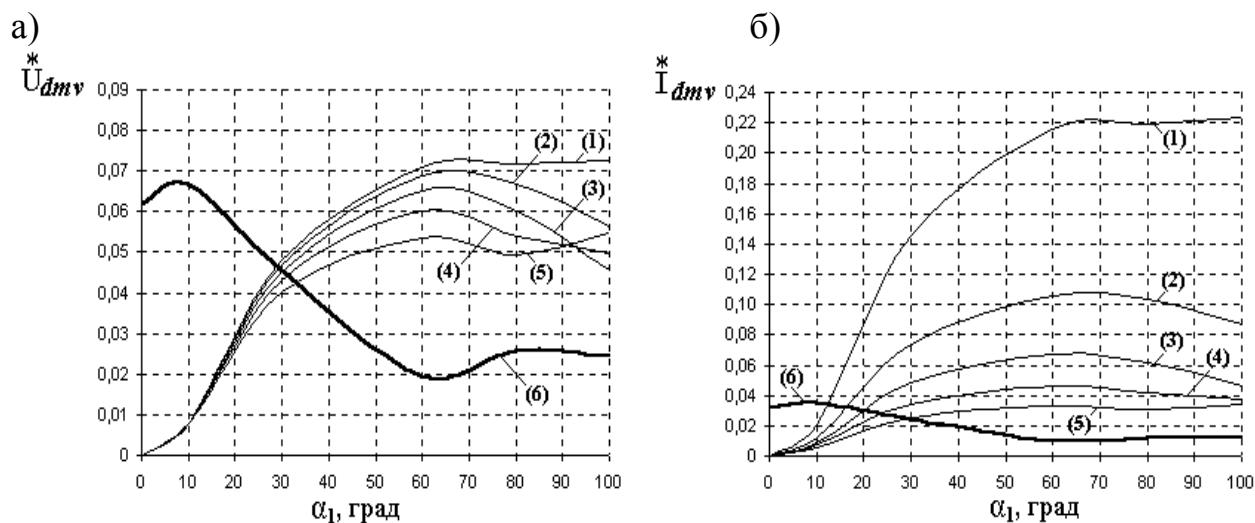


Рис.4.28. Зависимости амплитуд гармоник кривой выходного напряжения (а) и выпрямленного тока (б) от изменения угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 0^\circ$

На рис.4.28 видно, что любое отклонение угла α_1 от нормального значения приводит к возникновению пяти гармоник, амплитуды которых увеличиваются по мере повышения α_1 . При нормальном режиме данные гармоники отсутствуют. Это обстоятельство дает возможность констатировать наличие аномального режима в работе выпрямителя.

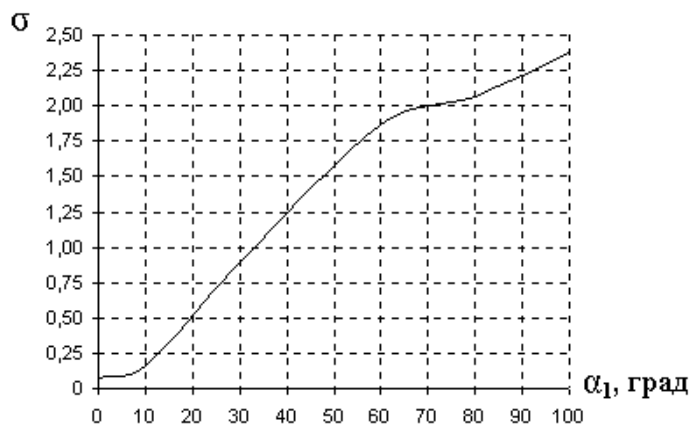


Рис.4.29. Зависимость пульсаций тока нагрузки от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 0^\circ$

Появление гармоник в кривой тока нагрузки приводит к увеличению его пульсаций, что наглядно подтверждается приведенной на рис.4.29 зависимостью относительных значений пульсаций тока нагрузки от аномального угла α_1 .

$$\sigma = (i_{d\max}^* - i_{d\min}^*) / I_{d(0)}^*,$$

где $i_{d\max}^*$, $i_{d\min}^*$ – максимальные и минимальные мгновенные значения кривой тока нагрузки;

$I_{d(0)}^*$ – постоянная составляющая тока нагрузки.

Перейдем к рассмотрению аномального режима работы для второго случая, когда α_1 изменяется в пределах $\alpha_1 = 0 \dots 100^\circ$ при постоянном значении углов управления $\alpha_{2\dots 6} = 30^\circ$.

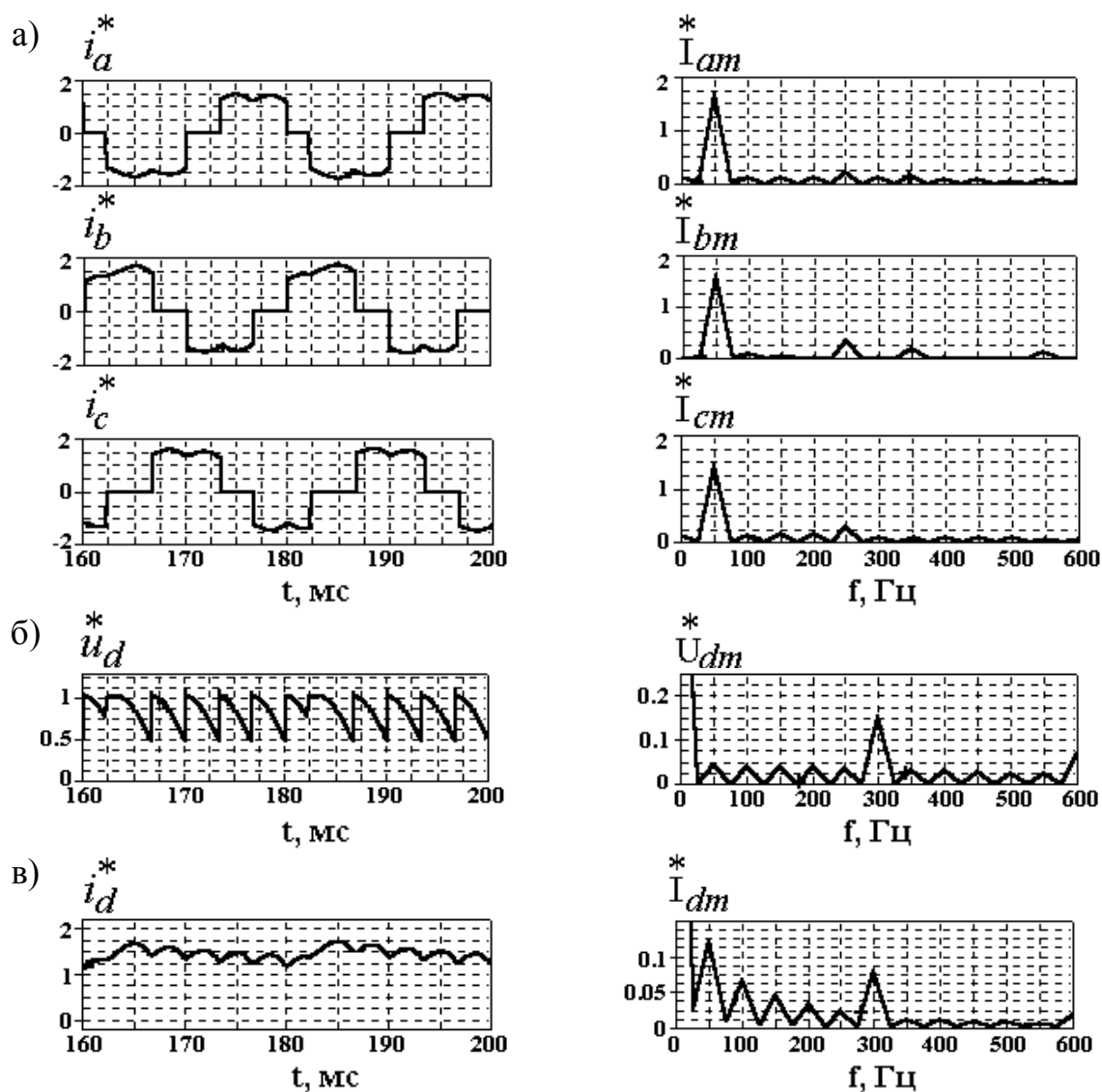


Рис.4.30. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2\dots 6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 10^\circ$:
а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

Расчетные кривые токов и напряжения и спектры их гармоник для такого режима выпрямителя приведены в качестве примера на рис.4.30, 4.31. В данном случае значение E_d задавалось таким, чтобы ток нагрузки при нормальном режиме работы равнялся номинальному значению. По расчетным данным были построены зависимости амплитуд первых гармоник и действующих значений фазных токов от угла α_1 (рис.4.32). При рассмотрении приведенных на рис.4.32 зависимостей видно, что в пределах изменения угла $0^\circ \leq \alpha_1 < 30^\circ$ амплитуда первой гармоники и действующее значение тока фазы, подключенной к ветви с отклонением от нормальной работы, выше значений тока других фаз. Это говорит о том, что выявление ветви с нарушением в работе можно проводить по максимальным значениям амплитуды первой гармоники или действующего значения тока фазы.

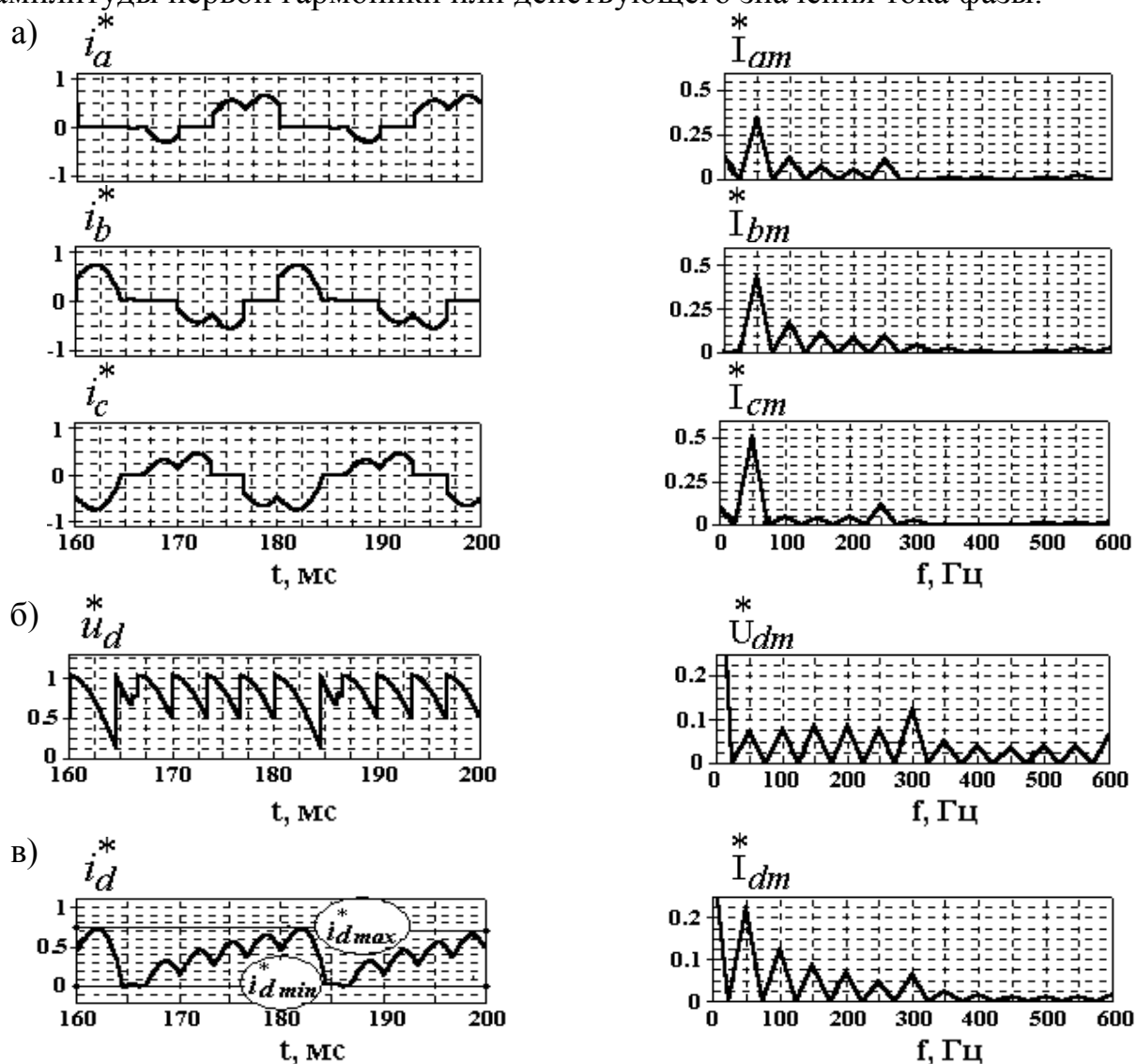


Рис.4.31. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 60^\circ$:
а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

В диапазоне изменения $30^0 < \alpha_1 \leq 100^0$ наблюдается обратная картина. Ток фазы, подключенной к ветви с отклонением от нормальной работы, имеет наименьшее значение амплитуды первой гармоники и действующего значения. Таким образом, при $\alpha_1 > 30^0$ диагностическим признаком является наименьшее значение амплитуды первой гармоники или действующего значения тока фазы.

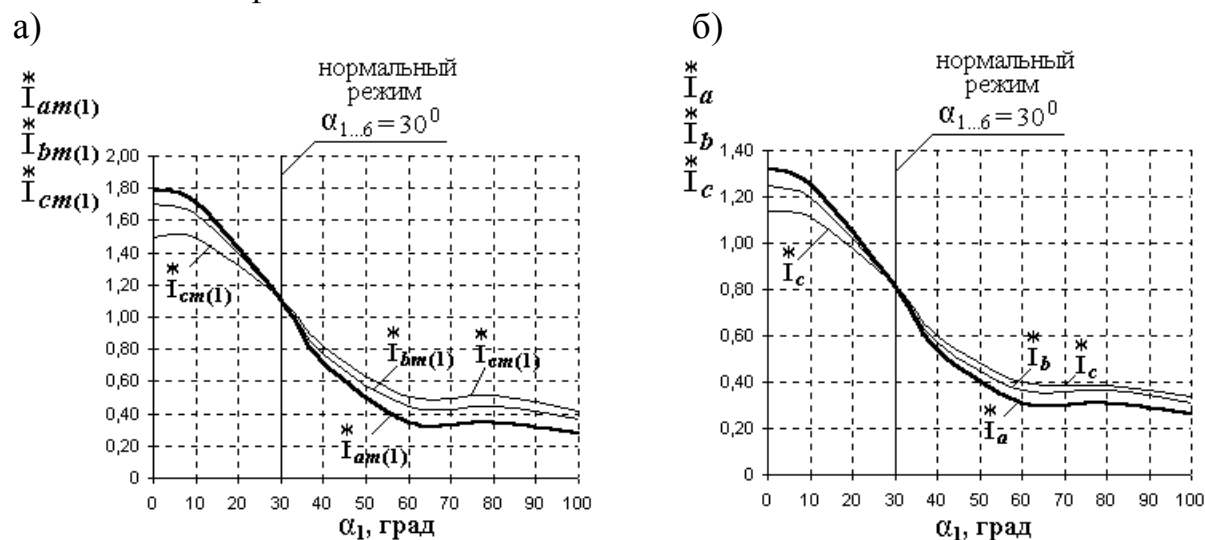


Рис.4.32. Зависимости амплитуд первой гармоники фазных токов (а) и их действующих значений (б) от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^0$

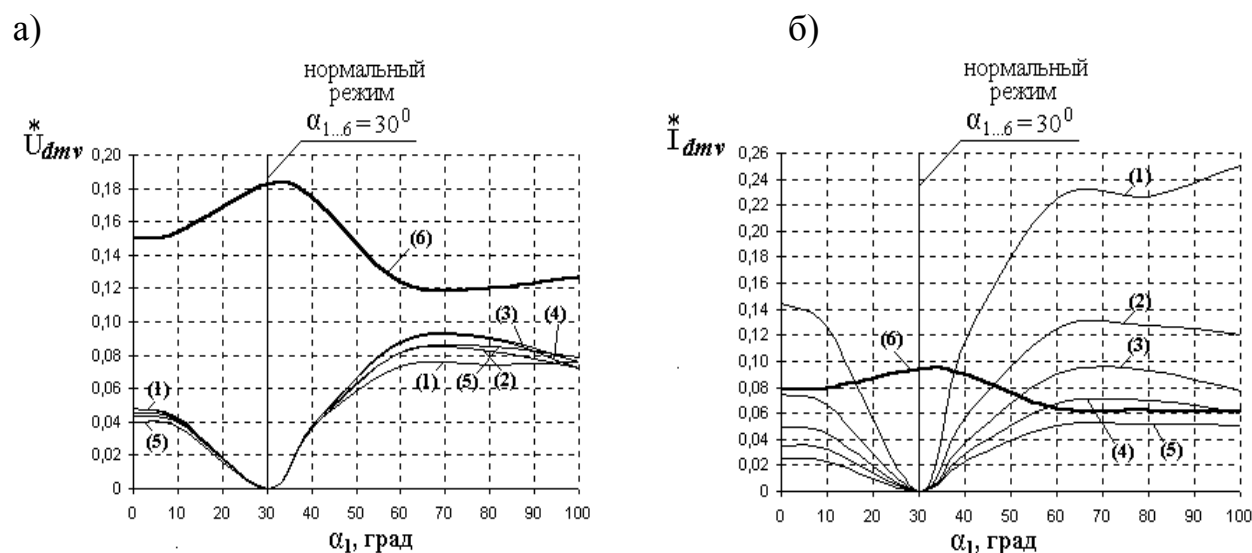


Рис.4.33. Зависимости амплитуд гармоник кривых выходного напряжения (а) и тока нагрузки (б) от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^0$

Следует отметить, что выявленные характеристические признаки позволяют определить ветвь моста, в которой произошло отклонение от нормальной работы. Для указания конкретного плеча с аномальной работой следует использовать способ совместного анализа кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения, который был изложен в гл.1. Подробное рассмотрение такого способа будет показано ниже на конкретном примере.

Для анализа гармонического состава тока и напряжения выпрямителя при таком виде аномального режима его работы были построены зависимости амплитуд гармоник выходного напряжения (рис.4.33 а) и тока нагрузки (рис.4.33 б) от изменения угла аномального импульса α_1 .

Их рассмотрение показывает, что любое отклонение угла аномального импульса α_1 от заданного, в данном случае равного $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, приводит к появлению дополнительно к 6-й гармонике новых гармоник – 1-й, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й. Зависимость их амплитуд от угла α_1 имеет V – образный характер. При нормальном режиме, когда $\alpha_{1...6} = 30^\circ$, их амплитуды равны нулю.

Генерирование высших гармоник аномальным импульсом α_1 заметно сказывается на уровне пульсаций тока нагрузки. Это наглядно показывает зависимость пульсаций тока от угла аномального импульса включения - $\sigma = f(\alpha_1)$, приведенная на рис.4.34, где

$$\sigma = (i_{d\max}^* - i_{d\min}^*) / \bar{I}_d^*,$$

где $i_{d\max}^*$, $i_{d\min}^*$ - максимальные и минимальные мгновенные значения кривой тока нагрузки (см. рис.4.31 в).

При нормальном режиме ($\alpha_{1...6} = 30^\circ$) уровень пульсаций составляет 0,25 от среднего значения тока. При $\alpha_1 > 50^\circ$ наступает прерывистый режим тока нагрузки (рис.4.31в). При этом пульсации тока превышают среднее значение в 1,4 раза.

Особого внимания заслуживает рассмотрение зависимостей средних значений (нулевых гармоник) тока

нагрузки I_{dm}^* и напряжения U_{dm}^*

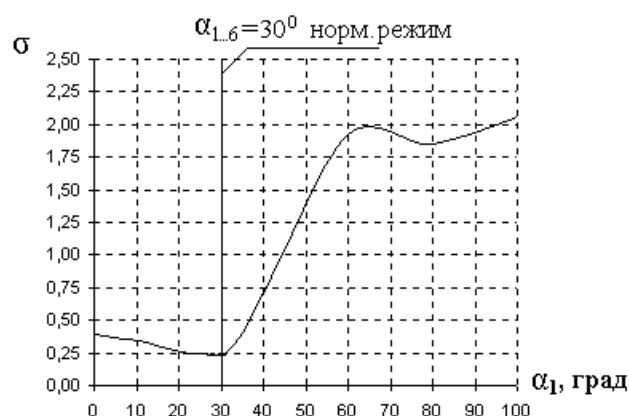


Рис.4.34. Зависимость пульсаций тока нагрузки от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$

от изменения угла α_1 в области $0 < \alpha_1 < 30^\circ$ при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ (см. рис.4.35а). Зависимости постоянных составляющих (нулевых гармоник) фазных токов

сети $I_{am(0)}$, $I_{bm(0)}$ и $I_{cm(0)}$ от угла α_1 приведены на рис.4.35б.

Из рассмотрения зависимостей (рис.4.35 а) следует, что в области значений $\alpha_1 = 0...20^\circ$ при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ постоянная составляющая тока

нагрузки $I_{dm(0)}$ превышает номинальное значение тока выпрямителя в

1,2...1,55 раза. Так, например, при $\alpha_1 = 10^\circ$ значение тока нагрузки $I_{dm(0)}$ превышает номинальное значение в 1,46 раза. Это может привести к выходу из строя тиристоров в случае отсутствия обратной связи по току. При наличии таковой постоянная времени ее отработки должна быть меньше значения постоянной времени нагрева тиристора до допустимой величины.

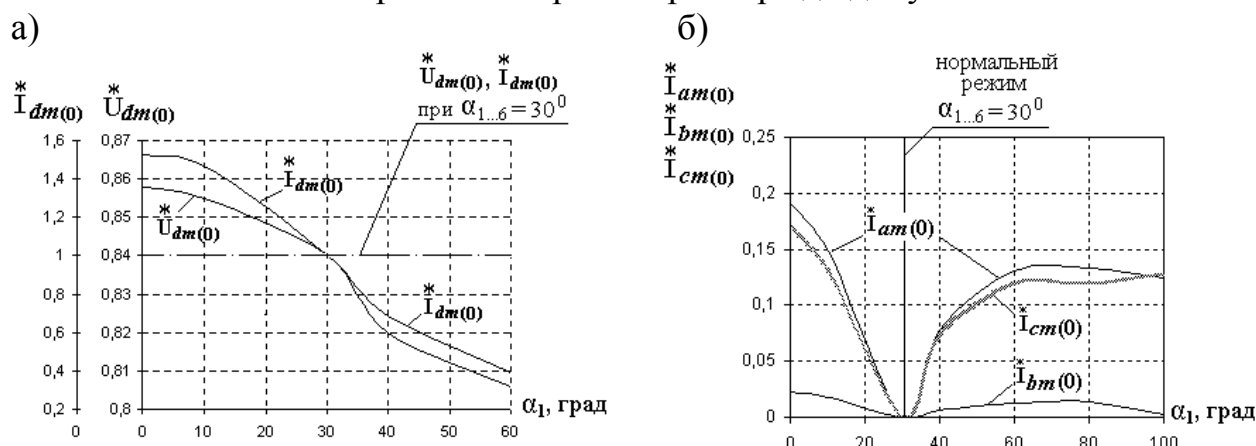


Рис.4.35. Зависимости нулевых гармоник кривых выходного напряжения и выпрямленного тока (а) и кривых фазных токов (б) от угла аномального импульса включения тиристора Т1 α_1 , при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$ для управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС

Зависимости, представленные на рис.4.35 б, показывают, что аномальный импульс с углом управления тиристора Т1 α_1 приводит к появлению постоянной составляющей в фазных токах питающей сети и, как следствие, к подмагничиванию силового трансформатора и трансформаторов тока. Из рассмотрения зависимостей (рис.4.35 б) также следует, что с увеличением отклонения значений α_1 от нормальных постоянная составляющая токов увеличивается.

4.2.3. Аномальные режимы работы выпрямителя при асимметрии импульсов управления в двух и более плечах моста выпрямителя

Выше были рассмотрены аномальные режимы при отклонении лишь одного аномального импульса от заданных значений углов управления

выпрямителем. При этом была показана возможность диагностирования ветви моста сравнением амплитуд первых гармоник фазных токов.

Исследование аномальных режимов при асимметрии импульсов управления в двух и более плечах выпрямителя показало, что рассмотренные выше способы диагностики для данного случая практически не применимы. Для выявления характеристических признаков при таком виде аномальных режимов работы необходимо использовать способ диагностики, основанный на совместном анализе кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения [11]. Сущность такого способа изложена в главе 1. Рассмотрим возможность использования такого способа диагностики на конкретном примере, когда на тиристоры Т2, Т3, Т4, Т6 подаются заданные устройством управления импульсы с углами управления $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6 = 30^\circ$, на тиристор Т1 – аномальный импульс, вызванный, например, коммутационными процессами, с углом управления $\alpha_1 = 15^\circ$, на тиристор Т5 – импульс с углом управления $\alpha_5 = 45^\circ$, отличающийся от заданного значения из-за сбоя в работе устройства управления.

На рис.4.36 приведены кривые токов и напряжения и спектры их гармоник для такого вида аномального режима. Их расчет проводился в соответствии с эквивалентной схемой выпрямителя, представленной на рис.4.18 при замкнутых ключах К1, К2, К3.

Из рассмотрения кривых мгновенных значений фазных токов (рис.4.36а) и амплитуд гармоник следует, что выявление конкретной ветви и плеча с аномальными отклонениями в работе путем сравнения амплитуд первых гармоник кривых токов невозможно. Для рассмотрения способа диагностики, основанного на совместном анализе мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения обратимся к рис.4.37, на котором приведены те же кривые, что и на рис.4.36 а, б, но в другом масштабе и угловых единицах.

Из представленных на рис.4.36, 4.37 кривых конкретно известны лишь фазные токи и их направления. Пульсации выходного напряжения неизвестны. Их следует определить, поскольку только в таком случае можно выявить угол управления конкретного плеча моста выпрямителя, следовательно, провести диагностику преобразователя.

Проведем совместный анализ кривых токов и напряжения на отрезке времени $u = u_0 \div u_6$ (рис.4.37). В промежутке времени $u_0 \div u_1$ ток фазы “а” равен нулю, ток фазы “b” имеет условное положительное направление, следовательно, направлен от точки b' к точке b (рис.4.18). Ток фазы “с” имеет отрицательный импульс и направлен от точки c к точке c' . Такое протекание токов i_b, i_c возможно лишь под воздействием линейного напряжения u_{cb} по цепи $c - c' - T5 - R - L - Ed - T2 - b' - b$ через тиристоры Т5 и Т2.

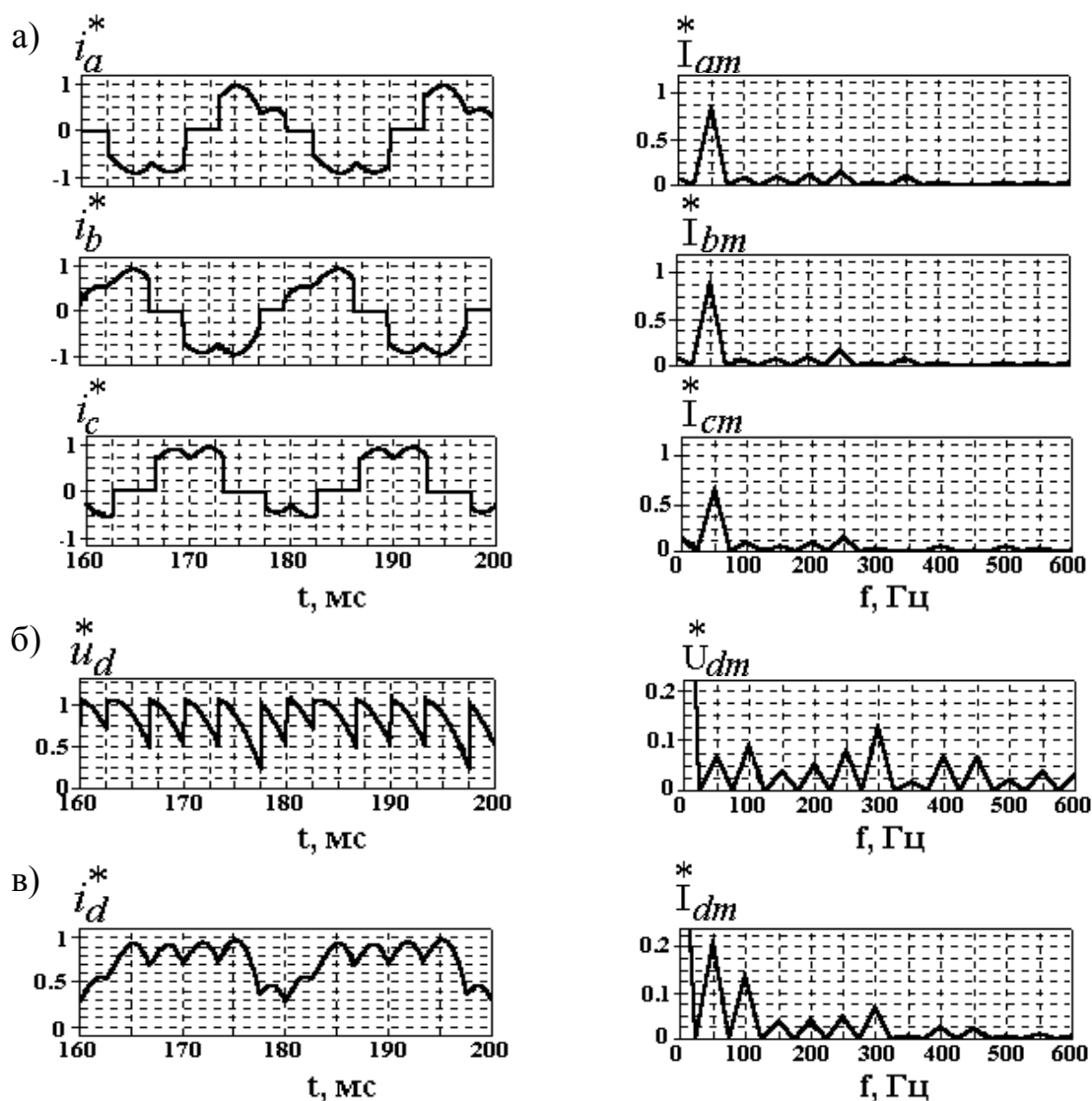


Рис.4.36. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2,3,4,6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 15^\circ$, $\alpha_5 = 45^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

В промежутке времени $u_1 - u_2$ ток фазы “с” равен нулю, ток фазы “а” имеет отрицательное направление, ток фазы “б” – положительное. А это означает, что ток под воздействием линейного напряжения u_{ab} протекает по цепи а - а' - Т1 - R - L - Ed - Т2 - б' - б через тиристоры Т1, Т2. Следовательно, угол α_1 является углом включения тиристора Т1. В промежутке времени $u_2 - u_3$ ток фазы “б” равен нулю, ток фазы “с” имеет положительное направление, ток фазы “а” – отрицательное. Под воздействием линейного напряжения u_{ac} ток будет протекать по цепи а - а' - Т1 - R - L - Ed - Т4 - с' - с через тиристоры Т1 и Т4. Следовательно, угол α_4 является углом включения тиристора Т4.

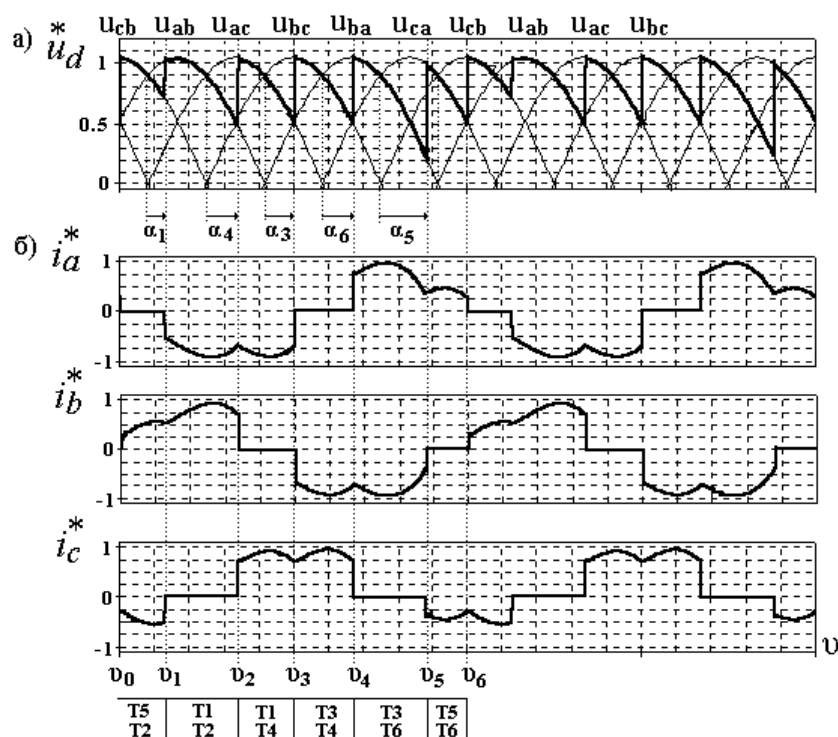


Рис.4.37. Кривые выходного напряжения (а) и фазных токов сети (б) трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС при асимметрии углов управления: $\alpha_{2,4,3,6} = 30^\circ$ и $\alpha_1 = 15^\circ$, $\alpha_5 = 45^\circ$

На участке времени $v_3 - v_4$: $i_a = 0$, i_b – отрицательное, i_c – положительное направление. Под воздействием напряжения u_{bc} ток протекает по цепи b - b' - T3 - R - L - Ed - T4 - c' - c. Включены тиристоры T3, T4. Угол α_3 является углом включения тиристора T3.

На участке времени $v_4 - v_5$: $i_c = 0$; $i_b < 0$, $i_a > 0$. Под воздействием напряжения u_{ba} ток протекает по цепи b - b' - T3 - R - L - Ed - T6 - a' - a через вентили T3, T6. Угол α_6 является углом включения тиристора T6.

На участке времени $v_5 - v_6$: $i_b = 0$; $i_c < 0$, $i_a > 0$. Под воздействием напряжения u_{ca} ток протекает по цепи c - c' - T5 - R - L - Ed - T6 - a' - a. При этом включены тиристоры T5, T6. Угол α_5 является углом включения тиристора T5.

Таким образом были определены углы включения всех тириستоров моста. Визуальная оценка углов включения позволяет оценить их значения. В рассматриваемом случае нетрудно сделать вывод, что $\alpha_1 < \alpha_{2,3,4,6} < \alpha_5$. При этом $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_6$ соответствуют заданным значениям углов управления, углы управления α_1 , α_5 являются аномальными.

Рассмотренный способ диагностики позволяет определить конкретно все плечи моста при любом числе аномальных импульсов.

4.2.4. Влияния замкнутой системы автоматического регулирования электроприводом постоянного тока на характеристические признаки диагностики выпрямителя

Выше были рассмотрены вопросы диагностики выпрямителей в разомкнутых системах электропривода постоянного тока. На практике в автоматизированных электроприводах постоянного тока, как правило, применяют замкнутые системы автоматического регулирования по току и скорости. Наличие обратной связи приводит к восстановлению заданного значения тока нагрузки при его изменении из-за возникновения аномального режима работы путем регулирования угла управления тиристорами моста выпрямителя.

Допустимость применения разработанных способов диагностики в замкнутых системах рассмотрим на примере аномального режима, обусловленного выходом из строя тиристора Т1 при заданных значениях углов управления $\alpha_{1...6} = 30^\circ$.

Нормальному режиму работы выпрямителя соответствуют приведенные на рис.4.20 кривые токов и напряжения. Аномальному режиму, вызванному отказом в работе тиристора Т1, соответствуют кривые, приведенные на рис.4.22.

Как показали расчетные данные параметров выпрямителя при выходе из строя тиристора Т1, среднее значение тока нагрузки (нулевая гармоника -

*

$I_{dm(0)}$) снизилось по сравнению с номинальным значением тока

*

$I_{dm(0)} = 1,005$ практически в три раза и составляет при аномальном режиме

*

при отсутствии обратной связи $I_{dm(0)} = 0,274$. Восстановление заданного номинального значения тока при наличии обратной связи возможно согласно расчетным данным изменением угла управления тиристорами Т2....Т6 до значения $\alpha_{2...6} = 0^\circ$.

При этом ток нагрузки принимает значение, близкое к номинальному,

*

и составит $I_{dm(0)} = 0,982$.

Сравнивая кривые фазных токов (рис.4.22 а) и амплитуды их первых гармоник и действующих значений при отсутствии обратной связи с аналогичными параметрами и её наличии (см. рис.4.38) нетрудно заметить, что принципиальных отличий в них нет.

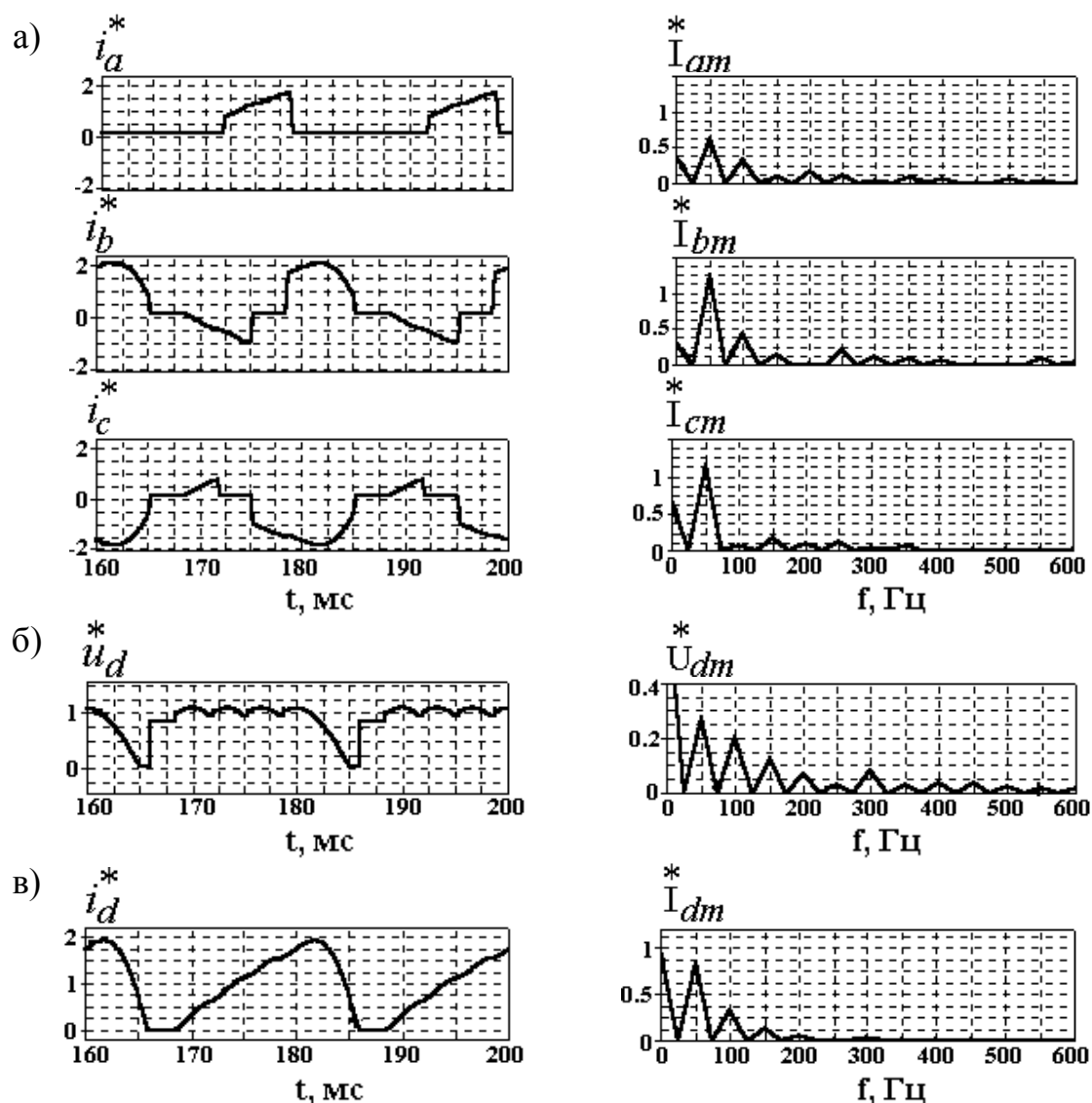


Рис.4.38. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС при наличии обратной связи. Отказ в работе плеча моста с тиристором Т1 при $\alpha_{1...6} = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

В обоих случаях амплитуды первых гармоник и действующих значений тока фазы “а”, примыкающей к ветви моста с вышедшим из строя плечом, имеют наименьшие значения по сравнению с параметрами других токов. Импульсы токов фазы “а” (рис.4.22 а, 4.38 а) имеют положительное значение, что говорит об отказе в работе плеча с тиристором Т1.

Таким образом, при наличии обратной связи по току могут быть использованы те же характеристические признаки, что и при её отсутствии.

4.3. Аномальные режимы трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на против-ЭДС при прерывистом токе

Расчет кривых токов, напряжения и спектров их гармоник при нормальном и аномальном режимах выпрямителя проводился по той же эквивалентной схеме, что и для непрерывного тока (рис.4.18). Целью данных исследований было показать возможность применения разработанных способов диагностики для таких режимов работы преобразователя. Режим прерывистого тока выпрямителя задавался изменением значений против-ЭДС. Аномальный режим рассматривался на примере двух случаев нарушения в работе плеча катодной группы вентилей с тиристором Т1.

В первом случае при заданном значении углов управления тиристорами Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, равных $\alpha_{2...6} = 30^0$, не происходило включение Т1. Такому аномальному режиму соответствует схема, представленная на рис.4.18, при разомкнутом ключе К1.

Во втором случае аномального режима при $\alpha_{2...6} = 30^0$ угол включения тиристора Т1 составлял $\alpha_1 = 0^0$. При таком нарушении работы в расчетной схеме (рис.4.18) все ключи замкнуты.

Для сравнения с аномальными случаями на рис.4.39 приведены расчетные кривые токов и напряжения и спектры их гармоник для нормального прерывистого режима работы выпрямителя с нагрузкой на против-ЭДС при $\alpha_{1...6} = 30^0$. На рис.4.40 приведены расчетные кривые токов и напряжений для первого случая аномального режима.

Из их рассмотрения следует, что все характеристические признаки диагностики, выявленные для аналогичного режима при непрерывном токе (рис.4.20) справедливы и для случая прерывистых токов. Действительно, признак наименьшей амплитуды первой гармоники тока фазы, примыкающей к неисправной ветви, соблюдается. Также соблюдается признак однополярного положительного импульса аномального тока фазы, позволяющий определить конкретное плечо моста с нарушением нормальной его работы.

Таким образом, второй способ диагностики, основанный на использовании кривых фазных токов, в данном случае применим.

Рассмотрим аномальный режим, связанный с асимметрией импульсов управления. На рис.4.41 приведены расчетные кривые фазных токов и выходного напряжения и спектры их гармоник при $\alpha_{2...6} = 30^0$, $\alpha_1 = 0^0$.

Их рассмотрение показывает, что выявление конкретного места неисправности с помощью способа диагностики наименьшей или наибольшей амплитуды первой гармоники аномального тока фазы в данном случае не применимо.

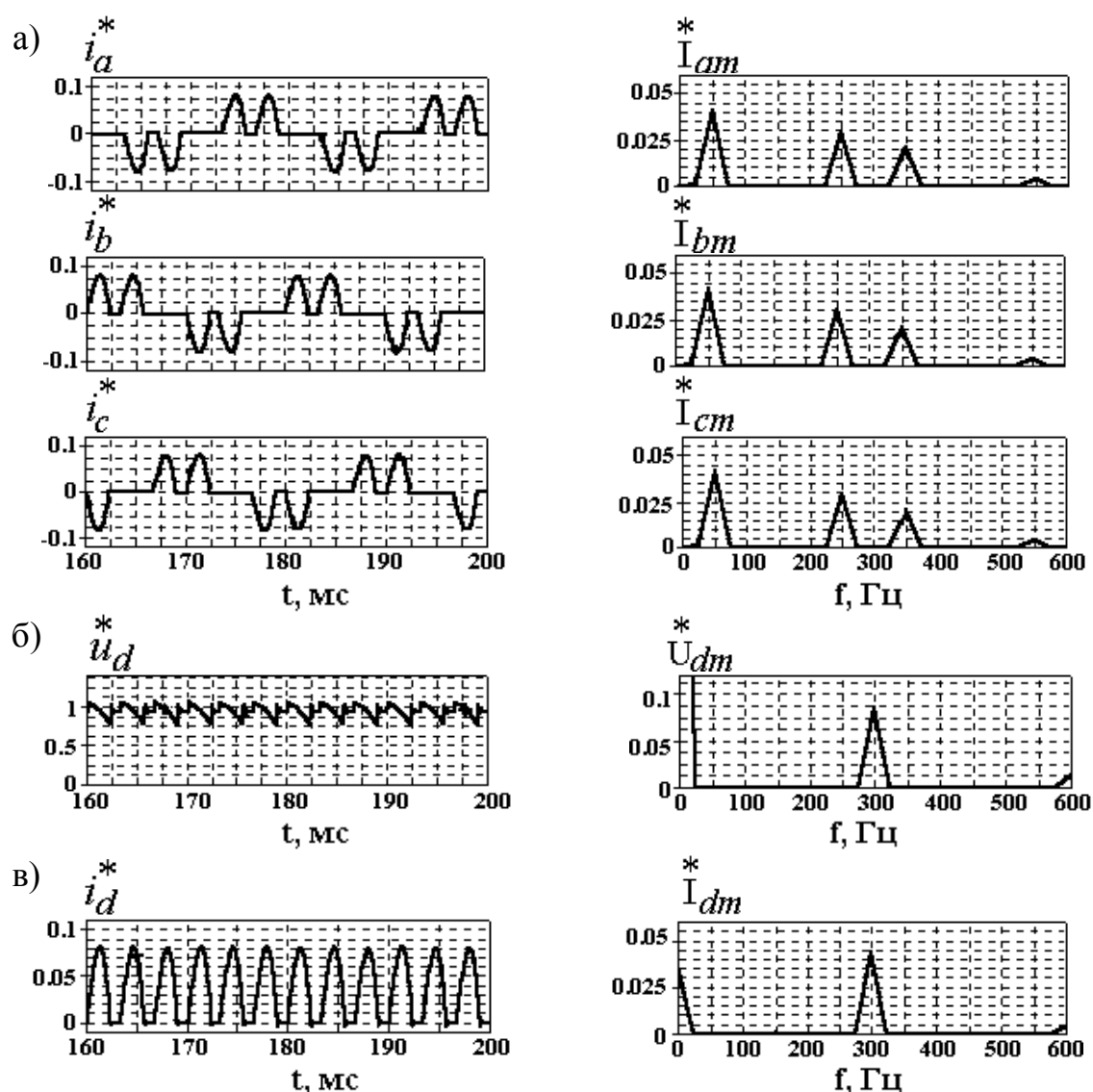


Рис.4.39. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС. Нормальный прерывистый режим работы при $\alpha_{1...6} = 30^\circ$:
а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

Воспользуемся универсальным способом диагностики для такого вида аномального режима при прерывистом токе нагрузки выпрямителя. Как отмечалось в гл.1, такой способ основан на совместном анализе кривых фазных токов и выходного напряжения.

Выявление характеристических признаков проведем, используя кривые токов и напряжения, приведенные на рис.4.42, в другом масштабе.

Визуальная оценка кривой выходного напряжения, приведенной на рис.4.42 а, говорит об асимметрии импульсов управления. Форма пульсаций напряжения в промежутке времени $t_1 - t_2$ имеет один вид, на отрезке времени $t_2 - t_3$ – другой. Анализ начнем с промежутка времени $t_1 - t_2$. Согласно принятым условным направлениям, ток фазы “а” равен нулю, ток фазы “b” – положителен и направлен от точки b' к точке b , ток фазы “с”

отрицателен и направлен от точки c к точке c' (рис.4.18). Отсюда следует, что под воздействием напряжения u_{cb} ток выпрямителя протекает через тиристоры T5 и T2. При этом следует отметить, что время t_1 является моментом включения тиристора T2 и соответствует углу управления тиристора T2 α_2 . Его значение, как видно по кривой выпрямленного напряжения, больше нуля.

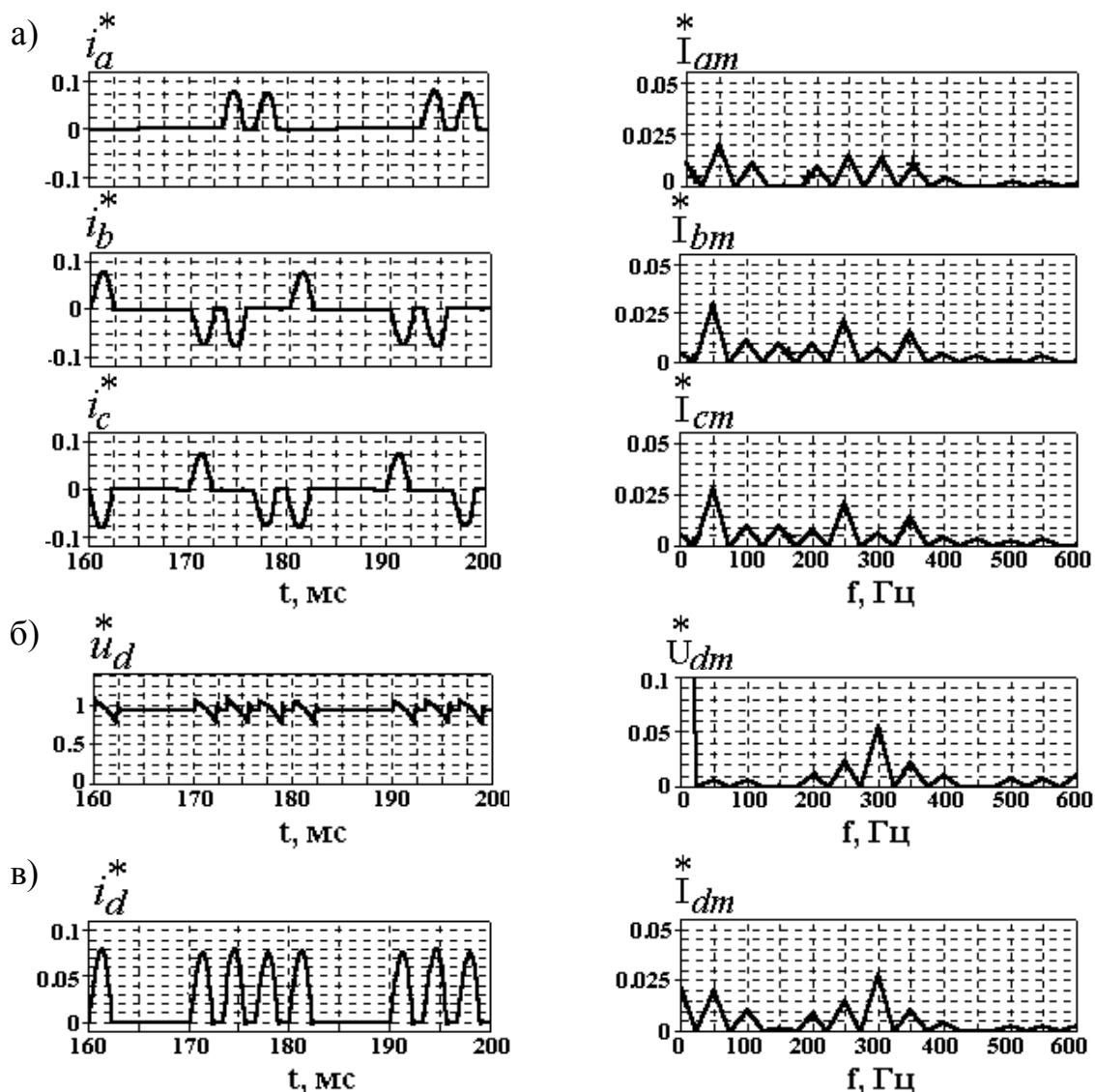


Рис.4.40. Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС с прерывистым током. Отказ в работе плеча моста с T1 при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

В промежутке времени $t_2 - t_3$ ток фазы “а” имеет отрицательное направление и направлен от a к a' , фазы “б” – положительное и направлен от b' к b , ток фазы “с” равен нулю (рис.4.18). Это означает, что ток выпрямителя под воздействием напряжения u_{ab} протекает через тиристоры T1 и T2. При этом время t_2 соответствует углу включения тиристора T1. По кривой

выходного напряжения (рис.4.42 а) видно, что значение угла включения тиристора Т1 составляет $\alpha_1 = 0^0$.

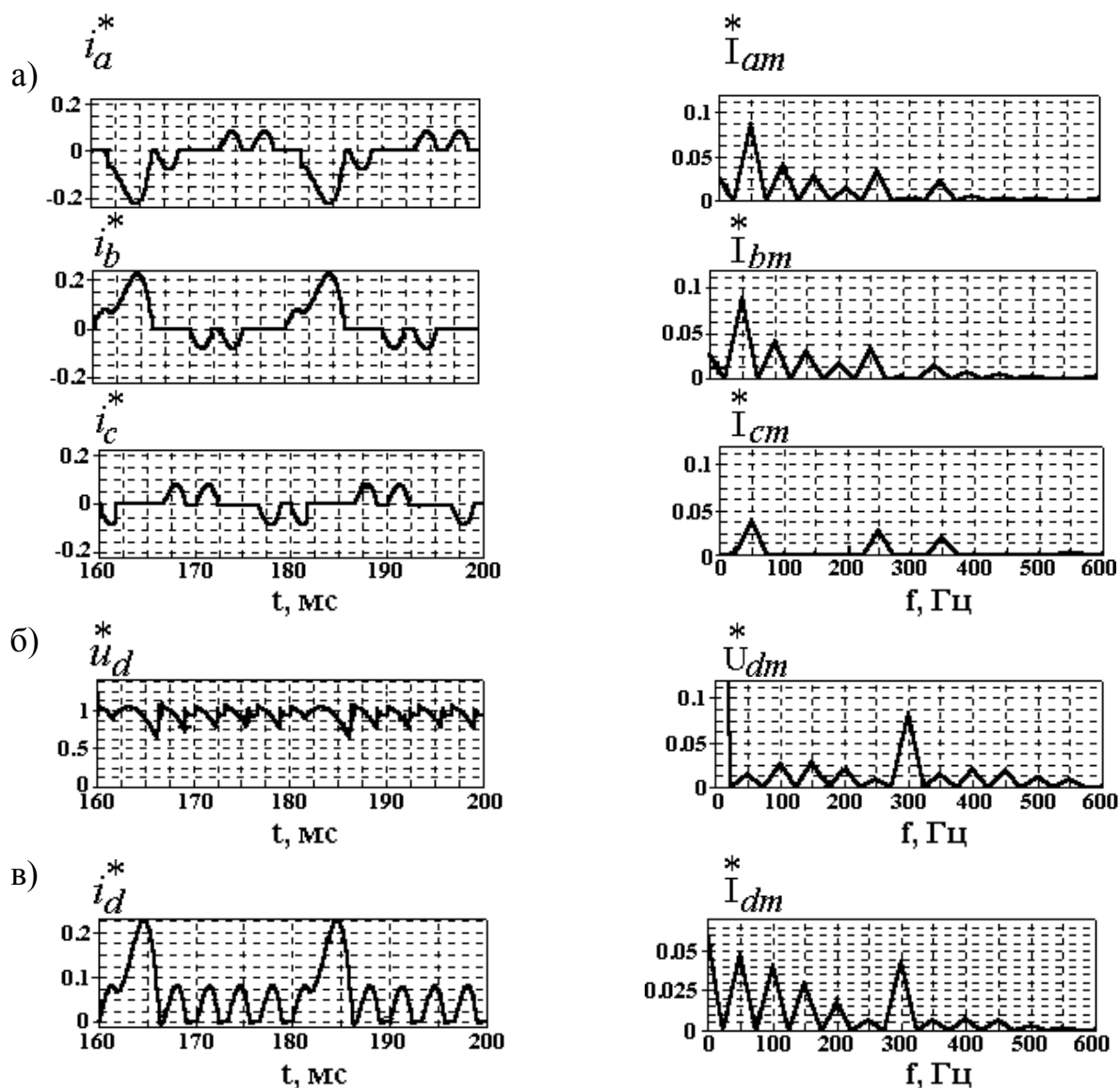


Рис.4.41. Управляемый выпрямитель с нагрузкой на противо-ЭДС с прерывистым током. Асимметрия импульсов управления $\alpha_{2...6} = 30^0$, $\alpha_1 = 0^0$: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – выпрямленное напряжение и спектр его гармоник; в – выпрямленный ток и спектр его гармоник

В промежутке времени $t_3 - t_4$ ток фазы “а” отрицателен и направлен от a к a' , ток фазы “б” равен нулю, ток фазы “с” положителен и направлен от c' к c (рис.4.18). При таких значениях и направлениях фазных токов ток выпрямителя будет протекать под воздействием линейного напряжения u_{ac} по цепи $a - a' - T1 - R - L - Ed - T4 - c' - c$.

Момент времени t_3 соответствует углу включения тиристора Т4 α_4 . Из сравнения углов α_1 и α_4 заметно неравенство $\alpha_1 < \alpha_4$.

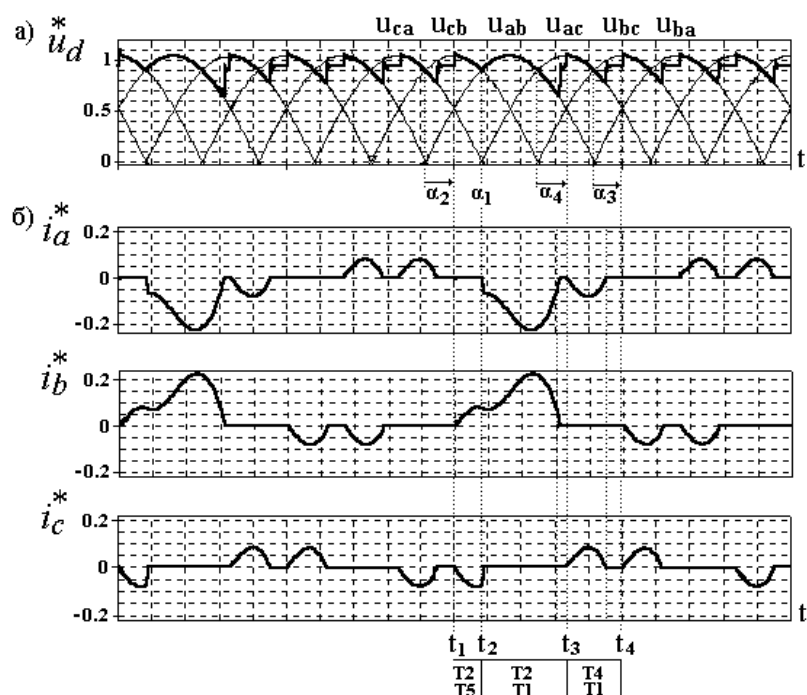


Рис.4.42. Кривые мгновенных значений токов и напряжения управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС в прерывистом режиме токов при $\alpha_{2...6} = 30^\circ$, $\alpha_1 = 0^\circ$: а – выходное напряжение; б – фазные токи

Принципиально по значениям моментов времени включения тиристоров достаточно точно могут быть определены соответствующие углы их включения, а, следовательно, выявлены их отклонения от нормальных заданных значений.

Рассмотренный анализ кривых позволяет сделать вывод о допустимости использования универсального способа диагностики при аномальных режимах работы выпрямителей с нагрузкой на противо-ЭДС с прерывистым током.

Такой же вывод можно сделать о применении первого способа при общей оценке работоспособности выпрямителя, сравнивая спектры гармоник выходного напряжения при нормальном и аномальных режимах.

Выводы

Исследование аномальных режимов работы выпрямителей трехфазного тока позволило выявить ряд особенностей протекающих в них электромагнитных процессов и определить характеристические признаки, на основании которых может быть осуществлена диагностика преобразователей. Основными из них являются:

1. Любое отклонение от нормальной работы выпрямителей (отказ в работе одного или нескольких плеч моста, асимметрия импульсов управления и т.п.) приводит к изменению гармонического состава выходного напряжения. Данный характеристический признак даёт возможность

установить наличие отклонения от нормальной работы выпрямителя без указания конкретного места неисправности в мосту.

2. Характеристическим признаком полного отказа в работе плеча моста выпрямителя при непрерывном токе любого вида нагрузки (RL-нагрузка, противо-ЭДС) и одновременного отказа в работе двух плеч моста анодной и катодной групп вентилей при активно-индуктивной нагрузке является уменьшение амплитуды первой гармоники тока фазы, примыкающей к соответствующей ветви, по сравнению с аналогичными амплитудами токов других фаз. Характеристическим признаком отказа в работе конкретного плеча при этом служит полярность импульса тока фазы: положительное его значение, совпадающее с условным положительным направлением, соответствует отказу в работе плеча катодной группы вентилей, отрицательное – анодной.

3. При аномальном режиме полууправляемого и управляемого выпрямителей, независимо от вида нагрузки, характеризующимся асимметрией одного аномального импульса по отношению к остальным заданным импульсам управления, характеристическим признаком диагностики является наибольшая амплитуда первой гармоники тока фазы при углах аномального импульса ниже заданных значений углов управления и наименьшая амплитуда первой гармоники тока фазы при значениях углов аномального импульса, превышающих заданные значения углов управления. При таком виде аномальных режимов по отличию первой гармоники тока одной фазы от аналогичных значений амплитуд токов других фаз можно определить лишь ветвь моста с отклонением от нормальной работы. Конкретное плечо в ветви с отклонением от нормальной работы может быть выявлено путем совместного анализа кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения.

4. При аномальном режиме работы, связанном с одновременным отказом в работе плеч анодной и катодной групп моста управляемого выпрямителя при углах управления $\alpha = 0^0$ возникают режимы рекуперации и полууправляемого выпрямителя. В неуправляемом выпрямителе при таких нарушениях в работе в отдельные моменты времени возникают процессы, присущие управляемому выпрямителю с шунтирующим диодом.

5. Исследование аномальных режимов работы с нагрузкой на противо-ЭДС при непрерывном токе показало, что при включении одного плеча моста аномальным импульсом с углом отпирания тиристора, не превышающим нормальные значения углов управления тиристорами остальных плеч, среднее значение тока может превышать номинальные значения в 1,1...1,5 раза при одновременном повышении его пульсаций.

6. Отклонение угла аномального импульса включения тиристора одного плеча от нормальных значений углов включения тириستоров остальных плеч моста приводит к появлению постоянной составляющей в фазных токах сети.

7. При асимметрии импульсов управления в двух и более плечах моста управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС и непрерывном токе осуществление диагностики возможно с использованием способа, основанного на совместном анализе кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения.

8. Исследование аномальных режимов управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС при непрерывном токе с учетом обратной связи по току показало, что с её учетом могут быть использованы те же характеристические признаки, что и при её отсутствии.

9. Исследование аномальных режимов работы управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС с прерывистым током показало, что для диагностирования могут быть использованы те же способы диагностики, что и для непрерывного тока.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

5.1. Экспериментальная проверка расчетных данных компьютерного моделирования преобразователей и работы контрольно-диагностического комплекса

Проверка достоверности расчетных данных компьютерного моделирования предложенных способов диагностирования преобразователей и работы контрольно-диагностического комплекса проводилась на физическом макете неуправляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой. Принципиальная схема макета представлена на рис.5.1.

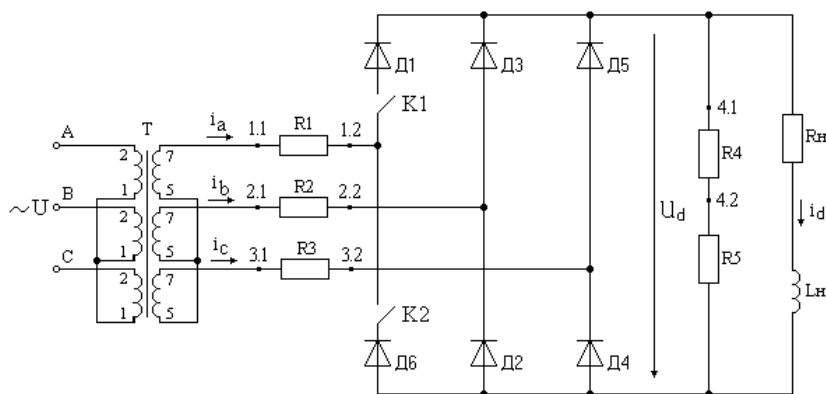


Рис.5.1. Принципиальная схема физического макета неуправляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой

На схеме приняты следующие обозначения: Т – трансформатор; Д1÷Д6 – вентили неуправляемого выпрямителя; R_n и L_n – активное и индуктивное сопротивления нагрузки; i_a , i_b , i_c – фазные токи питающей сети; U_d и i_d – выходное напряжение и ток нагрузки выпрямителя; R1, R2, R3 – шунты (датчик тока); R4 и R5 – делитель напряжения (датчик напряжения); 1.1-1.2, 2.1-2.2, 3.1-3.2, 4.1-4.2 – контрольные точки схемы для записи контролируемых сигналов; К1 и К2 – ключи для имитации отказа в работе плеч выпрямителя с диодами Д1 и Д6.

Одновременно для регистрации кривых фазных токов и получения спектра их гармоник использовался контрольно-диагностический комплекс (КДК)[10].

В процессе эксперимента для записи сигналов были использованы четыре измерительных входа КДК, подключенные к контрольным точкам схемы (рис.5.1).

5.1.1. Экспериментальные исследования нормальных режимов работы физического макета выпрямителя

Нормальному режиму работы физического макета неуправляемого выпрямителя соответствует его принципиальная схема (рис.5.1) при замкнутых ключах К1, К2.

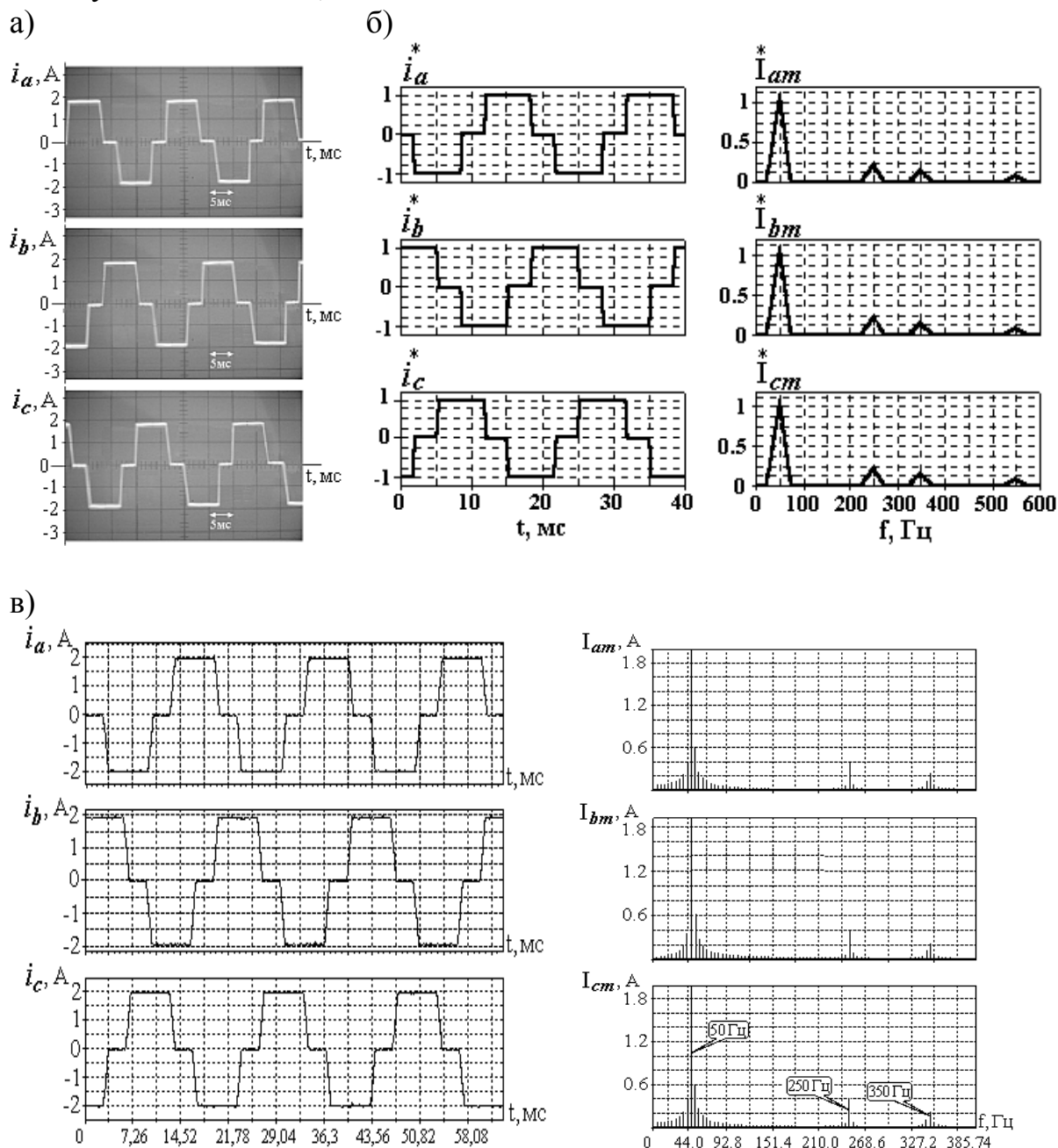


Рис.5.2. Кривые фазных токов и их спектры неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя с RL-нагрузкой при нормальном режиме работы:
 а – осциллограммы физического макета; б – расчетные кривые компьютерного моделирования; в – экспериментальные кривые контрольно-диагностического комплекса

На рис.5.2 а, 5.3 а приведены осциллограммы экспериментальных кривых фазных токов питающей сети i_a , i_b , i_c (рис.5.2 а) и выходного напряжения u_d (рис.5.3 а) выпрямителя при нормальном режиме работы.

Для сравнения на рис.5.2 б, 5.3 б представлены расчетные кривые фазных токов, выходного напряжения и спектры их гармоник, соответствующие нормальному режиму работы неуправляемого выпрямителя, расчетная схема которого приведена на рис.2.1.

Экспериментальные кривые фазных токов и выпрямленного напряжения и их спектры, записанные контрольно-диагностическим комплексом в контрольных точках физического макета выпрямителя, показаны на рис.5.2 в, 5.3 в.

В табл.5.1 отражен гармонический состав экспериментальных кривых фазных токов питающей сети (рис.5.2 в) и выходного напряжения (рис.5.3 в) физического макета выпрямителя, полученных с использованием программного обеспечения контрольно-диагностического комплекса.

На рис.5.2 а видно, что форма осциллограмм кривых фазных токов физического макета выпрямителя имеет такой же вид, как расчетные кривые фазных токов (рис.5.2 б) и экспериментальные кривые, записанные контрольно-диагностическим комплексом (рис.5.2 в). Спектральный состав осциллограмм фазных токов, полученных с помощью КДК (рис.5.2 в; табл.5.1), и расчетных кривых (рис.5.2 б; гл.2) также одинаков.

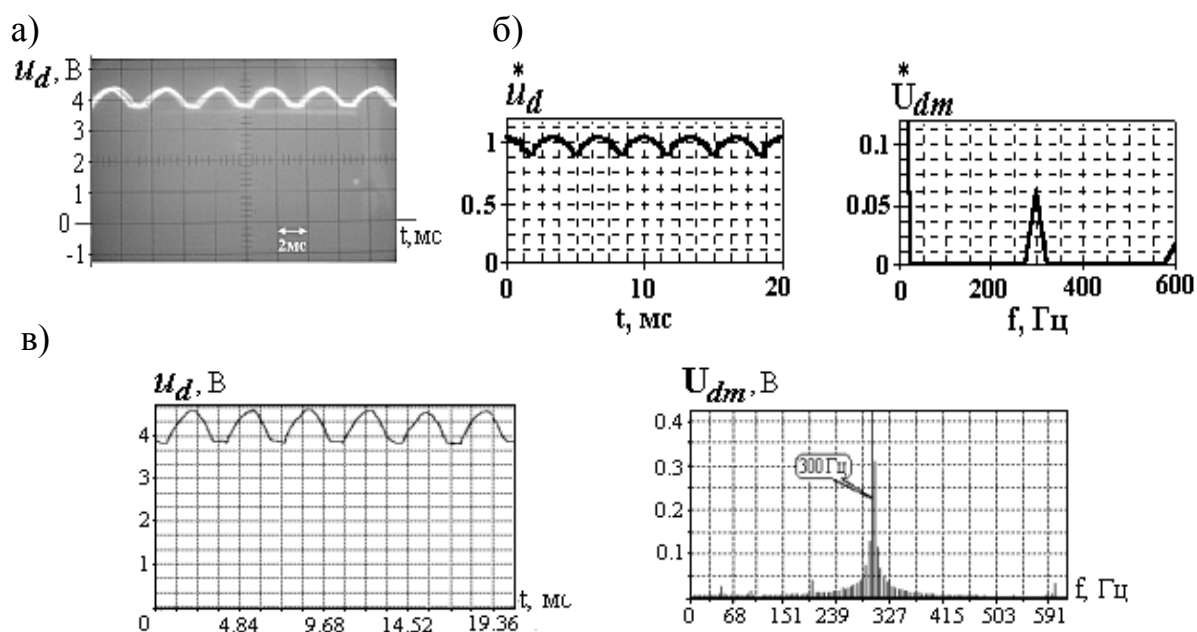


Рис.5.3. Кривая выходного напряжения и спектр её гармоник трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя с RL-нагрузкой при нормальном режиме работы: а – осциллограмма физического макета; б – расчетная кривая компьютерного моделирования; в – экспериментальная кривая контрольно-диагностического комплекса

Аналогичное совпадение спектрального состава кривых выходного напряжения выпрямителя подтверждается осциллограммой, приведенной на рис.5.3 а, расчетной кривой и её спектром (рис.5.3 б) и экспериментальной кривой, полученной с помощью КДК (рис.5.3 в).

Таблица 5.1

Физический макет неуправляемого выпрямителя с RL – нагрузкой.

Нормальный режим работы

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8
Ф а з а	а	I_{amv}, A	2,0	0	0	0	0,4	0	0,22	0
	б	I_{bm}, A	2,0	0	0	0	0,4	0	0,22	0
	с	I_{cm}, A	2,0	0	0	0	0,4	0	0,22	0
U_{dmv}, B			0	0	0	0	0	0,43	0	0

Таким образом, на основании сравнения осциллограмм, расчетных данных, а также данных, полученных с помощью контрольно-диагностического комплекса, можно сделать вывод о достоверности результатов компьютерного моделирования нормальных режимов выпрямителя и результатов проведенных экспериментальных исследований.

5.1.2. Экспериментальные исследования аномальных режимов работы физического макета выпрямителя

На базе физического макета неуправляемого выпрямителя, принципиальная схема которого представлена на рис.5.1, было проведено экспериментальное исследование двух аномальных режимов работы:

- 1) отказ в работе плеча моста катодной группы с диодом Д1 (ключ К1 разомкнут, К2 замкнут);
- 2) отказ в работе плеча моста анодной группы с диодом Д6 (ключ К2 разомкнут, К1 замкнут).

Осциллограммы экспериментальных кривых фазных токов выпрямителя при отказе плеча моста катодной группы вентилей с диодом Д1 приведены на рис.5.4 а. На рис.5.4 б приведены аналогичные кривые, полученные расчетным путем.

Экспериментальные кривые фазных токов и спектры их гармоник, записанные контрольно-диагностическим комплексом с физического макета при выходе из строя плеча моста с диодом Д1, приведены на рис.5.4 в.

На рис.5.5 представлены кривые выходного напряжения и спектры их гармоник, полученные аналогичным путём при аномальном режиме работы физического макета выпрямителя.

В табл.5.2 приведены численные значения амплитуд гармоник спектров экспериментальных токов и напряжений (рис.5.4 в, 5.5 в).

Сравнительный анализ осциллограмм токов и напряжения физического макета (рис.5.4 а, 5.5 а), расчетных кривых (рис.5.4 б, 5.5 б), а также кривых

контрольно-диагностического комплекса (рис.5.4 в, 5.5 в) показал полную их идентичность как по форме, так и по составу гармоник в аномальном режиме при отказе в работе плеча с диодом Д1. На основании чего можно сделать вывод о достоверности расчетных данных компьютерного моделирования и результатов экспериментального исследования данного вида аномального режима физического макета выпрямителя, полученных с помощью КДК.

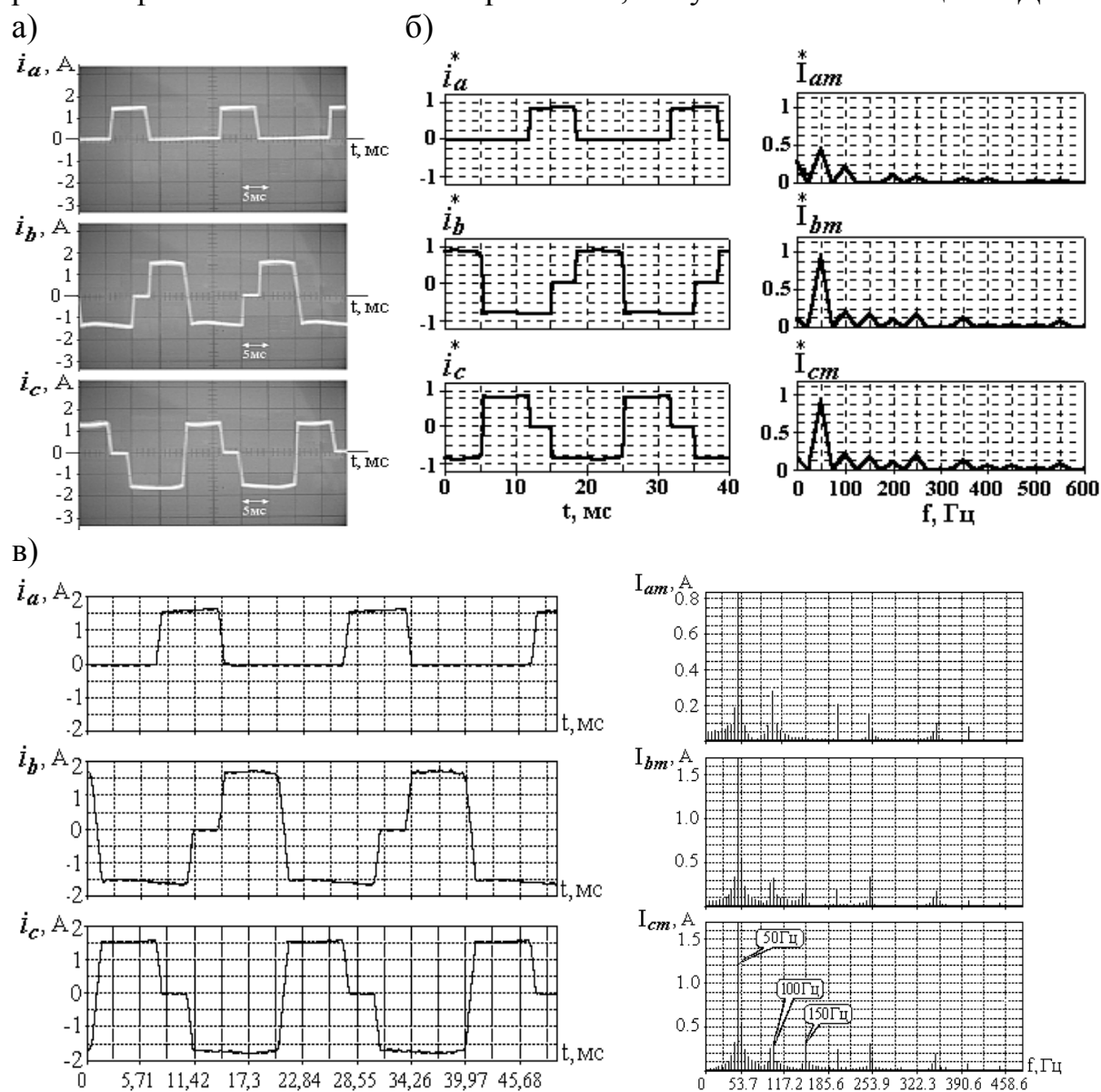


Рис.5.4. Кривые фазных токов и их спектры неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя с RL-нагрузкой при отказе в работе одного плеча моста катодной группы с диодом Д1: а – осциллограммы физического макета; б – расчетные кривые компьютерного моделирования; в – экспериментальные кривые контрольно-диагностического комплекса

Указанное убедительно подтверждают аналогичные осциллограммы и кривые токов, приведенные на рис.5.6, для случая выхода из строя плеча анодной группы вентилей выпрямителя с диодом Д6. Гармонический состав кривых КДК для такого вида аномального режима работы (рис.5.6 в) отражен в табл.5.3.

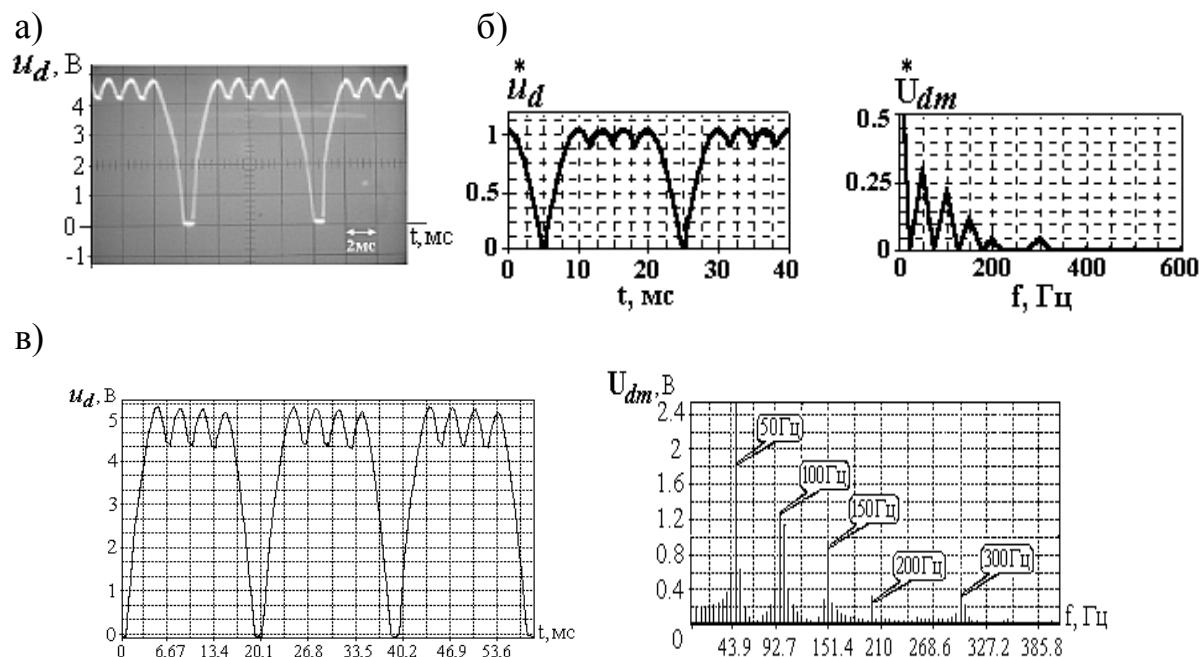


Рис.5.5. Кривая выходного напряжения и спектр её гармоник трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя с RL-нагрузкой при отказе в работе одного плеча моста катодной группы с диодом Д1: а – осциллограмма физического макета; б – расчетная кривая компьютерного моделирования; в – экспериментальная кривая контрольно-диагностического комплекса

Таблица 5.2

Физический макет неуправляемого выпрямителя с RL – нагрузкой.

Отказ в работе плеча моста катодной группы вентилей с диодом Д1

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8
Фаза	a	I_{amv}, A	0,83	0,28	0	0,21	0,15	0	0,10	0,08
	b	$I_{bm v}, A$	1,70	0,32	0,20	0,20	0,33	0	0,20	0,07
	c	$I_{cm v}, A$	1,70	0,31	0,30	0,25	0,30	0	0,20	0,09
U_{dmv}, B			2,45	1,25	0,99	0,35	0	0,40	0	0

Таблица 5.3

Физический макет неуправляемого выпрямителя с RL – нагрузкой.

Отказ в работе плеча моста анодной группы вентилей с диодом Д6

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8
Фаза	a	I_{amv}, A	0,8	0,30	0	0,24	0,05	0	0,17	0,11
	b	$I_{bm v}, A$	1,7	0,33	0,3	0,29	0,33	0	0,18	0,10
	c	$I_{cm v}, A$	1,7	0,38	0,3	0,31	0,30	0	0,20	0,10

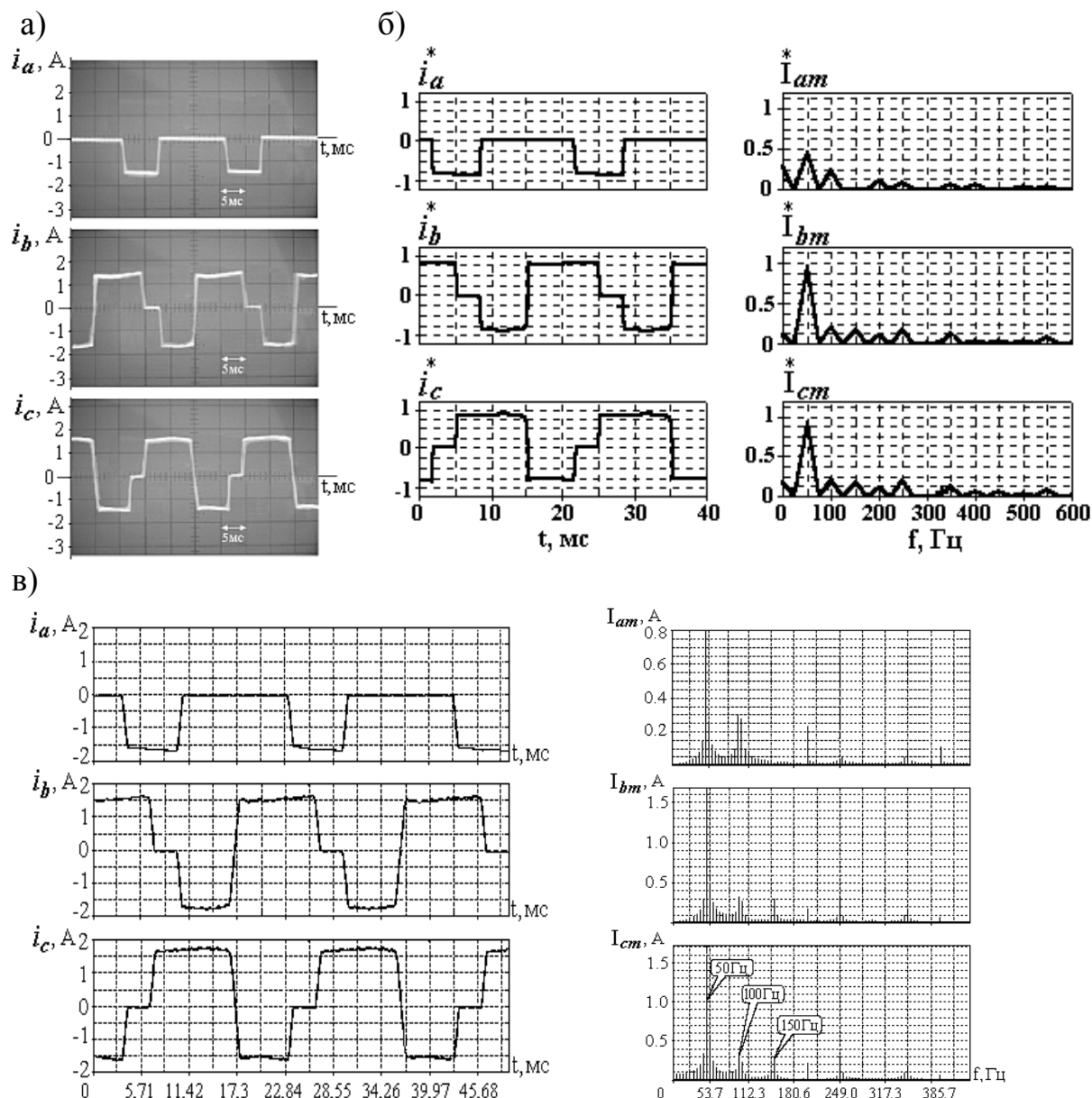


Рис.5.6. Кривые фазных токов и их спектры неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя с RL-нагрузкой при отказе в работе одного плеча моста анодной группы с диодом Д6: а – осциллограммы физического макета; б – расчетные кривые компьютерного моделирования; в – экспериментальные кривые контрольно-диагностического комплекса

Совпадение во временной и частотной областях расчетных данных нормальных и аномальных режимов работы выпрямителей, полученных в главе 2, с результатами экспериментального исследования, проведенного с помощью контрольно-диагностического комплекса, подтверждает их достоверность.

5.2. Экспериментальные исследования выпрямителя промышленного исполнения с трансформаторами тока в питающей сети

В разделе 5.1 были приведены результаты экспериментальных исследований маломощного ($0,2 \text{ кВ}\cdot\text{А}$) макета неуправляемого выпрямителя, где в качестве датчика тока использовались шунты с активным сопротивлением. В системе автоматического регулирования автоматизированного электропривода постоянного тока машин бумагоделательного оборудования обратная связь по току, как правило, реализуется с помощью трансформаторов тока, установленных в каждую фазу питающей сети выпрямителя. Поэтому для проверки способов диагностики полупроводниковых выпрямителей, рассмотренных в главе 1, была исследована установка с неуправляемым выпрямителем промышленного исполнения и трансформаторами тока (рис.5.7).

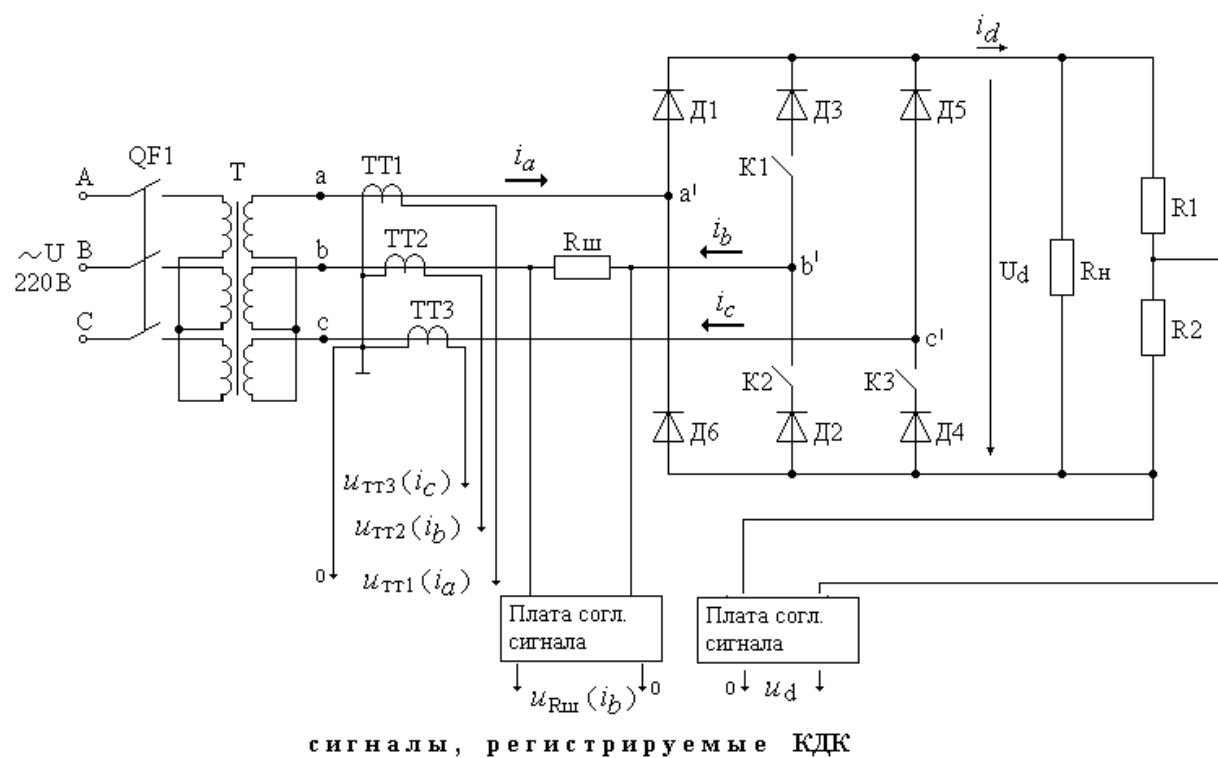


Рис.5.7. Принципиальная схема установки неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя промышленного исполнения с активной нагрузкой и трансформаторами тока

Данная установка (рис.5.7) включает в себя неуправляемый выпрямитель типа ВУ–2мм со следующими параметрами: $P_H = 4 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_{\text{вых}} = 110 \text{ В}$; $U_{\text{вх}} = 220/380 \text{ В}$; $I_d = 24 \text{ А}$.

Выпрямитель, выполненный на диодах Д1...Д6, питается от силового трансформатора (Т). В каждую фазу вторичной цепи трансформатора включены измерительные трансформаторы тока типа УТТ-5.

С целью проверки показаний трансформаторов тока в одну из фаз был включен шунт ($R_{ш} = 0,2 \text{ Ом}$).

Для обеспечения гальванической развязки в измерительных трактах сигналов выходного напряжения и напряжения датчика тока ($R_{ш}$) были использованы платы согласования сигнала.

Среднее значение выпрямленного напряжения выпрямителя при нормальном режиме работы составляло $U_d = 50,5 \text{ В}$. Среднее значение тока составляло $I_d = 18 \text{ А}$ при активной нагрузке $R_n = 2,8 \text{ Ом}$.

При проведении эксперимента с помощью контрольно-диагностического комплекса производилась запись выходного напряжения трансформаторов тока $u_{т1}$, $u_{т2}$ и $u_{т3}$, а также выходного напряжения выпрямителя u_d и напряжения датчика тока ($u_{Rш}$), пропорционального фазному току i_b . При этом период дискретизации контролируемых аналоговых сигналов составлял $T_0 = 0,5 \text{ мс}$.

5.2.1. Экспериментальные исследования нормальных режимов работы выпрямителя

Данному режиму работы соответствует принципиальная схема лабораторной установки, представленная на рис.5.7, при замкнутых ключах К1, К2, К3.

На рис.5.8 приведены экспериментальные кривые тока i_b фазы “b”, записанные контрольно-диагностическим комплексом с трансформатора тока ТТ2 и с шунта $R_{ш}$ лабораторной установки выпрямителя (см. рис.5.7).

Сравнение кривых, приведенных на рис.5.8, показывает, что кривая тока i_b , записанная с трансформатора тока ТТ2 (рис.5.8 а), практически совпадает с аналогичной кривой тока i_b , записанной с шунта (рис.5.8 б).

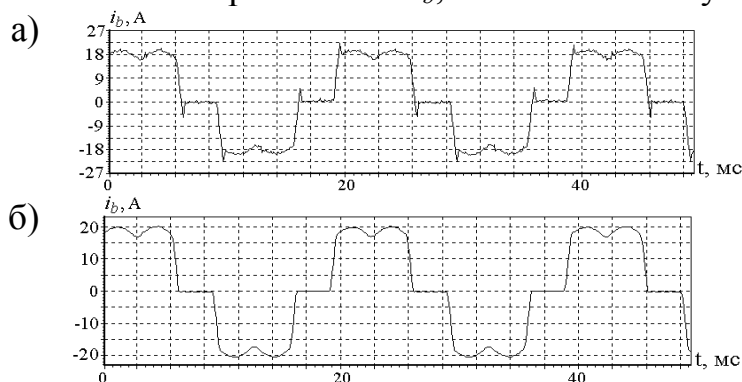


Рис.5.8. Экспериментальные кривые тока i_b фазы “b” неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя промышленного исполнения:
а – кривая, записанная с трансформатора тока; б – кривая, записанная с шунта

На рис.5.9 изображены кривые выходного напряжения u_d и фазных токов i_a , i_b и i_c выпрямителя, записанные контрольно-диагностическим комплексом при нормальном режиме работы.

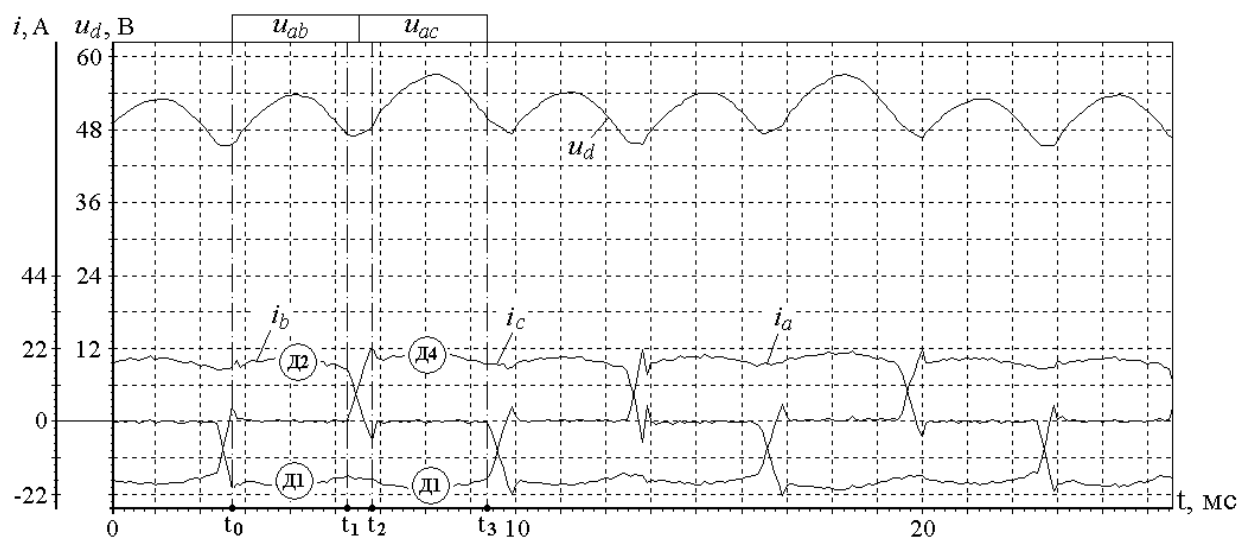


Рис.5.9. Установка неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя с активной нагрузкой и трансформаторами тока. Нормальный режим работы.

Кривые выпрямленного напряжения и фазных токов, записанные контрольно-диагностическим комплексом

На рис.5.10 показаны спектры гармоник кривых, приведенных на рис.5.9. В табл.5.4 сведены численные значения их амплитуд.

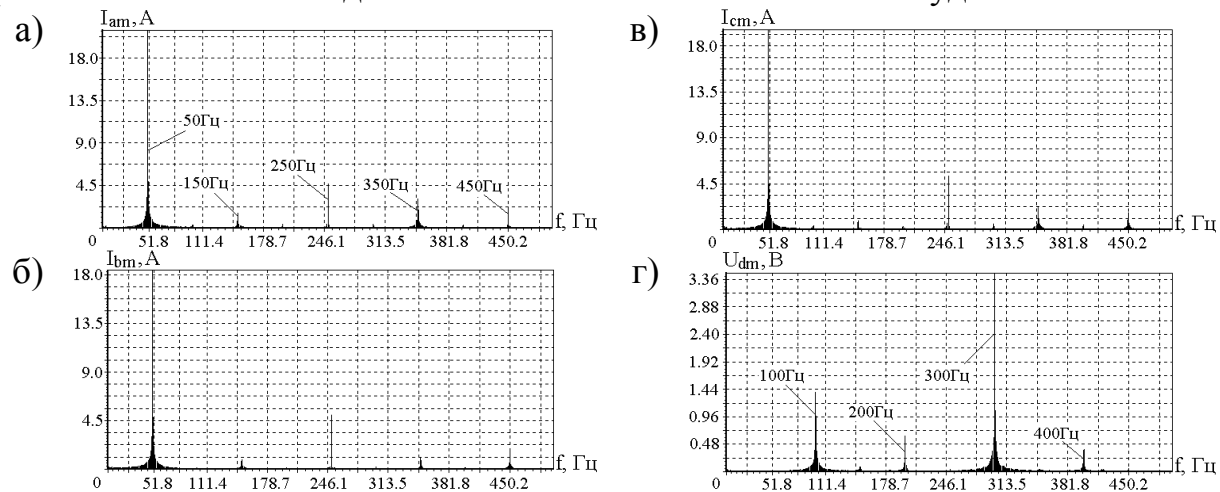


Рис.5.10. Спектры гармоник экспериментальных кривых, представленных на рис.5.9: а – спектр кривой тока i_a ; б – спектр кривой тока i_b ; в – спектр кривой тока i_c ; г – спектр кривой выпрямленного напряжения u_d

Таблица 5.4

Установка неуправляемого выпрямителя промышленного исполнения с активной нагрузкой и трансформаторами тока. Нормальный режим работы

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400	450
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ф а з а	a	I_{amv} , А	20,80	0	2,25	0	5,00	0	3,37	0	2,25
	b	I_{bm} , А	18,28	0	0,85	0	5,34	0	1,12	0	1,97
	c	I_{cm} , А	19,40	0	0,85	0	5,34	0	1,12	0	1,68
U_{dmv} , В			0	1,38	0	0,66	0	3,48	0	0,42	0

При рассмотрении рис.5.9 видно, что ток каждой фазы имеет практически прямоугольный вид, что характерно нормальному режиму работы (см. рис.5.2). Кривая выпрямленного напряжения (рис.5.9) также имеет типичный вид для нормального режима работы неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя (см. рис.5.3).

Однако сравнение кривой выпрямленного напряжения u_d и спектра её гармоник (рис.5.9, 5.10 г) с аналогичной расчетной кривой и её спектром, соответствующим нормальному режиму работы неуправляемого выпрямителя и представленным на рис.5.3 б, показывает, что существуют отличия. Экспериментальная кривая выходного напряжения u_d (рис.5.9) в отличие от аналогичной расчетной кривой (рис.5.3 б) имеет пульсации с различными амплитудными значениями, что означает наличие асимметрии линейных напряжений. Отличие по форме кривых выпрямленного напряжения (см. рис.5.3 б, 5.9) приводит к различному их гармоническому составу. Действительно, в спектре гармоник экспериментальной кривой выпрямленного напряжения (рис.5.10 г) наряду с 6-й гармоникой присутствуют 2-я (100 Гц), 4-я (200 Гц), 8-я (400 Гц) гармоники (табл.5.4), которые в спектре расчетной кривой выходного напряжения отсутствуют (рис.5.3 в).

Спектры кривых фазных токов (рис.5.10 а,б,в; табл.5.4) содержат 1-ю гармонику (50 Гц) с незначительными отличиями по амплитуде, а также 5-ю и 7-ю гармоники (250 и 350 Гц). Наличие только этих гармоник в спектрах кривых фазных токов характерно для нормального режима работы выпрямителя, что видно по результатам моделирования, представленным на рис.5.2в. Однако в спектрах экспериментальных кривых токов (рис.5.10 а,б,в), наряду с 1-й, 5-й и 7-й гармониками, присутствуют 3-я и 9-я гармоники (150 и 450 Гц) (см. табл.5.4). Их наличие объясняется асимметрией линейных напряжений выпрямленного напряжения.

С помощью совместного анализа экспериментальных кривых мгновенных значений фазных токов и выпрямленного напряжения, приведенных на рис.5.9, проверим справедливость данного способа диагностики, рассмотренного в гл.1, определив номера включенных

вентилей и линейные напряжения, под воздействием которых протекают токи на интервале времени $t_0 - t_3$ (рис.5.9).

Согласно условно принятым в главе 1 положительным направлениям токов в фазах (положительные – от точек a', b', c' , соответственно, к точкам a, b, c) (см. рис.5.7), в промежутке времени $t_0 - t_1$ (рис.5.9) ток фазы “а” имеет отрицательное значение и направлен от a к a' , ток фазы “b” – положительное значение и направлен от b' к b , ток фазы “с” равен нулю. При таких направлениях фазных токов в выпрямителе ток может протекать под воздействием линейного напряжения u_{ab} через диоды Д1, Д2 по цепи $a - a' - Д1 - R_H - Д2 - b' - b$. На интервале времени $t_2 - t_3$ ток фазы “а” сохраняет отрицательное значение, ток фазы “b” равен нулю, ток фазы “с” имеет положительное значение. Это означает, что на рассматриваемом участке времени ($t_2 - t_3$) ток в выпрямителе протекает под воздействием линейного напряжения u_{ac} через диоды Д1, Д4 по цепи $a - a' - Д1 - R_H - Д4 - c' - c$.

5.2.2. Экспериментальные исследования аномальных режимов работы выпрямителя

На базе установки неуправляемого выпрямителя промышленного исполнения, схема которой приведена на рис.5.7, были исследованы следующие аномальные режимы работы выпрямителя:

- отказ в работе одного плеча моста выпрямителя с диодом анодной группы Д2 (ключ К2 разомкнут, ключи К1, К3 замкнуты);
- отказ в работе одного плеча моста выпрямителя с диодом катодной группы Д3 (ключ К1 разомкнут, ключи К2, К3 замкнуты);
- одновременный отказ в работе двух плеч моста выпрямителя с диодами Д3 и Д4 (ключи К1, К3 разомкнуты, ключ К2 замкнут).

Целью данного эксперимента являлось определение влияния постоянной составляющей фазных токов на работу выпрямителя при наличии в питающей сети трансформатора конечной мощности и трансформаторов тока.

Математическое моделирование аномальных режимов работы выпрямителей проводилось при допущении неограниченной мощности питающей сети. При этом результаты моделирования показали, что в фазных токах появляется постоянная составляющая (нулевая гармоника), значение которой при асимметрии углов управления составляет 0,5...2 % от номинального тока и 8...20 % при отказе в работе одного плеча моста выпрямителя.

Аномальному режиму работы установки выпрямителя с трансформаторами тока при выходе из строя плеча моста с диодом Д2 соответствуют кривые фазных токов, выходного напряжения и спектры их гармоник, записанные контрольно-диагностическим комплексом и представленные на рис.5.11 а,б. В табл.5.5 отражен гармонический состав этих кривых.

На рис.5.12 для этого же вида аномального режима приведена кривая тока i_b , записанная с шунта $R_{ш}$ (см. рис.5.7).

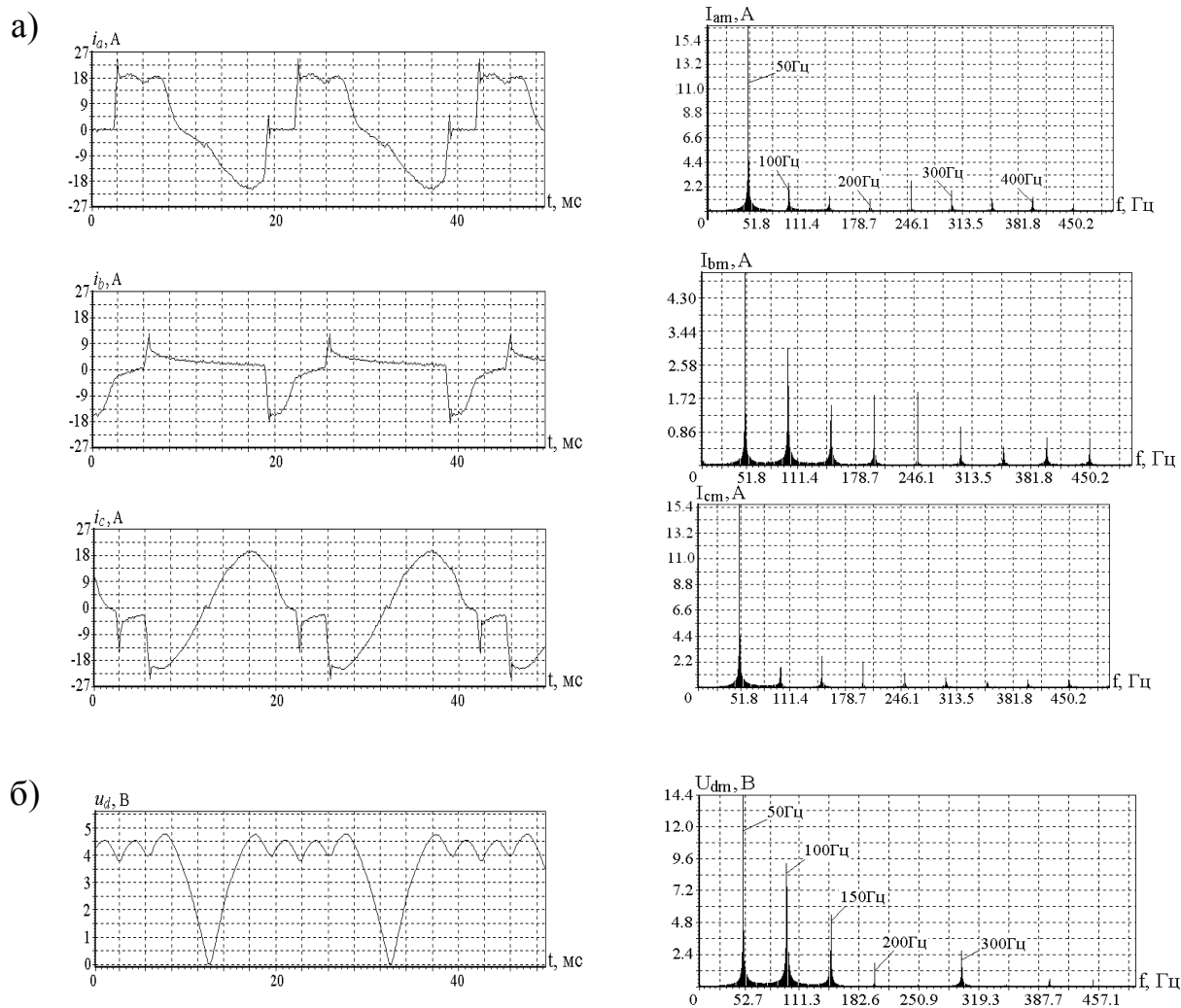


Рис.5.11. Кривые токов и напряжения и спектры их гармоник выпрямителя с активной нагрузкой и трансформаторами тока при отказе в работе плеча моста с диодом Д2: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – кривая выпрямленного напряжения и спектр её гармоник

При анализе приведенных кривых (рис.5.11, 5.12), в первую очередь, следует отметить, что форма кривой тока i_b , записанная с трансформатора тока ТТ2 (рис.5.11 а), резко отличается от формы аналогичной кривой, записанной с датчика тока, в качестве которого использовался шунт $R_{ш}$ (рис.5.12). Формы токов в двух фазах, которые примыкают к исправным ветвям моста выпрямителя (рис.5.11 а), также отличаются от форм аналогичных экспериментальных кривых неуправляемого выпрямителя, соответствующих выходу из строя плеча анодной группы моста (рис.5.6 в) и записанных с активных сопротивлений шунта. Это объясняется подмагничиванием трансформаторов тока. В то же время подмагничивание не сказывается на форме тока силового трансформатора (рис.5.12).

Таблица 5.5

Установка неуправляемого выпрямителя промышленного исполнения с активной нагрузкой и трансформаторами тока.

Отказ в работе плеча моста с диодом Д2

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400	450
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фаза	a	I_{amv}, A	13,47	2,47	1,37	1,10	2,75	1,92	1,10	1,37	0,82
	b	I_{bm}, A	4,94	2,82	1,61	2,04	1,93	1,07	0,53	0,85	0,55
	c	I_{cm}, A	12,67	1,92	2,75	2,20	1,10	0,85	0,50	0,50	0,50
U_{dmv}, B			14,4	9,30	5,40	1,50	0	2,70	0	0,65	0,65

Однако анализ экспериментальных кривых фазных токов, изображенных на рис.5.11, позволяет судить о месте неисправности выпрямителя, поскольку однозначно видно, что ток в фазах “а” и “с” имеет двухполярный вид несмотря на то, что форма его сильно изменилась по сравнению с формой аналогичных кривых, приведенных на рис.5.6 в. Это свидетельствует об исправном состоянии ветвей моста, примыкающих к фазам “а” и “с”.

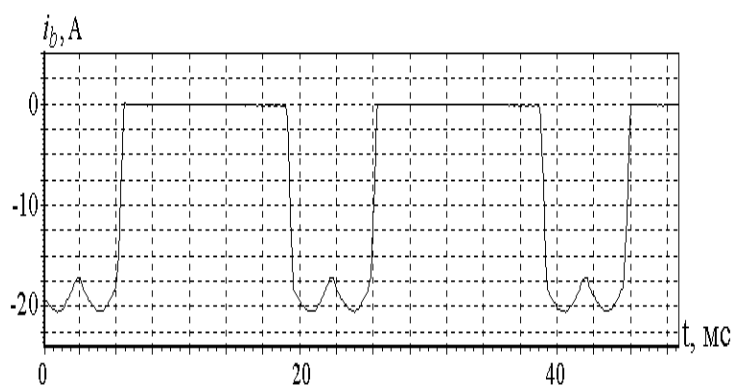


Рис.5.12. Кривая фазного тока i_b , записанная с активного сопротивления $R_{ш}$ (рис.5.7) при отказе в работе плеча моста с диодом Д2

Форма тока фазы “b” резко отличается от формы тока в фазах “а” и “с” (рис.5.11 а) и имеет вид дифференцированного однополярного отрицательного импульса, реальная кривая которого представлена на рис.5.12.

О неисправности плеча моста, примыкающего к фазе “b”, говорят спектры кривых фазных токов (рис.5.11 а). Спектры содержат все гармоники, при этом амплитуда 1-й гармоники тока i_b значительно меньше, чем амплитуды первых гармоник токов i_a и i_c (см. табл.5.5).

Что касается формы кривой выпрямленного напряжения (рис.5.11 б) и спектра её гармоник (табл.5.5), то в данном случае они имеют типичный вид при отказе в работе одного плеча моста. Форма данной кривой выходного напряжения (рис.5.11 б) полностью совпадает с расчетной и экспериментальной кривыми (рис.5.5, в). Соответственно гармонический состав расчетной и экспериментальных кривых выходного напряжения также совпадает между собой (табл.5.2, 5.5).

Экспериментальное исследование проводилось и для случая отказа в работе плеча катодной группы моста с диодом ДЗ (рис.5.7, ключ К1 разомкнут).

Экспериментальные кривые токов, соответствующие этому виду аномального режима работы, приведены на рис.5.13. В табл.5.6 представлены численные значения амплитуд гармоник их спектров.

Рассмотрение данных кривых (рис.5.13) показывает, что они в сравнении с кривыми, представленными на рис.5.11а, отличаются лишь полярностью. Ток фазы "b" имеет положительный импульс и совпадает с условным положительным направлением, что говорит о выходе из строя диода Д3.

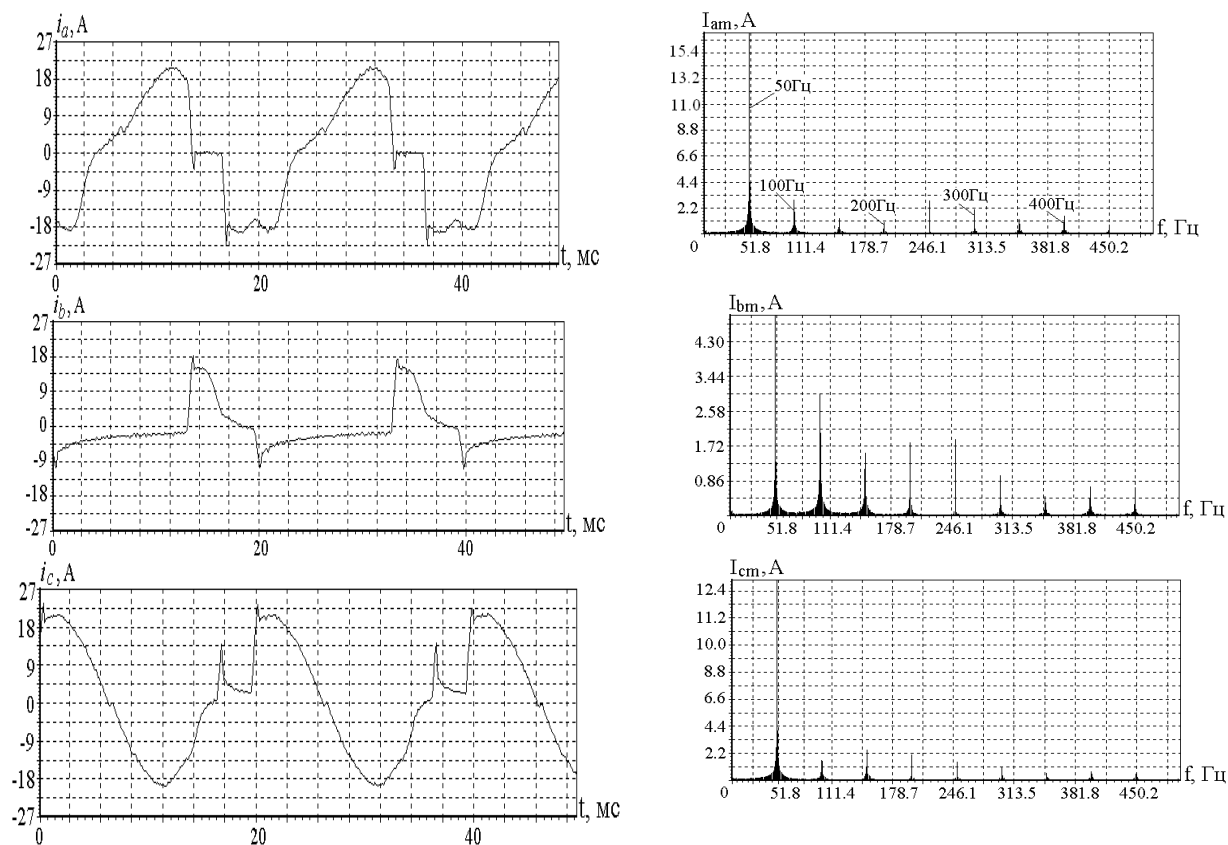


Рис.5.13. Установка неуправляемого выпрямителя промышленного исполнения с активной нагрузкой и трансформаторами тока. Кривые фазных токов и спектры их гармоник при отказе в работе плеча моста выпрямителя с диодом ДЗ

Экспериментальные кривые аномального режима, вызванного одновременным отказом в работе верхнего и нижнего плеч моста с диодами Д3 и Д4 (см. рис.5.7, ключи К1 и К3 разомкнуты), приведены на рис.5.14. В табл.5.7 представлен гармонический состав этих кривых токов.

Таблица 5.6

Установка неуправляемого выпрямителя промышленного исполнения с активной нагрузкой и трансформаторами тока.

Отказ в работе плеча моста катодной группы с диодом Д3

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400	450
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ф а з а	a	I_{amv}, A	14,05	3,02	1,37	1,10	3,02	2,20	1,37	1,51	0,82
	b	$I_{bm v}, A$	4,94	3,01	1,61	1,82	1,92	0,96	0,43	0,75	0,70
	c	$I_{cm v}, A$	13,50	1,65	2,47	2,20	1,60	1,10	0,60	0,70	0,75

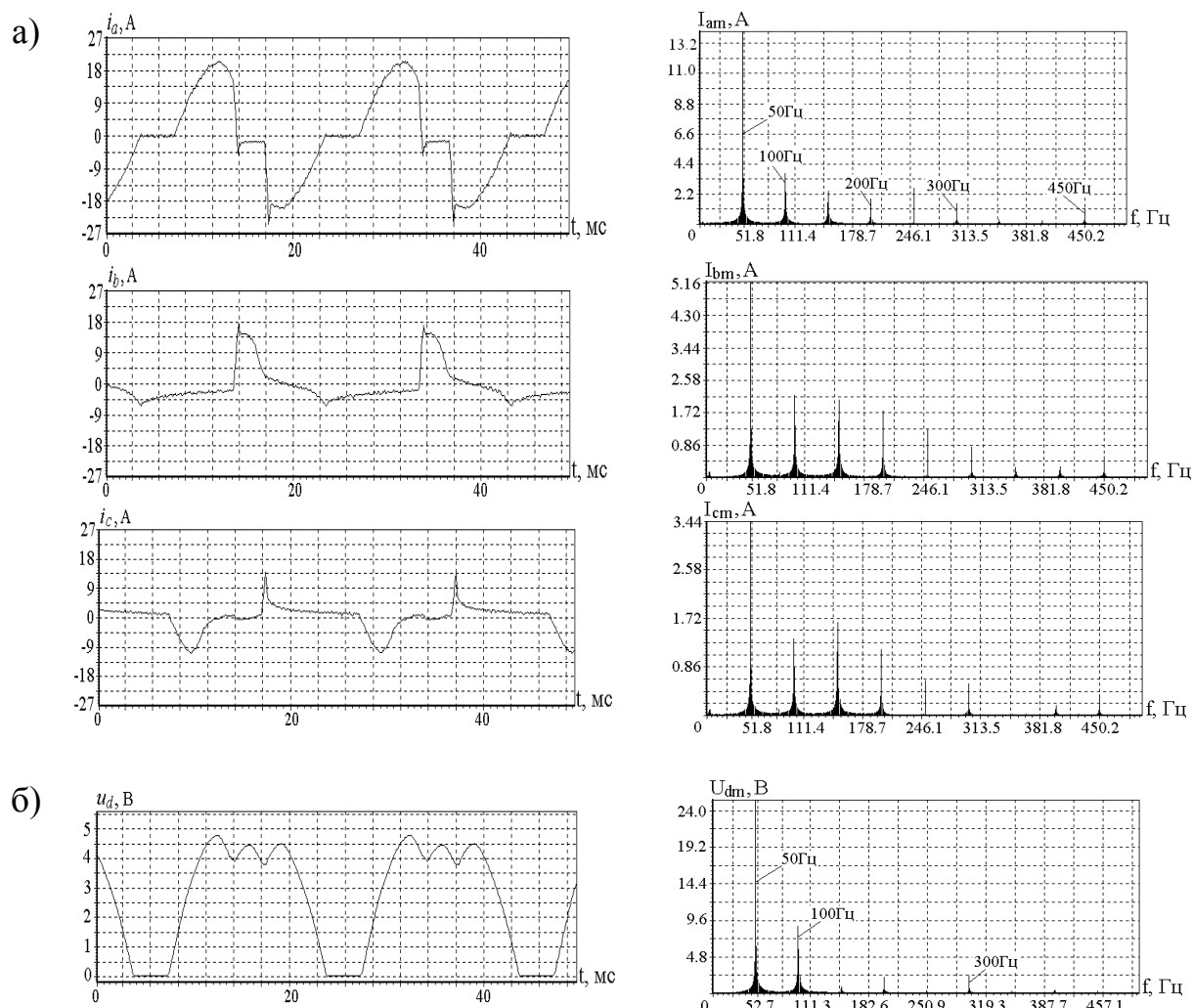


Рис.5.14. Кривые токов и напряжения и спектры их гармоник выпрямителя с активной нагрузкой и трансформаторами тока при одновременном отказе в работе плеч моста с диодами Д3 и Д4: а – кривые фазных токов и спектры их гармоник; б – кривая выпрямленного напряжения и спектр её гармоник

Визуальный анализ экспериментальных кривых фазных токов, представленных на рис.5.14, показывает, что лишь ток фазы “а” имеет форму двуполярных импульсов. Это говорит об исправности обоих плеч моста ветви, примыкающей к фазе “а”. Формы токов фаз “b” и “с” имеют вид однополярных импульсов. При этом ток фазы “b” – положительный, фазы “с” – отрицательный. Это означает, что нарушения в работе произошли, соответственно, в катодной (Д3) и анодной (Д4) группах вентилях, что подтверждается амплитудами первых гармоник токов i_b и i_c . Они имеют наименьшее значение (рис.5.14, табл.5.7).

Таблица 5.7

Установка выпрямителя с активной нагрузкой и трансформаторами тока.
Одновременный отказ в работе двух плеч моста с диодами Д3 и Д4

Частота, Гц			50	100	150	200	250	300	350	400	450
№ гармоники			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фаза	a	I_{amv}, A	12,02	3,57	2,47	1,92	1,92	2,75	1,65	0,29	1,10
	b	I_{bm}, A	5,16	2,15	2,04	1,80	1,29	0,86	0,32	0,32	0,54
	c	I_{cm}, A	3,44	1,34	1,66	1,18	0,64	0,59	0	0,20	0,38
U_{dmv}, B			25,20	9,00	1,20	2,35	0	2,40	0	0	0

Форма экспериментальной кривой выходного напряжения (рис.5.14 б) полностью совпадает с формой аналогичной расчетной кривой неуправляемого выпрямителя при таком же аномальном режиме (раздел.2.2, рис.2.13 б), что подтверждает достоверность расчетных и экспериментальных данных. Их гармонический состав также совпадает. Наибольшие амплитуды в спектрах экспериментальной (рис.5.14 б, табл.5.7) и расчетной кривых выходного напряжения (рис.2.13 б) имеют 1-я и 2-я гармоники.

Библиографический список

1. Бардин В.М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. – М.: Энергия, 1978. – 96 с.
2. Маркин В.В., Миронов В.Н., Обухов С.Г. Техническая диагностика вентильных преобразователей. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 152 с.
3. Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
4. Диагностирование вентильного электропривода внешними микропроцессорными средствами / Г.В. Суворов, О.И. Осипов, С.М. Бутаков и др. // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1990. – С. 68 – 75.
5. Осипов О.И. Техническое диагностирование автоматизированного электропривода постоянного тока: дис... докт. техн. наук. – М., 1994. – 373 с.
6. Пат. 2133042 RU МКП⁶ G 01 R 31/26, 31/28. Устройство диагностирования тиристорного преобразователя / А.А. Топчий; заявл. 24.01.96; опубл. 10.07.99. Бюл. № 18
7. Пат. 2226310 RU МКП⁷ H 02 H7/10. Устройство сигнализации состояния полупроводникового вентиля / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев; заявл. 08.19.02; опубл. 27.03.04. Бюл. № 25
8. Пат. 2185632 RU МКП⁷ G 01 R19/145. Устройство бесконтактного определения технического состояния тириستоров источника питания / А.Г. Сукиязов, Б.Н. Просянных и др.; заявл. 06.03.2000; опубл. 20.07.02. Бюл. № 28
9. Исследование аномальных режимов работы полупроводниковых выпрямителей / М.Ю. Коновалов, А.В. Мусеев, Д.А. Широкин // Тез. докл. межвуз. науч.-технич. конф. XXXII недели науки СПбГПУ / СПбГПУ. – СПб, 2004. – С. 120.
10. Диагностика полупроводниковых преобразователей методом спектрального анализа фазных токов питающей сети / В.Д. Кулик, В.И. Королев, М.Ю. Коновалов, С.В. Ширяев, В.Ю. Филиппов // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на предприятиях ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУРП – СПб., 2005. С. 286 – 307.
11. Пат. 2310877. Способ диагностики трехфазного тиристорного выпрямителя / В.Д. Кулик, А.Е. Козярук, С.В. Ширяев, М.Ю. Коновалов; заявл. 30.05.2006; опубл. 20.11.2007. Бюл. №32.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Способы и устройства диагностики полупроводниковых выпрямителей ..	4
1.1. Обзор существующих способов и устройств диагностики полупроводниковых выпрямителей.....	4
1.2. Разработка новых способов диагностики полупроводниковых выпрямителей.....	8
1.2.1. Способ диагностики выпрямителей спектральным анализом выходного напряжения.....	8
1.2.2. Способ диагностики выпрямителей с использованием кривых мгновенных значений фазных токов	10
1.2.3. Способ диагностики, основанный на совместном анализе кривых мгновенных значений фазных токов и выходного напряжения выпрямителя.....	12
Глава 2. Аномальные режимы работы и диагностика неуправляемого трехфазного мостового выпрямителя.....	16
2.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного плеча моста.....	18
2.2. Аномальные режимы и диагностика при отказе в работе двух и трех плеч моста выпрямителя.....	22
Глава 3. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя.....	25
3.1. Исследование аномальных режимов работы и диагностика трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя при активно-индуктивной нагрузке.....	25
3.1.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя	26
3.1.2. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при заданных значениях углов управления тиристорами, равных нулю, и асимметрии импульса одного плеча	32
3.1.3. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при заданных значениях углов управления, отличных от нуля, и асимметрии импульса одного плеча	35
3.2. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС	38
3.2.1. Аномальные режимы выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя	38
3.2.2. Аномальные режимы выпрямителя при асимметрии импульсов управления	45

Глава 4. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового управляемого выпрямителя.....	51
4.1. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового управляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой	51
4.1.1. Аномальные режимы выпрямителя при отказе в работе одного или нескольких плеч моста выпрямителя.....	53
4.1.2. Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления, равных нулю, и асимметрии импульса одного плеча.....	59
4.1.3. Аномальные режимы выпрямителя при заданных значениях углов управления, отличных от нуля, и асимметрии импульса одного плеча.....	62
4.2. Аномальные режимы работы и диагностика трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС при непрерывном токе ..66	
4.2.1. Аномальные режимы и диагностика выпрямителя при отказе в работе одного и двух плеч моста	69
4.2.2. Влияние аномального импульса включения тиристора одного плеча моста на работу выпрямителя.....	74
4.2.3. Аномальные режимы работы выпрямителя при ассиметрии импульсов управления в двух и более плечах моста выпрямителя.....	81
4.2.4. Влияние замкнутой системы автоматического регулирования электроприводом постоянного тока на характеристические признаки диагностики выпрямителя	85
4.3. Аномальные режимы трехфазного мостового управляемого выпрямителя с нагрузкой на противо-ЭДС при прерывистом токе.....	87
Выводы.....	91
Глава 5. Экспериментальная проверка способов диагностики полупроводниковых выпрямителей	94
5.1. Экспериментальная проверка расчетных данных компьютерного моделирования преобразователей и работы контрольно-диагностического комплекса.....	94
5.1.1. Экспериментальные исследования нормальных режимов работы физического макета выпрямителя.....	95
5.1.2. Экспериментальные исследования аномальных режимов работы физического макета выпрямителя.....	97
5.2. Экспериментальные исследования выпрямителя промышленного исполнения с трансформаторами тока в питающей сети.....	101
5.2.1. Экспериментальные исследования нормальных режимов работы выпрямителя	102
5.2.2. Экспериментальные исследования аномальных режимов работы выпрямителя.....	105
Библиографический список	111

Учебное издание

**Валентин Данилович Кулик,
Владимир Иванович Королев**

АНОМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ИХ ДИАГНОСТИКА

Учебное пособие

Редактор и корректор Н.П. Новикова
Техн. редактор Титова Л.Я.

Темплан 2012 г., поз. 64

Подп. к печати 27.09.12. Формат 60х84/16. Бумага тип №1.

Печать офсетная. Уч. –изд. л.7,25; усл. печ. л.7,25. Тираж 50 экз.

Изд. №64. Цена «С». Заказ №

Ризограф Санкт – Петербургского государственного технологического
университета растительных полимеров, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.