

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

(наименование кафедры)

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем

(направленность (профиль)/специализация)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка мероприятий по снижению влияния нелинейной нагрузки потребителей в системе электроснабжения завода «АТТР»

Студент

А.Е. Семенов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В.П. Тараканов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Краткая характеристика системы электроснабжения предприятия АТТР.	6
1.1 Основные требования по соблюдению норм показателей качества электрической энергии	7
1.2 Актуальность	8
1.3 Цель работы.	9
1.4 Задачи.	10
1.5 Технические требования по обеспечению качества электрической энергии.	10
1.6 Значение уровня качества электрической энергии.	12
1.7 Влияние качества электрической энергии на работу электроприемников.	14
Вывод.	16
2. Мероприятия и способы определения и компенсации нелинейных нагрузок.....	18
2.1 Определение основных источников нелинейных нагрузок на предприятии АТТР.	18
2.2 Способы компенсации высокочастотных гармонических составляющих тока и напряжения.	21
Вывод.	31
3. Описание элементов системы математическим анализом.....	33
3.1 Математический анализ влияния выпрямителя в составе частотного привода на систему электроснабжения.	33
3.2 Влияние инвертора в составе частотного привода переменного тока на систему электроснабжения.	44
3.3 Влияние частотного преобразователя в составе блока асинхронного электродвигателя переменного тока на систему электроснабжения.	51

Вывод.	56
4. Разработка системы активного фильтра параллельного подключения с общим звеном постоянного тока.....	57
4.1 Разработка и описание силовой структуры «активного фильтра гармоник параллельного включения с общим звеном постоянного тока».....	57
4.2 Анализ работы с помощью преобразования в ряд Фурье в системе частотный привод – активный фильтр.	70
Вывод.	72
5. Экспериментальное исследование работы системы активного фильтра с применением компьютерного моделирования в среде MATLAB и mMaxima.....	74
5.1 Разработка компьютерной модели и составление сравнительного спектрального анализа в программе Matlab с расширением Simulink.....	74
5.2 Математически графический анализ системы частотного привода в программе xMaxima.....	77
5.3 Ожидаемый экономический эффект с внедрением активного фильтра с общим звеном постоянного тока в систему частотного привода.....	83
Вывод.	85
Заключение	86
Список использованных источников	88
Приложение А	
Приложение Б	
Приложение В	

Введение

В 2000-е годы произошли значительные изменения в электроэнергетике России, обусловленные переходом к рыночным отношениям и принятием Федерального закона «Об электроэнергетике» от 26.03. 2003 № 35-ФЗ и Федерального закона «Об особенностях функционирования электроэнергетики в переходный период от 26.03.2003 № 36-ФЗ. Изменилась нормативная база, ввелись в действие новые Российские стандарты и методы испытаний, гармонизированные с международными и европейскими стандартами, которые регламентируют объем современных требований к техническим средствам по обеспечению электромагнитной совместимости. Решения о совершенствовании регулирования в области электромагнитной совместимости обусловлены, прежде всего, широким распространением микроэлектроники, компьютерной техники и устройств силовой электроники в различных отраслях производственной деятельности, бытовой и хозяйственной сферах. Не упуская из внимания тот факт, что необходимо устранять барьеры в международной торговле.

Около полувека единственным нормативным документом, устанавливающим в России как номенклатуру показатели качества электрической энергии и нормы качества электрической энергии, так и основополагающие требования к контролю, методам и средствам измерений показателей качества электрической энергии, являлся стандарт ГОСТ 13109 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» (последовательно в редакциях 1967, 1987 и 1997 г.г.). Начиная с 2001 г. в РФ начали внедряться ГОСТы по электромагнитной совместимости серии 51317, которые аутентичны стандартам Международной электротехнической комиссии (МЭК) серии 61000.

Таким образом, в России впервые приняты специальные стандарты по методам измерения и требованиям к средствам измерения качества электрической энергии, которые в том числе описывали формы протоколов измерений. В результате у нас появился пакет стандартов, который должен был стать базой для системы контроля качества электрической энергии.

В результате всех приведенных к исполнению нормативных актов начали применять к в первую очередь к вновь вводимым в эксплуатацию объектам с обязательным пунктом в технических условиях подключения к сети электроснабжения, является пункт обязующий соблюдение требований ГОСТ 32 144 – 2013. В связи с вышеизложенным потребитель электрической энергии обязан выполнить мероприятия, направленные на приведение показателей уровня качества электрической энергии к соответствующим нормам [29].

1 Краткая характеристика системы электроснабжения предприятия АТТР

Международная компания Atsumitec Toyota Tsuse имеет свои производства в странах, таких как Япония, Китай, Тайланд, Индонезия, Мексика и с 2012 года в России.

Завод АТТР расположен на территории Особой Экономической Зоны (ОЭЗ) г.Тольятти. Основная продукция предприятия – рычаг выбора передачи на автомобили с механическими коробками передач, роботизированными коробками передач и автоматическими коробками передач. На предприятии осуществляется 3 цикла производственных процессов – это формообразование (металлорежущие процессы и литье пластмассовых изделий), контактная сварка и сборка узлов.

Максимальная проектная мощность предприятия составляет 1000кВт. Предприятие относится ко второй категории электроснабжение и имеет 2 кабельных линии электроснабжения. Структурная схема электроснабжения: БКТП6 10кВ 250кВА получает питание по двум кабельным линиям от ГРП ОЭЗ. БКТП питает блочно - модульную КТП10/0.4 от зажимов двух секций отдельными кабельными линиями из сшитого полиэтилена АПвБП-10 3х95.

КТП10/0.4 оснащено 2 трансформаторами типа ТМГ1000/10/0.4.

От БКТП со стороны 0.4 кВ выполнен ввод к 2 секциям ВРУ кабелями АВВГ4х185 по 7шт на каждую секцию.

ВРУ оснащено АВР для быстрого переключения на линию резервного электроснабжения.

Компенсация реактивной мощности осуществляется ступенчатой конденсаторной установкой ККУ с контроллером марки Lovato.

Основными потребителями электроэнергии на предприятии являются: машины контактной сварки (МКС), токарные автоматы с программным управлением (ТА), термопласт автоматы (ТПА), вентиляционное оборудование

подачи теплого и охлажденного воздуха, освещение. Режим работы оборудования можно определить, как равномерный непрерывный на протяжении рабочей смены.

1.1 Основные требования по соблюдению норм показателей качества электрической энергии

На основании выдвинутых требований, в технических условиях (Приложение А) п. 10.8, направленных на обеспечение требований ГОСТ 32 144 – 2013 об соответствии показателей уровня качества электрической энергии, было принято решение об анализе возможных отклонений, причинах их возникновения и выборе средств необходимых для организации мероприятий по приведению отклонений к требуемым нормам.

Электроэнергия - это товар и она должна соответствовать требованиям рынка определенному качеству. Ответственность и обязанности по обеспечению качества электроэнергии устанавливаются технологическими регламентами, в которых проговариваются специфические возможности участников оптового рынка влиять на уровень качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32 144 – 2013 [2].

Качество электрической энергии является неотъемлемой частью электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду. Проблема электромагнитной совместимости является первоочередной во всех областях производства, распределения, передачи и потребления электрической энергии.

Усложнение электрических систем введением в ее состав мощных электроприводов, вентиляных преобразователей, высокой степени автоматизации производства быстро обостряют проблему электромагнитной совместимости.

Существует многосторонний подход разрешения проблем электромагнитной совместимости электрической сети и подключенных к ней технических средств. В этом подходе устанавливается допустимый уровень эмиссии электромагнитных помех, создаваемых техническими средствами, допустимых уровней устойчивости этих средств к электромагнитным помехам, образующихся со стороны систем электроснабжения, и допустимых уровней этих помех в системе электроснабжения – норм качества электрической энергии.

В системе электроснабжения предприятия особое внимание уделяется кондуктивным помехам в сетях трехфазного переменного тока и действующего значения напряжения. Одним из распространенных видов электромагнитных кондуктивных помех являются высшие гармоники тока и напряжения основными элементами их возникновения являются электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой.

В большинстве случаев в системе электроснабжения, в которой основными потребителями являются частотные электроприводы, для фильтрации высших гармонических составляющих тока требуется применение фильтрокомпенсирующих устройств [28].

Для настройки фильтрокомпенсирующих устройств необходимо обладать информацией о гармоническом составе сетевого тока. С этой целью перед внедрением фильтрокомпенсирующих устройств в действующих СЭС следует обладать информацией об уровнях основных гармоник и на этом основании определять, на какие частоты следует настраивать фильтры.

1.2 Актуальность

Актуальность темы исследования определяется переходом промышленного сектора экономики на использование современных высокотехнологичных энергоэффективных видов частотного электропривода.

В итоге доля электропривода переменного тока на основе частотного преобразователя и асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором достигает весомого уровня.

В работе с сетью электроснабжения система «частотный привод асинхронный двигатель» является одним из главных источников нелинейных искажений напряжений и токов и потребителей реактивной мощности, что оказывает негативное влияние, как на питающую сеть в целом, так и на других потребителей электрической энергии в частности, и приводит к значительным экономическим убыткам.

В настоящее время наиболее эффективными устройствами компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности являются активные фильтры электрической энергии. Существующие активные фильтры имеют сложные силовые структуры и системы управления на основе косвенных методов определения требуемого тока, что повышает их стоимость, снижает надежность и качество компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности.

Поэтому внедрение и исследование активных фильтров, адаптированного для работы в системе «частотный привод-асинхронный двигатель», исключающего недостатки других фильтров, обеспечивающего высокое качество компенсации нелинейных искажений и реактивной мощности и повышающего электромагнитную совместимость системы «частотный привод-асинхронный двигатель» с сетью электроснабжения.

1.3 Цель работы

Цель данной работы проанализировать существующую схему электроснабжения и распределения электроэнергии, разработать и исследовать технические мероприятия по выделению основных источников нелинейных нагрузок в отдельную группу для более эффективного применения мероприятий по повышению качества электроэнергии для обеспечения

компенсации высших гармоник тока и увеличению электромагнитной совместимости систем электроснабжения предприятия.

1.4 Задачи

1. Анализ существующей схемы электроснабжения и распределения электроэнергии на предприятии. Оценка качества электроэнергии.
2. Исследование влияния нелинейной нагрузки на питающую сеть. Сравнительный анализ технических решений.
3. Влияние ухудшения качества электроэнергии на функционирование электрооборудования систем электроснабжения.
4. Разработка технических методов, организационных мероприятий, направленных на обеспечение качества электрической энергии в пределах установленных норм и правил.
5. Внедрение средств направленных на улучшение качества электроэнергии. Сравнительный анализ применения средств компенсации нелинейных нагрузок.

1.5 Технические требования по обеспечению качества электрической энергии

Качество электрической энергии имеет огромное значение, так как оно оказывает влияние на характеристики электрооборудования конечных потребителей, срок службы, межремонтные интервалы и их производительность, в меньшей степени влияет на характеристики и качество продукции, изготавливаемой на данном электрооборудовании. В нашей стране качество электрической энергии характеризуется действующими ГОСТами, определяющими нормируемые значения показателей качества электрической энергии. С 01.07.2014 года на территории нашей страны принято окончание действия национального стандарта ГОСТ Р 54149–2010 и введен в действие

межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013, определяющий уровень показателей, методы их оценки и нормативы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [1].

В соответствии с ГОСТ 32144-2013, гармонические составляющие токов потребителей электрической энергии являются основной причиной гармонических составляющих напряжения в питающих сетях электроснабжения. Тем не менее, в ГОСТ 32144-2013 и в более ранних ему государственных стандартах, уровень показателей качества, характеризуется гармоническим составом токов потребителей электрической энергии не нормировались, и нелинейные искажения в питающих сетях электроснабжения рассматривались в одностороннем порядке через гармонические составляющие напряжения.

Выполнение требований ГОСТ 32144 – 2013 в системах электроснабжения является важной задачей, и связано с комплексным решением целого ряда технических и организационных вопросов.

IEEE Standard 519–1992 – это международный стандарт в котором нелинейные гармонические искажения в системах электроснабжения описываются в двухстороннем порядке, и со стороны взаимодействия потребителей электрической энергии (токи гармоник, потребляемые из питающей сети электроснабжения), и со стороны источников электрической энергии (гармонические напряжения питающей сети электроснабжения). Всеобщий подход рассмотрения нелинейных гармонических искажений токов и напряжений в питающих сетях электроснабжения связан с международной практикой увеличения численности потребителей электрической энергии с нелинейными вольтамперными характеристиками.

Стандарты МЭК 61000-2-2 и IEEE Standard 519-1992 определяют требования по содержанию гармонических составляющих в энергосистеме до 50 порядка (в ГОСТ 32144-2013 – до 40-го). В требованиях определенными

международными стандартами суммарный коэффициент гармонических составляющих для напряжения вычисляется по формуле:

$$THD_U = K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \quad (1)$$

, где U_n – действительные значения высших гармоник напряжения, U_1 – значение первой основной гармоники напряжения.

THD (Total Harmonic Distortion) или Российский аналог, коэффициент искажения тока (суммарный коэффициент гармонических составляющих для тока).

Коэффициент искажения тока определяется по выражению:

$$THD_I = K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \quad (2)$$

, где I_n – действительные значения высших гармоник тока, I_1 – значение первой основной гармоники тока.

1.6 Значение уровня качества электрической энергии

Качество электрической энергии является неотъемлемой частью электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду. Электромагнитной совместимостью называют способность электрооборудования, электроприборов и аппаратов нормально выполнять свои функции в электромагнитной среде, не создавая негативных электромагнитных помех для иного электрооборудования задействованного в этой же электроэнергетической системе.

Все потребители электроэнергии делятся на линейные и нелинейные. В недавнем прошлом основными потребителями в электроэнергетике

преобладали линейные, и они составляли до 100% от общей электрической нагрузки (резистивные электронагреватели, лампы накаливания, асинхронные электродвигатели). Такие электропотребители имеют линейные вольт - амперные характеристики, потребляют из сети электроснабжения синусоидальные токи и не привносят нелинейных искажений в энергетическую систему. Но все поменялось в конце первой половины прошлого века, начались масштабные научно-исследовательские разработки в области полупроводников, а с середины прошлого века началось промышленное производство устройств на полупроводниковой основе. Таким примером являются выпрямители тока, используемые, в частности, инверторах напряжения, привносят в питающую сеть множество гармоник (рисунок 1).

Прогресс полупроводниковых технологий во второй половине прошлого века привел к производству силовых полупроводниковых элементов. Дальнейшим этапом развития силовых полупроводников можно отнести современные быстродействующие, МОП транзисторы управляемые электрическим полем (MOSFET) и полностью управляемые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT).

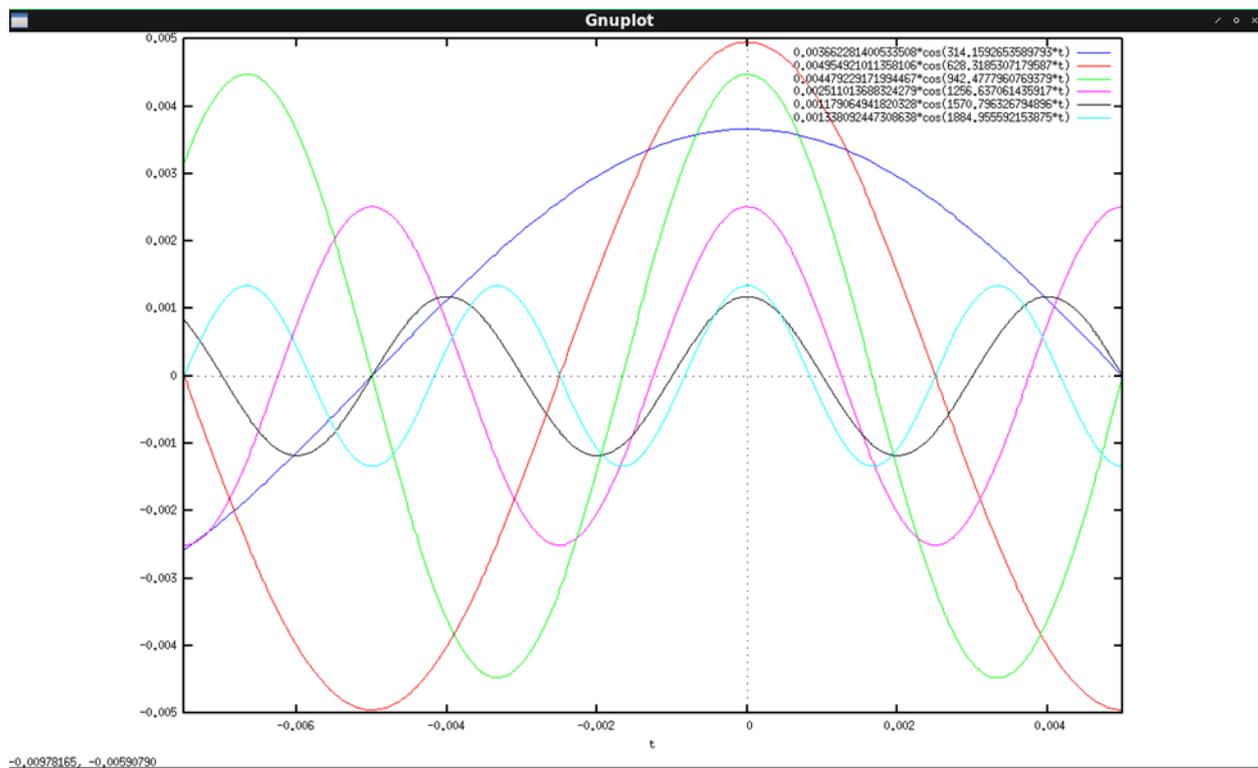


Рисунок 1 - Гармоники тока, создаваемые работой выпрямителя в питающей сети, со второй по десятую

Темпы роста производства и востребованность силовых полупроводниковых элементов привело к широкому распространению новейшего направления электроприборов – силовых полупроводниковых устройств. На сегодняшний день силовые полупроводниковые устройства получили распространение в бытовых и промышленных приборах, за счет чего количество нелинейных потребителей электроэнергии и доля гармоник тока и напряжения в питающих сетях продолжает увеличиваться огромными темпами, как в России, так и во всем мире. В течение последних 20 лет полупроводниковая промышленность показывает среднегодовой рост около 13%, несмотря на высокую волатильность.

1.7 Влияние качества электрической энергии на работу электроприемников

Электромагнитная совместимость ((ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008)) характеризуется взаимодействием между электрооборудованием, электрическими приборами и аппаратами с электромагнитной средой.

Если электромагнитная совместимость не обеспечена, то есть отдельные элементы приборов и электротехнических средств не имеющих способность помехоустойчивости к внешним (по отношению к приборам) и к внутренним (между элементами) помехам [5].

Полупроводниковые элементы, приборы и устройства на их основе являются нелинейными потребителями электрической энергии и потребляют насыщенный высшими гармониками несинусоидальный ток из сети электроснабжения.

За счет падения напряжений на сопротивлениях линий энергосистемы, в сети электроснабжения появляются нелинейные искажения и

несинусоидальность напряжения. Спектр гармоник зависит от многих причин, в частности, для выпрямителей на амплитуды высших гармоник влияет фаза включения α управляемого диода — тиристора (рисунок 2 и 3).

Высокочастотные составляющие тока и напряжения негативно воздействуют на функционирование электрооборудования, снижают надежность работы и экономичность питающих сетей, что приводит к ощутимым экономическим потерям, обусловленным, в первую очередь, снижением энергетических показателей электрооборудования, увеличение потерь в обмотках статора, в цепи ротора, а также в стали статора и ротора вращающихся машин, прогрессированием потерь на гистерезис; однофазными короткими замыканиями на землю в кабельных линиях; изъёнов, связанных с вихревыми токами в стали и потерями в обмотках трансформаторов, пробоями конденсаторов, вибрациями в электромашинах системах, вероятным выходом из строя или сокращением срока службы электрооборудования из-за интенсификации электрического и теплового старения изоляции, снижением надежности функционирования питающих сетей и технологических процессов, преждевременным выходом из строя высокоточных измерительных приборов или их нарушением работы, увеличением дополнительных потерь в сетях и элементах электрооборудования, образованием помех и искажений сигналов в сетях телекоммуникаций и систем связи, нарушением работы устройств релейной защиты и ухудшением их характеристик, сокращением срока службы основного электрооборудования энергетических систем, снижением надёжности и сбоями в работе микропроцессорных систем и систем автоматики. В дополнение ко всему, нелинейные нагрузки обладают высоким уровнем потребления реактивной мощности, что неизменно приводит к росту потерь в энергетической системе, колебаниям напряжения, перегрузке трансформаторов, генераторов, линий электропередач и общему ухудшению показателей уровня качества электрической энергии [27].

Снижение уровня качества электрической энергии приводит к отрицательным последствиям электротехнического и технологического характера:

- увеличение потерь активной и реактивной мощности;
- сокращения срока службы электрооборудования;
- увеличение средств капитальных вложений в электроснабжающую систему;
- нарушение нормального выполнения своих функций электроприемников и потребителей;
- нанесение вреда здоровью человека и окружающей среде.

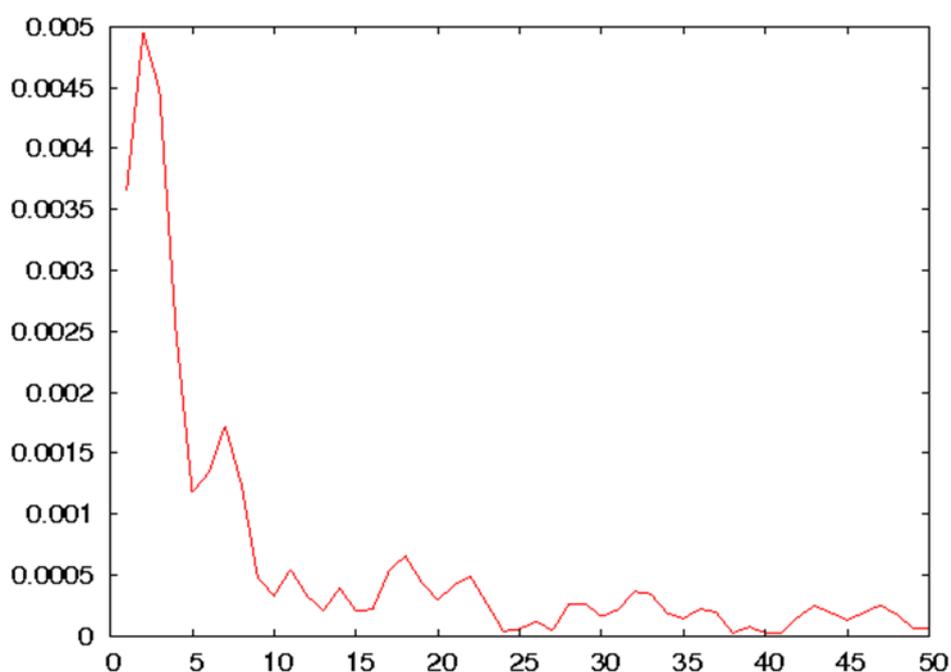


Рисунок 2 – Амплитуды гармоник

Вывод

В результате изучения ГОСТ32144-2013, и сравнения с предшествующим ему ГОСТ, а так же международных стандартов показателей уровня качества электрической энергии, было определено, что высокими проблемными зонами показателей уровня качества электрической энергии с точки зрения влияния на потребителей электрической энергии, сеть электроснабжения. Проведен анализ

источников нелинейных искажений напряжений и токов в сети электроснабжения, в результате чего было определено, что основным источником нелинейных искажений в сети электроснабжения является асинхронный электропривод переменного тока на основе частотного привода. Определены основные причины возникновения нелинейных искажений первичного тока частотного привода.

2. Мероприятия и способы определения и компенсации нелинейных нагрузок

2.1 Определение основных источников нелинейных нагрузок на предприятии АТТР

Для проведения анализа возникновения кондуктивных помех потребуется определить все основные электроприборы оснащенные устройствами с нелинейными вольт амперными характеристиками. В результате исследований проведенных совместно с электротехнической лабораторией, были выявлены: основным и самым существенным источником нелинейных искажений является асинхронный электропривод переменного тока с управлением на основе частотного преобразователя.

Несмотря на огромное количество приборов и устройств использующихся в составе предприятия АТТР, самой существенной и наиболее важной областью применения силовой электроники являются электродвигатели [16]. Электродвигатели используются практически в каждой единице оборудования и потребляет более половины всей вырабатываемой электроэнергии. Такая львиная доля использования электродвигателя переменного тока объясняется развитием математической теории машин переменного тока, наличием усовершенствованных силовых полупроводниковых элементов и частотных преобразователей на их основе и применением современных средств управления, которые в свою очередь позволяют создавать надежные, экономичные и доступные по цене системы частотного регулирования асинхронного электродвигателя. На сегодняшний день во всем мире управляемый асинхронный электродвигатель переменного тока является наиболее широко применяемым типом электропривода, и развитие его сохранится и в будущем. Исходя из этого, этот тип электропривода без сомнения можно выделить как основной нелинейный потребитель

электроэнергии и главный источник нелинейных искажений в системе электроснабжения завода АТТР.

Для исследования образования и влияния нелинейных искажений, оказываемых регулируемым асинхронным электроприводом на питающую сеть, а также для установления мероприятий по адаптации его электромагнитной совместимости с питающей сетью и другим электрооборудованием, необходимо проведение анализа происходящих процессов во время его работы. Различают некоторые типы частотных приводов, однако, на данном предприятии имеются регулируемые асинхронные электродвигатели с частотным приводом с промежуточным звеном постоянного тока [14].

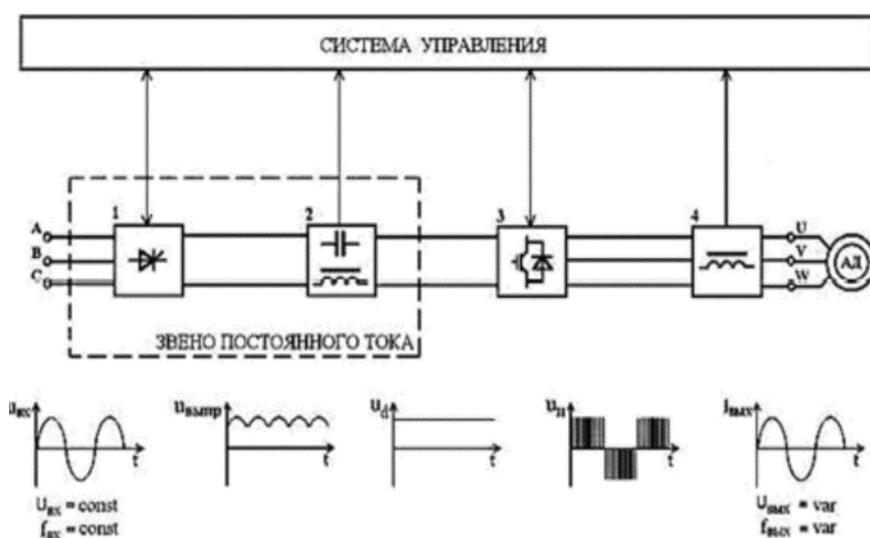


Рисунок 3 – Частотный привод с промежуточным звеном постоянного тока. 1- выпрямитель; 2- LC фильтры; 3- автономный инвертор; 4- выходной фильтр

Первым модулем частотного привода с промежуточным звеном постоянного тока (рисунок 3) является выпрямитель, выполняющий функцию преобразования переменного напряжения и тока, потребляемые из сети электроснабжения, в постоянные. В данном выпрямителе применена схема трехфазного мостового шестифазного выпрямителя Ларионова (рисунок 10). Протекание потока тока в шестифазном выпрямителе осуществляется

моментами открытия и закрытия полупроводниковых(диодных) ключей, и зависит от разности потенциалов прикладываемых к ключам и наличия управляющих сигналов (для управляемых выпрямителей) в каждый момент времени. В результате работы выпрямителя, постоянный ток и напряжение на выходе выпрямителя имеют пульсирующий характер, а переменный ток на входе выпрямителя будет иметь отличную от синусоидальной форму (рисунок 1, 2, В3).

Вторым модулем изучаемого частотного привода являются LC элементы звена постоянного тока. Элементы со стороны выпрямителя являются фильтрами, используемыми для сглаживания пульсаций напряжения и тока на выходе выпрямителя. Элемент со стороны инвертора имеет накопительную емкость звена постоянного тока осуществляющий разряд индуктивности нагрузки при переходных процессах коммутации ключей инвертора, этим он обеспечивает непрерывный процесс обмена энергией между накопительной емкостью звена постоянного тока и индуктивностью нагрузки. Дополнительно благодаря этому элементу инвертор имеет свойства источника напряжения.

Третьим модулем частотного привода является автономный инвертор напряжения, служит для преобразования напряжение звена постоянного тока в переменное напряжение задаваемой частоты и амплитуды для обеспечения необходимого режима работы асинхронного электродвигателя. Основными элементами инвертора, для обеспечения его быстродействие и характеристики, являются полупроводниковые ключи, в качестве которых в настоящее время выступают IGBT (нашем случае) транзисторы.

Важную роль в образовании выходных параметров инвертора играет алгоритм управления транзисторами инвертора. На сегодняшний день применяется множество алгоритмов управления ключами инверторами на основе следующих типов модуляций выходной мощности, основными из которых являются: частотная модуляция (PFM – Pulse Frequency Modulation), широтно-импульсная модуляция (PWM – Pulse Width Modulation), модуляция

плотности импульсов (PDM – Pulse Density Modulation) и амплитудная модуляция (PAM – Pulse Amplitude Modulation). В зависимости от задач инвертора определяется тип модуляции выходных параметров инвертора.

На производстве АТТР наиболее распространена система управления инвертором на основе широтно-импульсной модуляции. Чем выше несущая частота широтно-импульсной модуляции, тем меньше нелинейных искажений, оказывающих влияние на питающую сеть и потребителей, генерирует инвертор. На сегодняшний день используются частоты переключений транзисторов в пределах 10-25 кГц. В итоге, входной ток инвертора содержит и основную гармонику, определяемую заданной выходной частотой инвертора, также и интергармоники и субгармоники, определяемые несущей частотой переключения ключей инвертора.

И последним элементом частотного привода стоит выходной фильтр, он предназначен для сглаживания пульсации выходного напряжения и тока инвертора, которые воздействуют на асинхронной электродвигатель. Применяются выходные фильтры при сильных нелинейных искажениях выходного напряжения инвертора, так как внутренняя индуктивность асинхронного электродвигателя и так выполняет роль сглаживающего фильтра.

2.2 Способы компенсации высокочастотных гармонических составляющих тока и напряжения

Важнейшим вопросом для обеспечения надлежащего уровня качества электрической энергии является проблема снижения уровня высокочастотных гармонических составляющих тока и напряжения.

Применение преобразователей с увеличенной пульсностью выпрямителя нужно для того, чтобы гармонический состав тока, потребляемого из сети выпрямителем, определяется пульсностью схемы выпрямителя. Компенсация высокочастотных гармоник тока происходит по средствам обеспечения

фазовых сдвигов углов тока, протекающих или в расщепленных вентильных обмотках трансформатора, или в сетевых обмотках нескольких трансформаторов, функционирующих на общие шины. Повышение пульсности выпрямителя с 6 до 12 приведет к изменению последовательности гармоник с 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25... в последовательность 11, 13, 23, 25.... В этом случае общее нелинейные искажения выпрямителя уменьшаются примерно в 1,5 раза.

В итоге этот метод является достаточно эффективным методом уменьшения уровня нелинейных искажений, но требуется усложнение схемы выпрямителей, при этом надежность выпрямителя снижается на величину кратную усложнению его схемы, а стоимость увеличивается. Этим методом пользуются в тех случаях, когда требуется избавиться от конкретных гармоник, например 5 и 7. В практике получили наибольшее применение схемы с 12-ти и реже с 24-х пульсными выпрямителями.

Методика специальных алгоритмов переключений в управляемых выпрямителях предназначен для того, чтобы при узком открытии ключей выпрямителя, нелинейные искажения тока, потребляемого выпрямителем, повышаются по сравнению с нелинейными искажениями тока при полностью открытых ключах выпрямителя. Алгоритмы управления направлены на исключение работы ключей в зоне их узкого открытия. Эта методика обеспечивает некоторого снижения общих гармонических искажений в управляемых выпрямителях, однако, при этом усугубляет систему управления.

Способ правильного подключения нелинейных потребителей электроэнергии к питающей сети электроснабжения состоит в том, что так как гармонические искажения увеличиваются с уменьшением мощности короткого замыкания, то нелинейных потребителей электроэнергии нужно подключать к питающей сети, как можно ближе к источникам питания. Этот способ не имеет влияния на компенсацию гармонических искажений, но в свою очередь помогает снизить их негативное влияние на питающую сеть электроснабжения.

Питание нелинейных потребителей электрической энергии осуществляется от отдельных трансформаторов. При этом разделительный трансформатор имеющий обмотки соединенные по схеме «треугольник-звезда». В результате происходит исключение гармоник кратных 3-м. Если нагрузка сбалансирована и влияние несимметрии у нагрузки ослаблено, то соответственно для снижения тока в нейтрали может применяться схема соединения обмоток «зигзаг». Для данной схемы соединения обмоток характерно, что вторичная фазная обмотка разделяется на две части и размещается на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

Существенная доля вышеперечисленных организационно-технических мероприятий по коррекции показателей уровня качества электроэнергии, несинусоидальности напряжения могут быть реализована только лишь на стадии проектирования системы электроснабжения.

Применение способов компенсации высших гармоник тока зависит от ряда факторов:

- вид источника высших гармоник тока, определяется уровень генерируемых гармоник тока по их спектру;
- наличие в системе электроснабжения других ранее установленных средств компенсации нелинейных нагрузок;
- влияние источника гармоник на другие приемники электроэнергии, установленные в системах электроснабжения в непосредственной электрической близости;
- частотные характеристики систем электроснабжения, возможность появления резонансных явлений на частотах генерируемых гармоник.

Фильтрокомпенсирующие устройства считаются как одни из универсальных способов снижения токов и напряжений высокочастотных гармоник в системах электроснабжения. Эти устройства имеют схему последовательного соединения емкостного и индуктивного сопротивлений, настроенных в резонанс или близко к нему на частоту генерируемой гармоники

тока. Пассивные фильтры являются традиционным и наиболее распространенным методом компенсации гармонических составляющих нелинейных потребителей электрической энергии. Правильно настроенный пассивный фильтр полностью потребляет ток гармоники I_n , генерируемый источниками нелинейных нагрузок. Присутствие в реакторе и конденсаторе активных сопротивлений исключает возможность выполнения точной настройки фильтра на соответствующую гармонику. Таким образом, с помощью пассивного фильтра невозможно добиться полной компенсации гармоник. Для полной компенсации гармоник необходимо использовать свой фильтр для каждой гармонической составляющей.

Основное достоинство пассивного фильтра гармоник:

- 1) Простота;
- 2) Отсутствие необходимости технического обслуживания;
- 3) Возможность компенсации реактивной мощности.

Недостатками пассивных фильтров:

- 1) Сложная настройка, которая требует проведения точного анализа гармонического состава конкретного потребителя;
- 2) Большие площади и большие габариты;
- 3) Постоянная генерация реактивной мощности в питающую сеть;
- 4) Снижение эффективности при изменении гармонического состава токов нелинейного потребителя электроэнергии;
- 5) Неполная компенсация спектра гармоник;
- 6) Изменение параметров сети при скачках температуры элементов пассивного фильтра.

При выборе параметров фильтрокомпенсирующего устройства настройка его реактора и конденсаторной батареи на частоту компенсируемой гармоники рассматривается как необходимое условие, которое может быть выполнено при любой емкости конденсаторов. Однако, фильтрокомпенсирующие устройства генерируют на основной частоте реактивную мощность, что следует учитывать

при оценке баланса реактивной мощности. Зачастую на шинах потребителя, имеющего нелинейные электроприемники, устанавливается несколько фильтров, каждый из которых настроен на свою резонансную частоту.

На частотах ниже резонансной частоты фильтр имеет емкостной характер, а при частотах выше резонансной – индуктивный. В связи с этим фильтр высокого порядка для более низких гармоник создает условия для резонанса с индуктивными элементами системы электроснабжения, что приводит к увеличению коэффициента n -й гармонической составляющей, т.е. к ухудшению качества электроэнергии. Фильтр низкого порядка для более высоких гармоник имеет индуктивный характер и не может создавать условий для возникновения резонанса на этих гармониках. Такой фильтр шунтирует более высокие гармоники тока, способствуя улучшению качества электроэнергии.

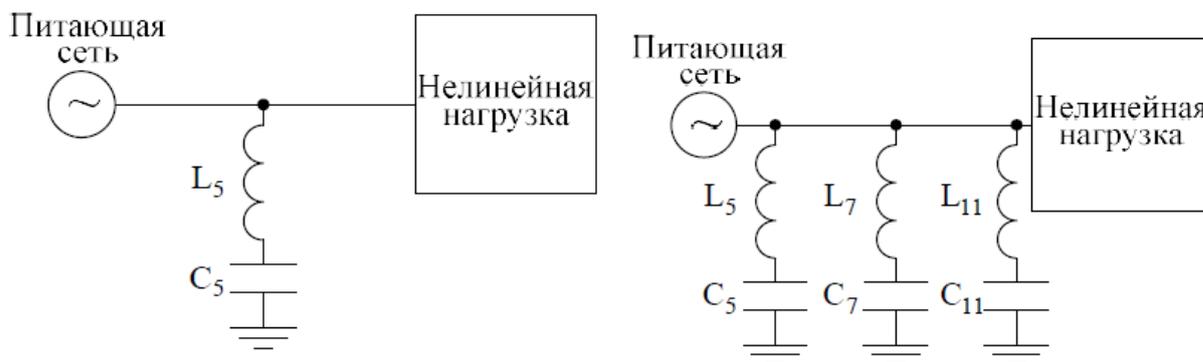


Рисунок 4 - Схемы пассивных фильтров

Дополнительно применяются пассивные фильтры и для коррекции коэффициента мощности индуктивной нагрузки.

Наиболее перспективным техническим средством снижения уровня высших гармоник и обеспечения уровня качества электроэнергии является активный фильтр гармоник. Основные элементы активных фильтров: автономный инвертор (тока или напряжения), накопитель электрической энергии (емкость или индуктивность) и система управления.

Активные фильтры обладают следующими преимуществами:

- эффективная работа активных фильтров в режиме реального времени;
- возможность одновременной компенсации нескольких высших гармоник, что позволяет улучшить массогабаритные показатели аппаратуры;
- возможность полной компенсации высших гармоник напряжения или тока независимо от начальных фаз и амплитуд гармоник;
- возможность наращивания мощности компенсации до необходимого уровня за счет параллельного подключения аналогичных активных фильтров;
- отсутствие резонанса с гармонической частотой;
- отсутствие необходимости подстроек фильтра.

Активные фильтры помогают компенсировать практически полный спектр гармонических составляющих и реактивную мощность, потребляемую из питающей сети электроснабжения, возвращая ее обратно в сеть, лишь тогда, когда это необходимо, предотвращают резонансные явления в питающей сети, помогают сбалансировать несимметрии нагрузки и оказывают влияние на уменьшение фликера.

Активные фильтры имеют большую возможность исключить все недостатки пассивных фильтров и являются наиболее перспективными и эффективными комплексными фильтрокомпенсирующими устройствами. В процессе эволюции активных фильтров гармоник были модернизированы в четыре основных вида включения в схему устройства: последовательные, параллельные, параллельно-последовательные и гибридные (пассивно-активные) фильтрокомпенсирующие устройства.

Активные фильтра сконструированы на основе силовых транзисторов. Благодаря именно такой конструкции активные фильтры компенсируют ток потребляемый резкопеременной нагрузкой и ток обратной последовательности.

Активный фильтр по своей структуре состоит из системы управления и силовой части. Система управления включает в себя контроллер, выделяющий ток гармоник, реагирующий на мгновенные значения тока нагрузки и вырабатывающий сигнал управления силовой частью. Силовая часть при

помощи трансформатора связи выдает компенсирующий ток в противофазе с токами гармоник, в итоге они подавляются в степени, зависимость от коэффициента усиления схемы управления.

Следующий элемент силовой части - это преобразователь на силовой электронике. Данный преобразователь с широтно-импульсной модуляцией выполняет работу как по схеме источника тока так и по схеме источника напряжения. В так называемых чистых активных фильтрах чаще используют преобразователь по схеме источника напряжения с широтно-импульсной модуляцией и накопительным конденсатором как звеном постоянного тока. Именно эта схема, если сравнивать ее со схемой источника тока, имеет преимущество по габаритам, себестоимости и КПД.

Активный фильтр с параллельным подключением к источнику нелинейных нагрузок является регулируемым источником тока и применяется для компенсации гармонических составляющих токов. Параллельный активный фильтр формирует на выходе инвертора мгновенный ток равный по амплитуде и величине мгновенному общему току всех нелинейных искажений, потребляемых из сети нелинейным потребителем электрической энергии, но имеющий противоположную ему фазу.

В процессе своей работы активный фильтр с параллельным подключением практически полностью компенсирует весь спектр гармонических составляющих тока, потребляемых нелинейным потребителем электрической энергии из питающей сети электроснабжения и результирующий ток, потребляемый системой блока «параллельный активный фильтр – нелинейный потребитель электроэнергии» будет образовывать форму в наибольшей степени похожей на синусоидальную.

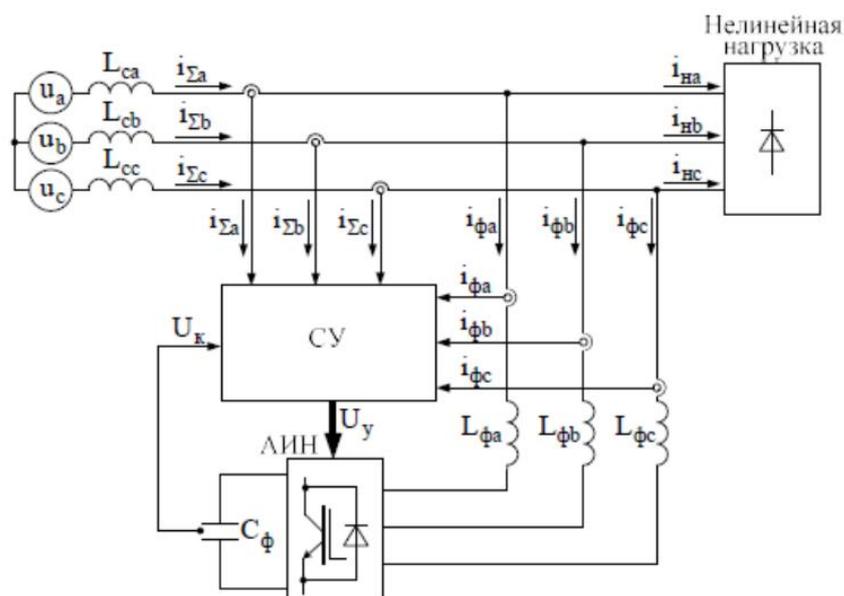


Рисунок 5 - Принципиальная схема подключения параллельного активного фильтра

Параллельный активный фильтр не только компенсирует гармонические составляющие тока но и осуществляет компенсацию реактивной мощности, потребляемой нелинейной нагрузкой из питающей сети.

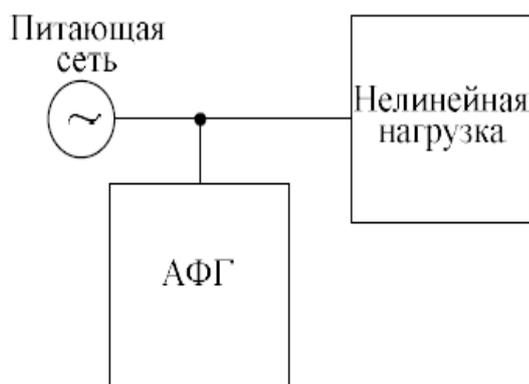


Рисунок 6 - Параллельный активный фильтр

В итоге данное фильтрокомпенсирующее устройство служит для защиты сети электроснабжения от нежелательного влияния нелинейных потребителей электрической энергии.

Последовательный активный фильтр – это источник регулирования напряжения и компенсации нелинейных гармонических искажения

напряжения, а также провалов, колебаний, фликеров, скачков и несимметрий напряжения на входе потребителей электрической энергии. Данное фильтрокомпенсирующее устройство подключается последовательно с потребителем электрической энергии и формирует на выходе инвертора мгновенное напряжение равное по амплитуде искажениям входного напряжения, но имеет противоположную ему фазу. на входное напряжение потребителя электроэнергии воздействуют эти мгновенные компенсирующие напряжения при воздействии согласующего трансформатора и компенсируют искажения входного напряжения потребителя электрической энергии.

В итоге компенсирующих действий на входе потребителя электрической энергии поступает напряжение синусоидальной формы. В результате данное фильтрокомпенсирующее устройство служит для защиты потребителей электроэнергии от некачественного напряжения в сети электроснабжения. Основное преимущество последовательного активного фильтра – это коррекция искаженной формы напряжения не имея значения от природы возникновения искажений.

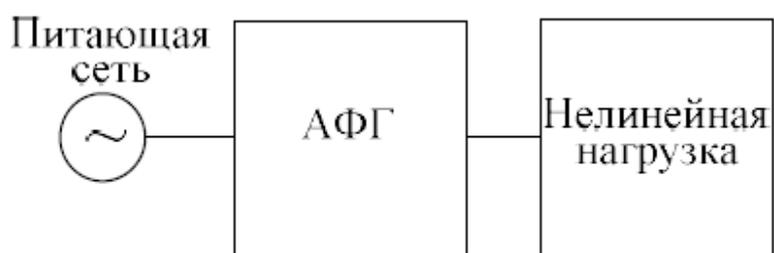


Рисунок 7 - Последовательный активный фильтр

Параллельно-последовательный активный фильтр – это комбинирование параллельного и последовательного активных фильтров, используемых. Такие фильтрокомпенсирующие устройства имеют превосходство, позволяющее компенсировать искажения входного напряжения потребителя электрической

энергии и, одновременно, компенсировать гармонические составляющие тока того же потребителя электрической энергии.

В данной схеме параллельно-последовательный активный фильтр обеспечивает комплексное повышение уровня качества электрической энергии, и при помощи последовательного активного фильтра, он защищает потребителя электрической энергии от паразитного воздействия сети электроснабжения, а при помощи параллельного активного фильтра, он обеспечивает защиту питающей сети от негативного воздействия высокочастотных гармоник и реактивной мощности потребителя электрической энергии. В итоге параллельно-последовательный активный фильтр является унифицированным фильтрокомпенсирующим устройством повышения уровня качества электрической энергии. Существенным недостатком такого фильтрокомпенсирующего устройства - это его высокая стоимость и технически сложная конструкция.

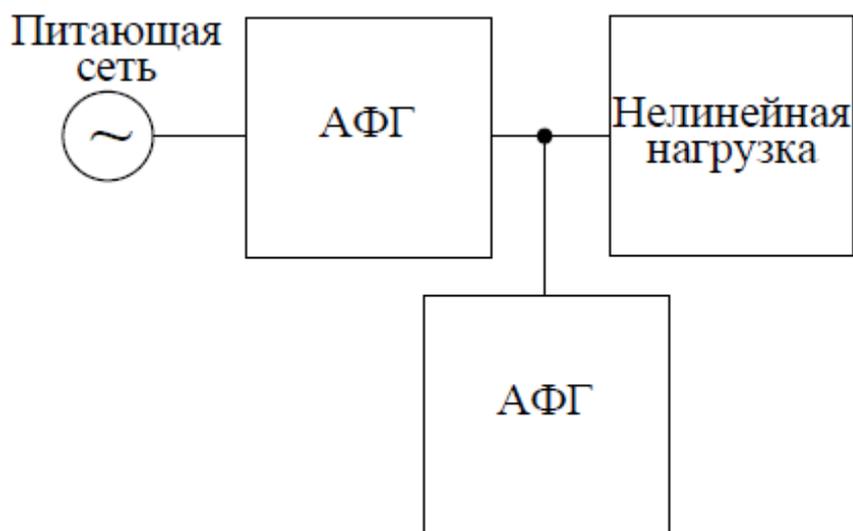


Рисунок 8 - Параллельно-последовательный активный фильтр

Гибридный пассивно-активный фильтр – это комбинирование пассивного и активного фильтра. Так как активные фильтры отличаются своей значительной установленной мощностью, превосходящую несоизмеримо с мощностью потребителя электрической энергии, то цена активных фильтров в

результате самостоятельного использования довольно высока. Гибридные фильтры применяют для возможности снижения мощности и стоимости пассивных и активных фильтров, в сравнении с практическими случаями их отдельного применения, но при этом сохраняется преимущество этих фильтров.

Гибридный фильтр работает таким образом, что пассивный фильтр настраивается на компенсацию одной или нескольких ярко выраженных гармоник тока, потребляемого нелинейным потребителем электрической энергии, а активный фильтр используется или в виде компенсатора остального спектра гармоник тока (параллельный активный фильтр), или компенсатором искажений напряжения питания (последовательный активный фильтр). Недостатком пассивных фильтров можно назвать невозможность управления их параметрами при изменении режима работы нагрузки, подключается в гибридных фильтрах за счет возможности управления реактивными параметрами при помощи активной части схемы. Снижение мощности активной части гибридного фильтра при этом более чем на порядок в сравнении с параллельным активным фильтром. Неустойчивость в динамических режимах работы противоречит высокой добротностью пассивного фильтра.

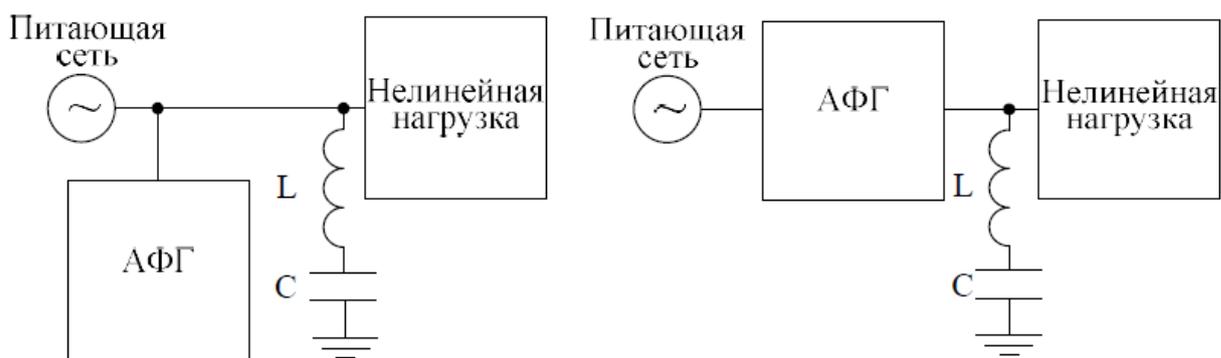


Рисунок 9 - Гибридные фильтры

Вывод

Исходя из проведенного обзора литературных источников, по тематике методов компенсации нелинейных искажений, определены основные виды мероприятий и выбор фильтрокомпенсирующих устройств, произведен анализ их характеристик и областей использования. В итоге проведенных исследований были сформулированы выводы с точки зрения компенсации нелинейных гармонических искажений тока и реактивной мощности нелинейных потребителей наиболее приоритетными представляется использование в диссертационном эксперименте параллельного активного фильтра.

По результатам анализа основных параметров системы управления параллельного активного фильтра и его силовой структуры. В результате проведенного анализа параллельного активного фильтра определена возможность объединения автономного инвертора напряжения параллельного активного фильтра и звена постоянного тока частотного привода электродвигателя переменного тока, и упрощения структуры параллельного активного фильтра путем исключения конденсаторной батареи и синхронизирующей индуктивности из его структуры.

3 Описание элементов системы математическим анализом

3.1 Математический анализ влияния выпрямителя в составе частотного привода на систему электроснабжения

На сегодняшний день, в трехфазной системе электроснабжения наибольшее распространение получила схема шестипульсного мостового выпрямителя Ларионова (рисунок 10), как наиболее простая, надежная и имеющая высокий КПД.

Средневыпрямленное напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя зависит только от параметров входного напряжения и схемы выпрямителя, и не регулируется в процессе его работы.

Анализ результатов, полученных при разложении несинусоидальной пери-одической функции $f(\omega t)$ с периодом 2π и удовлетворяющей условию Дирихле в ряд Фурье, показывает, что если в питающей сети ЭДС синусоидальна, а полное сопротивление нагрузки изменяется во времени, то порядок гармоник потребляемого из сети тока для управляемых выпрямителей (при симметричных сигналах управления) и неуправляемых выпрямителей зависит лишь от пульсности преобразователя p и для любой схемы (при $p > 1$) определяется выражением: $v = kp \pm 1$, где k – ряд положительных целых чисел (1, 2, 3...).

В реальности, при нормальных режимах работы и симметрии трехфазной системы, все четные гармоники компенсируют друг друга, поэтому ограничимся рассмотрением только нечетных гармоник. Поскольку в трехфазных устройствах без нулевого провода, во внешней цепи отсутствуют токи с гармониками кратным трем, то такие гармоники также не учитываем.

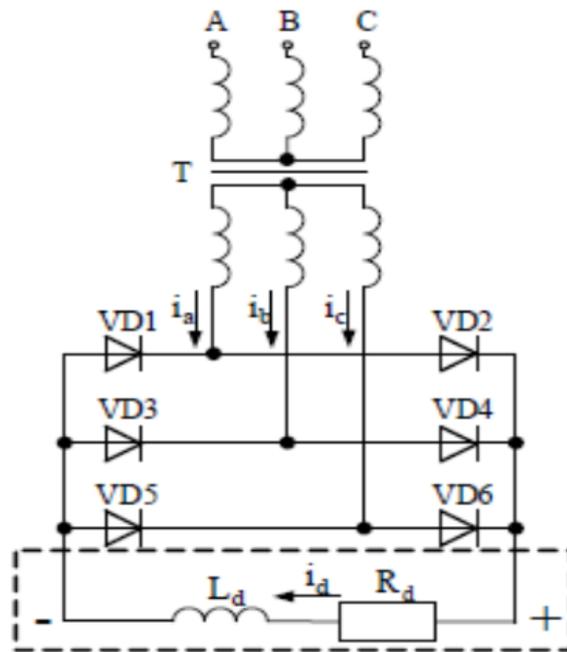


Рисунок 10 – Принципиальная схема трехфазного мостового шестипульсного выпрямителя Ларионова

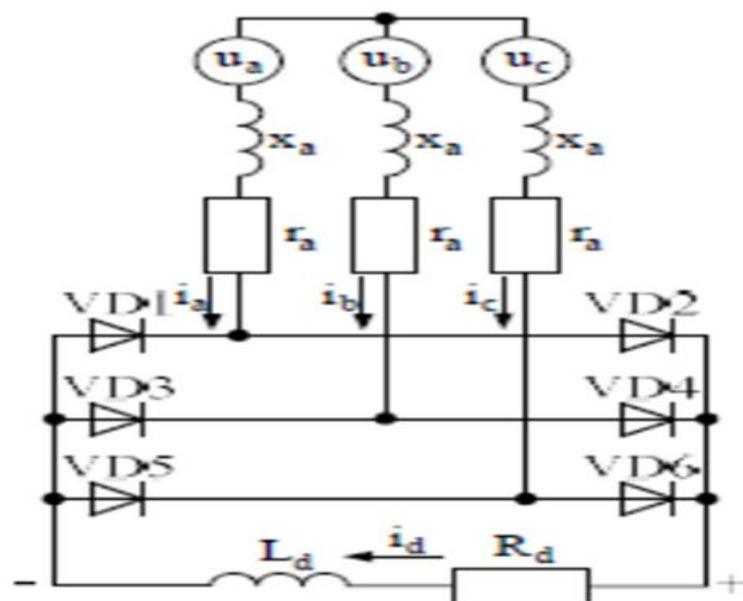
Таблица 1 - Характеристики моста Ларионова

Характеристики эксплуатации выпрямителей Ларионова
1.Значение средневыхрямленного напряжения и тока U_d, I_d .
2. Коэффициент мощности – $\cos \phi$;
3. Коэффициент полезного действия (КПД) – η ;
4.Характеристика выпрямителя внешняя – зависимость $U_d=f(I_d)$;
5.Характеристика регулировочная для управляемых выпрямителей $U_d=f(\alpha)$, где α - угол управления (регулирования);
6.Коэффициент пульсаций: $K_{\text{п}} = \frac{U_{m(q)}}{U_d}$ где q – номер гармоники,
U_m – амплитуда напряжения.
7.Коэффициент искажения: $V = \frac{I_{1(1)}}{\sqrt{I_{1(1)}^2 + I_{1(2)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2 + \dots}}$

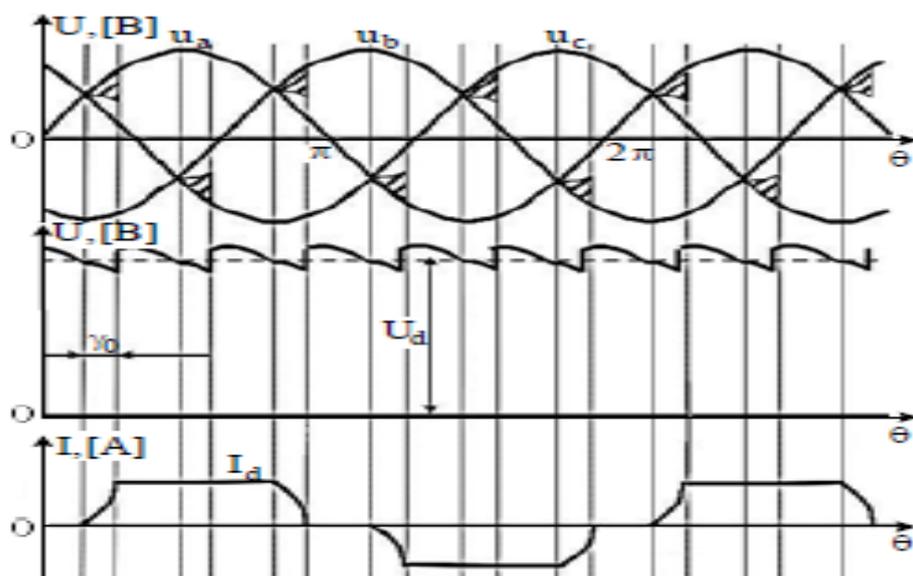
Продолжение таблицы 1

где $I_1(1)$ – действующее значение основной гармоники первичной обмотки
трансформатора, $\overline{I_{1(1)}^2 + I_{1(2)}^2 + \dots + I_{1(q)}^2} + \dots$ - полный ток первичной обмотки
трансформатора.
8. Длительность и величина протекания допустимого прямого тока перегрузки.
9. Экономические и эксплуатационные характеристики вентиляей: срок службы, стоимость и надёжность.

Для количественной оценки гармонического состава тока, выпрямителя (рисунок 10), преобразуем его схему в эквивалентную схему (рисунок 11 а), приняв следующие допущения: индуктивность контура выпрямленного тока, является бесконечно большой ($L_d = \infty$), учитываем влияние индуктивности рассеивания входного трансформатора ($L_a \neq 0$), учитываем индуктивное сопротивление фаз трансформатора ($x_a \neq 0$), активное сопротивление фаз трансформатора не учитываем ($r_a = 0$), ключи считаем идеальными.



а



б

Рисунок 11 – Эквивалентная схема и графики мгновенных напряжений и тока трехфазного шестипульсного неуправляемого мостового выпрямителя

При учете индуктивности рассеяния трансформатора на коммутационном участке кривой первичного тока неуправляемого выпрямителя появляется интервал естественной коммутации γ_0 , на вне коммутационном участке характер первичного тока неуправляемого выпрямителя определяется

индуктивностью нагрузки и при $L_d = \infty$ является идеально сглаженным (рисунок 11 б). Тогда амплитуду ν -й гармоники первичного тока неуправляемого выпрямителя (рисунок 3 а) определим по выражению:

$$A_{\nu m} = I_{\nu m} = \sqrt{U_{\nu m}^2 + U_{\nu m}^2} \quad (3)$$

Коэффициенты ряда Фурье для выпрямителя примут вид:

$$a_{\nu m} = \frac{2\sqrt{3E_m}}{\nu\pi x_a} \sin \frac{\nu\pi}{3} \left[\frac{1}{\nu+1} \sin \left(\alpha + 1 \frac{\gamma_0}{2} \right) \sin \left(\alpha + 1 \right) \psi - \frac{1}{\nu-1} \sin \left(\alpha - 1 \frac{\gamma_0}{2} \right) \sin \left(\alpha - 1 \right) \psi \right] \quad (4)$$

$$b_{\nu m} = \frac{2\sqrt{3E_m}}{\nu\pi x_a} \sin \frac{\nu\pi}{3} \left[\frac{1}{\nu+1} \sin \left(\alpha + 1 \frac{\gamma_0}{2} \right) \sin \left(\alpha + 1 \right) \psi + \frac{1}{\nu-1} \sin \left(\alpha - 1 \frac{\gamma_0}{2} \right) \sin \left(\alpha - 1 \right) \psi \right] \quad (5)$$

, где E_m – амплитуда ЭДС питающей энергосистемы, $\psi = \frac{\gamma_0}{2}$ – угол сдвига по фазе между кривыми ЭДС и первой гармоникой сетевого тока.

При анализе гармонического состава тока и напряжения в большинстве случаев интерес представляет отношение амплитуды искомой гармоники к амплитуде основной гармоники, поэтому при количественном определении гармонического состава тока удобнее производить расчет амплитуды ν -ой гармоники тока по отношению к амплитуде первой гармоники. Для неуправляемых выпрямителей амплитуда ν -ой гармоники тока в относительных единицах определяется по выражению:

$$\frac{I_{\nu}}{I_1} = \frac{\sin \left[\left(\alpha - 1 \frac{\gamma_0}{2} \right) \right]}{\nu \sin \left(\alpha - 1 \frac{\gamma_0}{2} \right)} \quad (6)$$

, где I_{ν} – ток ν -й гармоники, I_1 – ток первой гармоники.

Для приближенного определения амплитуды ν -ой гармоники в относительных единицах можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\frac{I_\nu}{I_1} = \frac{1}{\nu} \quad (7)$$

Если принять, что мгновенная мощность равна:

$$p(\omega t) = f^2(\omega t) = \left[A_0 + \sum_{\nu=1}^{n=\infty} A_{\nu m} \sin(\omega t + \psi_\nu) \right]^2 \quad (8)$$

То активная мощность равна среднему значению мгновенной мощности:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T f^2(\omega t) dt \quad (9)$$

В результате полученный интеграл можно разложить на ряд интегралов, определяющих средние мощности отдельных гармоник:

$$A_0^2 + \sum_{\nu=1}^{n=\infty} (a_{\nu m}^2 + b_{\nu m}^2) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^2(x) dx \quad (10)$$

На рисунке 12 представлены графики мгновенных значений напряжений и первичных токов для управляемого мостового выпрямителя. Произведем расчет амплитудных значений гармоник первичного тока управляемого выпрямителя с учетом влияния углов коммутации γ и угла управления α при нормальном режиме работы ($\gamma > \pi/3$).

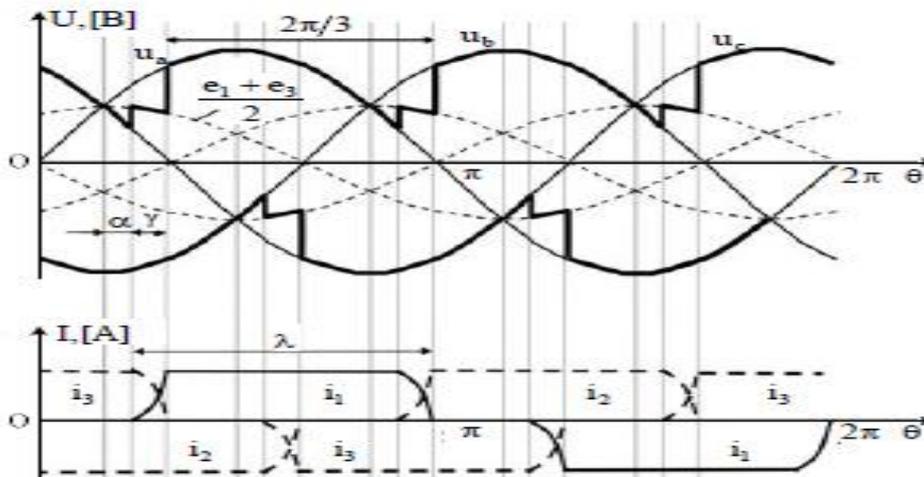


Рисунок 12 - Графики мгновенных значений напряжений и первичных токов

В общем, с учетом принятых допущений, изменение тока на интервале коммутации определяется с помощью выражения:

$$i_1 = \frac{\sqrt{3E_m}}{2x_a} (\cos \alpha - \cos \theta) \quad (11)$$

Кривая первичного фазного тока управляемого выпрямителя по прошествии половины периода может иметь вид четырех интервалов:

$$i_1 = 0, \theta = \begin{matrix} \left(\alpha + \gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \left(\alpha - \frac{\pi}{3} \right) \end{matrix} \quad (12)$$

$$i_1 = \frac{\sqrt{3E_m}}{2x_a} \left[\cos \alpha - \cos \left(\theta + \frac{\pi}{3} \right) \right], \theta = \begin{matrix} \left(\alpha - \frac{\pi}{3} \right) \\ \left(\alpha - \frac{\pi}{3} + \gamma \right) \end{matrix} \quad (13)$$

$$i_1 = i_d, \theta = \begin{matrix} \left(\alpha + \gamma - \frac{\pi}{3} \right) \\ \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \end{matrix} \quad (14)$$

$$i_1 = \frac{\sqrt{3E_m}}{2x_a} \left[\cos \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) - \cos (\alpha + \gamma) \right], \theta = \begin{matrix} \left(\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \\ \left(\alpha + \frac{\pi}{3} + \gamma \right) \end{matrix} \quad (15)$$

Тогда амплитудное значение гармоники первичного тока управляемого выпрямителя можно представить в виде:

$$I_{vm} = \frac{2\sqrt{3E_m}}{v\pi x_a} \left| \sin \frac{v\pi}{3} \right| \sqrt{k_{k1} + k_{k2} \sin^2 \psi} \quad (16)$$

, где $\psi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$

Полученное выражение обращается в нуль только при v кратным трем, что свидетельствует о отсутствии гармоник кратных трем, в спектре. С учетом

этого значение амплитуды ν -й гармоники первичного тока может быть представлено выражением:

$$I_{\nu m} = \frac{3E_m}{\nu\pi x_a} \sqrt{k_{k1} + k_{k2} \sin^2 \psi} \quad (17)$$

, где k_{k1} , k_{k2} – коэффициенты являющиеся функциями угла коммутации и зависимы от порядка гармоники тока:

$$k_{k1} = \left[\frac{\sin \left[\mu - 1 \frac{\gamma}{2} \right]}{\nu - 1} - \frac{\sin \left[\mu + 1 \frac{\gamma}{2} \right]}{\nu + 1} \right]^2 \quad (18)$$

$$k_{k2} = 4 \left[\frac{\sin \left[\mu - 1 \frac{\gamma}{2} \right]}{\nu - 1} \times \frac{\sin \left[\mu + 1 \frac{\gamma}{2} \right]}{\nu + 1} \right] \quad (19)$$

В итоге уравнение для определения амплитуды основной гармоники тока, потребляемого выпрямителем, примет будет выглядеть:

$$I_{1m} = \frac{3E_m}{2\pi x_a} \sqrt{\mu - \sin^2 \gamma + 4\gamma \sin \gamma \sin^2 \psi} \quad (20)$$

Для сложения гармоник тока, генерируемых отдельными нелинейными источниками необходимо учитывать угол сдвига фаз между ЭДС и основной гармоникой первичного тока выпря

$$\varphi_1 = \arctg \left[\left(1 + \frac{\gamma - \sin \gamma}{2 \sin \gamma \sin^2 \psi} \right) \operatorname{tg} \psi \right] \quad (21)$$

Из проведенного математического анализа работы управляемого выпрямителя следует для расчета гармонического состава тока нужно найти неизвестный интервал коммутации γ :

$$\gamma = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2x_a I_d}{\sqrt{3E_m}} \right) - \alpha \quad (22)$$

Если, в процессе работы выпрямителя, величины индуктивности L_d достаточно для накопления определенного количества энергии на промежутке времени при $U_d > 0$, при заданной мощности нагрузки, для того, чтобы обеспечить непрерывное протекание выпрямленного тока в цепи нагрузки при переключении полупроводниковых элементов, то на протяжении всего периода протекания выпрямленного тока, будет иметь место режим работы выпрямителя с непрерывным током I_d .

Режим работы выпрямителя, когда ток в полупроводниковых элементах спадает до нуля в моменты переключения полупроводниковых элементов, является граничным режимом выпрямленного тока I_d (рисунок 13б). Если, величины индуктивности L_d , недостаточно для накопления определенного количества энергии на промежутке времени при $U_d > 0$, при заданной мощности нагрузки, для того, чтобы обеспечить непрерывное протекание выпрямленного тока в цепи нагрузки при переключении полупроводниковых элементов, то выпрямленный ток I_d в цепи нагрузки спадет до нуля раньше, чем включится следующий полупроводниковый элемент, и такой режим работы выпрямителя является режимом прерывистого выпрямленного тока.

При одинаковых параметрах выпрямителей величина средневых выпрямленного напряжения U_d в режиме прерывистого тока будет больше, а качество выпрямленного напряжения лучше, по сравнению с режимом непрерывного тока из-за уменьшения отрицательного участка в кривой выпрямленного напряжения.

Рассматривая режим прерывистого тока трансформатора и полупроводниковые элементы выпрямителя функционируют в утяжеленном режиме, и так при одной и той же функции выпрямленного тока действующее значение токов в элементах схемы увеличивается, и при таком значении существенно увеличивается содержание гармонических составляющих

первичного тока выпрямителя, возрастают потери в цепи выпрямленного тока, ухудшается регулировочная характеристика и понижается коэффициент передачи выпрямителя. В целом, в режиме прерывистого тока, ухудшаются все основные характеристики выпрямителя (за исключением быстродействия), и такой режим является неблагоприятным режимом работы выпрямителя.

Сократить зону прерывистых токов можно увеличением значения индуктивности L_d , увеличением эквивалентного числа фаз выпрямляемого напряжения и ограничением максимального значения угла регулирования α в управляемых выпрямителях. Для управляемого выпрямителя граница перехода к непрерывному выпрямленному току характеризуется углом ψ :

$$\psi = \arctg \frac{X_d}{R_d} \quad (23)$$

при $\alpha \leq \psi$ – непрерывный ток, а при $\alpha > \psi$ – прерывистый ток

Энергетические характеристики выпрямителя позволяют оценить эффективность потребления и преобразования электрической энергии.

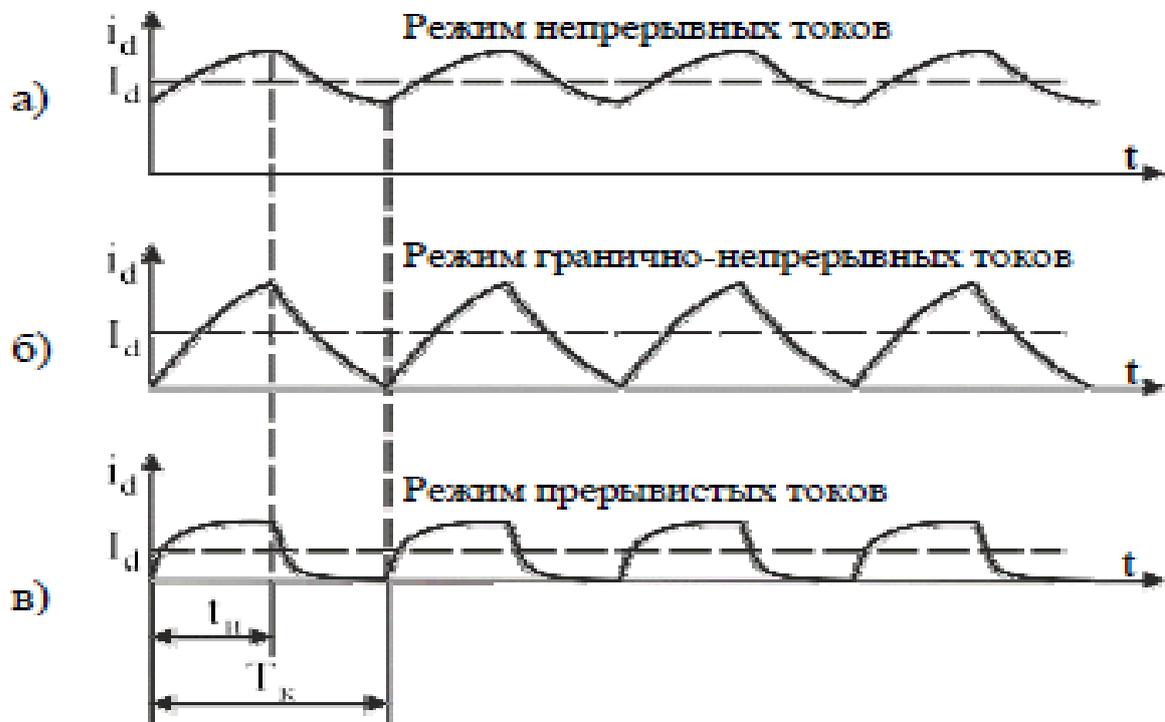


Рисунок 13 – Режимы работы выпрямителя

Активная мощность, потребляемая выпрямителем из питающей сети, равна:

$$P = P_{do} \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (24)$$

, где $P_{do} = E_{do} * I_d$ – максимальная расчетная мощность на стороне выпрямленного напряжения. При выделении из первичного тока выпрямителя тока первой гармоники, то он сдвигается в сторону отставания на условную величину угла φ , приближенный к углу управляющими ключами, по отношению к напряжению питающей сети, исходя из этого, из питающей сети выпрямитель потребляет не только активную мощность, но и реактивную мощность:

$$Q = P_{do} \sin\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (25)$$

При гармонически насыщенном первичном токе выпрямителя, энергия потребляемая из питающей сети переменного тока в звено постоянного тока поступает только током первой гармоники, а токи высокочастотных гармоник генерируют мощность искажения H . Мощность первой гармоники:

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2} = P_{do} \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (26)$$

Выражение полной мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H} = \frac{P}{\left(K_H \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right)\right)} = \frac{P_{do} \cos\frac{\gamma}{2}}{K_H} \quad (27)$$

, где K_H – коэффициент искажения потребляемого из сети тока. Тогда коэффициент мощности и КПД выпрямителя примут вид:

$$K_M = \frac{P}{S_1} = K_H \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right) \quad (28)$$

$$\eta = \frac{P_{нагр}}{P_{нагр} + \Delta P} = \frac{U_d}{U_d + U_o + I_d \left(R_{a\Sigma} + r_{\Gamma\Sigma} + R_{op} \right)} \quad (29)$$

3.2 Влияние инвертора в составе частотного привода переменного тока на систему электроснабжения

Автономные инверторы подразделяются на инверторы напряжения, инверторы тока и резонансные инверторы — по способу формирования и поддержания выходных характеристик. В настоящее время, в составе современных частотных приводов асинхронного электродвигателя переменного тока, наибольшее распространение получили автономные инверторы напряжения. Основной отличительной характеристикой инвертора отметим формирование выходного напряжения заданной амплитуды и частоты, а параметры тока зависят от величины составляющих нагрузки. Характеристики и характер потребляемого инвертором первичного тока определяются его структурой и алгоритмом управления моментами переключения управляемых полупроводниковых ключей — транзисторов VT1–VT6. Алгоритмы управления бывают однократной и многократной коммутации.

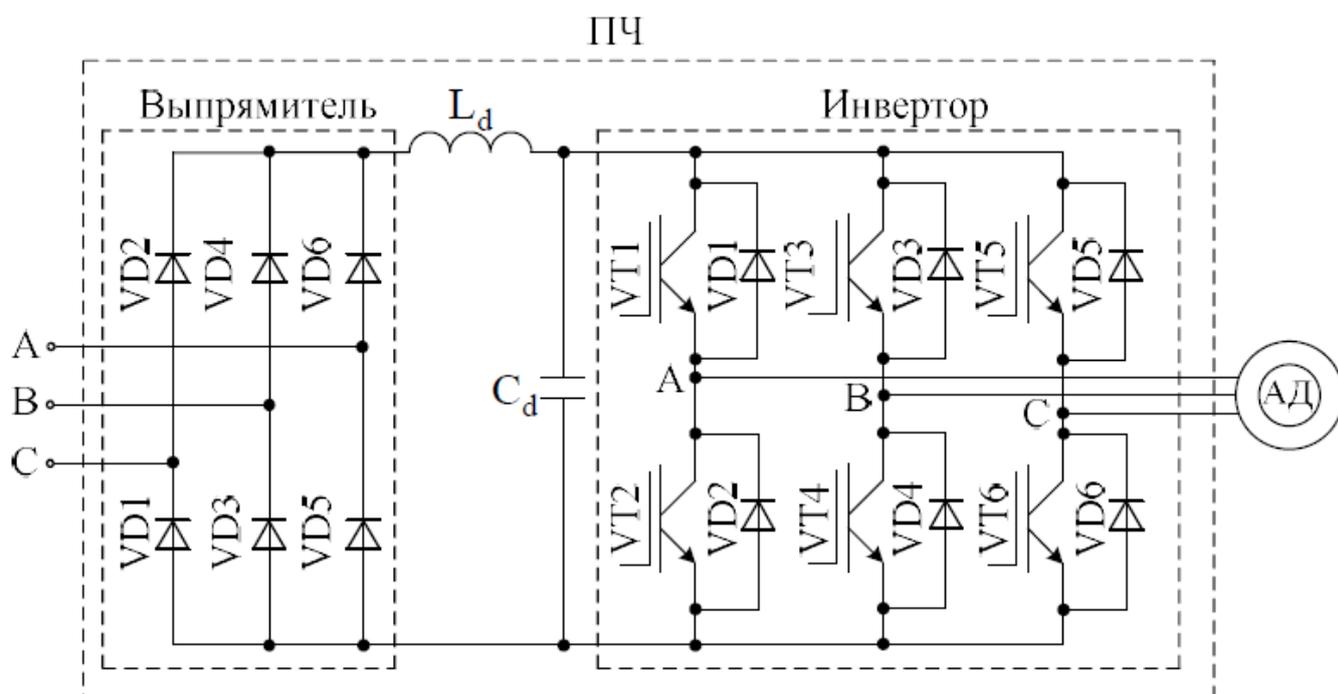


Рисунок 14 – Схема частотного привода

В алгоритмах с однократной коммутацией, соответствующие управляемые полупроводниковые элементы включаются один раз на протяжении всего времени протекания через них тока, при этом выходное напряжение и ток инвертора имеет прямоугольный вид. Использование многократной коммутации тока/напряжения инвертора в течение одного периода, позволяет получить форму выходного тока приближенную к синусоидальной.

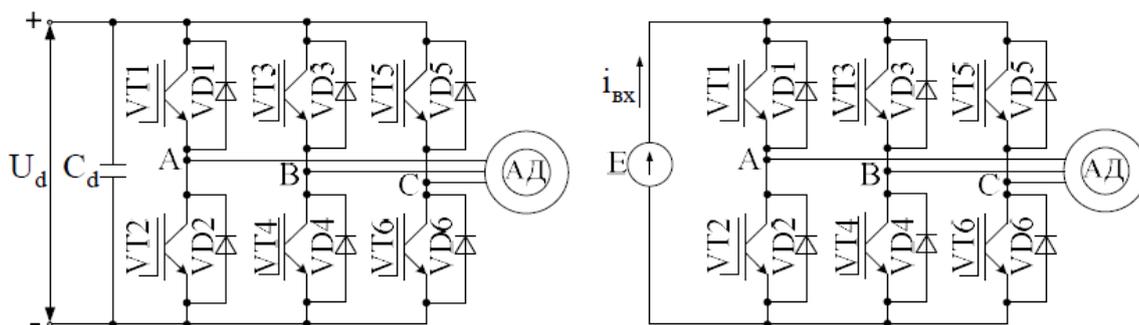


Рисунок 15 – Схема частотного привода с широтно-импульсной модуляцией

Наиболее распространены алгоритмы многократной коммутации на основе разновидностей широтно-импульсной модуляции. Рассмотрим нелинейные искажения первичного тока инвертора, создаваемые системой «автономный инвертор напряжения с широтно-импульсным управлением – асинхронный двигатель». Сложность определения гармонического состава первичного тока системы «инвертор – двигатель» заключается в пульсирующем токе непростой формы с гармониками, состав и величины которых зависят от режима работы системы «инвертор – двигатель».

Если в асинхронном двигателе обмотка статора представлена в виде трехфазной звезды с изолированной нейтралью, то магнитной связи между обмоткой ротора и статором, обтекаемым гармоническим током, обусловлено влияние на электромагнитные процессы. Коммутация полупроводниковых управляемых элементов VT1–VT6 неминуемо приводит к тому, что при

вращении ротора в асинхронном электродвигателе проходит цикл непрерывных переходных процессов. В расчетных данных будем использовать ряд допущений: угловая частота Ω широтно-импульсная модуляция и угловая частота ω основной гармоники фазного тока являются постоянными; параметры электродвигателя не меняем (учитываем насыщения и производим выбор параметров, соответствующих насыщенному состоянию электродвигателя); частота вращения двигателя постоянная; обмотки статора и ротора двигателя симметричны; управляемые полупроводниковые элементы VT1–VT6 являются идеальными (переход из открытого состояния в закрытое и обратно происходит мгновенно); не учитываем активные сопротивления; входное постоянное напряжение автономного инвертора считается неизменным.

При вращении ротора полупроводниковые элементы VT1-VT6 коммутируются так, что намагничивающая сила статора за один оборот двухполюсного ротора принимает шесть положений и первичный ток инвертора можно выразить формулой:

$$i^* = I_0^* + \sum_{\nu} \left[a_{\nu m}^* \cos(\nu \omega t) + b_{\nu m}^* \sin(\nu \omega t) \right] \quad (30)$$

Коэффициенты синусной и косинусной составляющих тригонометрического ряда выразим:

$$a_{\nu m}^* = \frac{6}{\pi \sqrt{1 - \nu^2}} \cos \varphi_1 \quad (31)$$

$$b_{\nu m}^* = \frac{6}{\pi \sqrt{1 - \nu^2}} \left[\nu \sin \varphi_1 - I_k^* \left(\frac{\pi^2 \sqrt{1 - \nu^2}}{\nu} + \nu \right) \right] \quad (32)$$

Амплитуда ν -ой гармоники первичного тока инвертора

$$I_{\nu m}^* = \sqrt{a_{\nu m}^{*2} + b_{\nu m}^{*2}} \quad (33)$$

Постоянная составляющая первичного тока инвертора

$$I_0^* = \frac{3}{\pi} \cos \varphi_1 \quad (34)$$

Начальный угол ν -ой гармоники первичного тока инвертора

$$\psi_\nu = \arctg \frac{\cos \varphi_1}{\nu \sin \varphi_1 - I_k^* \left(\frac{\pi^2 (-\nu^2)}{9\nu} + \nu \right)} \quad (35)$$

, где I_k^* - относительное значение тока короткого замыкания асинхронного двигателя.

$$I_k^* = \frac{U_{1m}}{I_{1m} \omega L_k} \quad (36)$$

, где U_{1m} и I_{1m} амплитудное значение фазных напряжения и тока двигателя, а L_k фазная индуктивность к.з.

С увеличением скорости вращения двигателя до номинальной, его фазное напряжение U_{1m} увеличивается прямо пропорционально его угловой частоте ω , поэтому соотношение I_k^* остается постоянным. При увеличении скорости двигателя выше номинальной, его угловая частота ω тоже возрастает, а напряжение U_{1m} остается постоянным, исходя из этого отношение I_k^* убывает обратно пропорционально угловой частоте ω . В этом случае, увеличиваются частоты ($\nu\omega$) высших гармоник первичного тока и снижается их амплитуды.

Следуя принципам работы автономного инвертора, для определения величины гармонических составляющих первичного тока инвертора, допустим, что управляемые полупроводниковые элементы VT1–VT6 инвертора коммутируются синхронно по двум алгоритмам, один из которых формируется несущей частотой широтно-импульсного модулятора, а другой – формирует частоту выходного напряжения автономного инвертора. Тогда ШИМ-импульсы следуют с частотой Ω , а результирующее выходное напряжение формируется с угловой частотой ω . Несущая частота Ω , формирующая ШИМ-импульсы,

значительно выше выходной частоты инвертора (ω) и обычно составляет от единиц до десятков килогерц. Тогда первичный ток инвертора содержит гармоники с частотами: $v\omega$ ($v = 6, 12, 18 \dots$), $k\Omega$ ($k = 1, 2, 3 \dots$), $v\omega + k\Omega$, $v\omega - k\Omega$. Амплитуды таких гармоник изменяются в зависимости от режима работы электродвигателя, поэтому в общем виде задача сводится к определению верхнего и нижнего предела изменения их амплитуд. Следуя вышеизложенному выведем аналитическое выражение для соотношения $\Omega\omega$. проведем разложение в ряд Фурье коммутационной функции широтно-импульсной модуляции(ШИМ):

$$\psi_{\text{ШИМ}} = \mu + \frac{2}{\pi_k} \sum_{k=1,2,3..}^{\infty} \frac{\sin(\mu\pi)}{k} \cos[\Omega t - \beta] \quad (37)$$

, где Ω – угловая частота работы ШИМ; μ - коэффициент заполнения импульса в пределах периода $T = \frac{2\pi}{\Omega}$; k – порядок гармоники($k=1,2,3 \dots$); β – начальный угол;

Гармонический состав первичного тока инвертора прямо пропорционален значению относительной частоты вращения и коэффициента нагрузки двигателя и обратно пропорционален отношению мощности к.з. сети к номинальной мощности асинхронного двигателя.

Из проведенного математического анализа следует, что в гармоническом составе первичного тока инвертора содержится два типа основных групп гармоник. Первый тип гармоник тока автономного инвертора определяет формирование в первичном токе инвертора гармоник с частотами $v\omega$. Порядок этих гармоник определяется электрической схемой инвертора и основной частотой ω выходного напряжения инвертора. Второй тип основной группы гармоник тока автономного инвертора определяет формирование в первичном токе инвертора гармоник с частотами $k\Omega$. Порядок этих гармоник определяется несущей частотой Ω широтно-импульсной модуляции. Поскольку основные группы гармоник первого и второго типа формируются одновременно в

результате переключений полупроводниковых элементов VT1–VT6 инвертора, то в каждый момент времени, эти гармоники взаимодействуют между собой, образуя, еще два типа дополнительной группы гармоник $v\omega + k\Omega$ и $v\omega - k\Omega$. В результате, все гармоники первичного тока инвертора, возникающие в результате его работы с управлением широтно-импульсного модулятора, образуются одновременно гармонический спектр в котором относительно гармоник основной группы с частотами $v\omega$ и $k\Omega$, находятся в процессе формирования дополнительно возникающие боковые гармоники с частотами $(v\omega + k\Omega)$ и $(v\omega - k\Omega)$. С увеличением несущей частоты широтно-импульсной модуляции, частотный спектр данных гармоник смещается в высокочастотную область, а амплитуда снижается.

Применение управления с широтно-импульсным модулятором автономного инвертора вытесняет гармонический состав его первичного тока в высокочастотную область и обеспечивает наименьший суммарный коэффициент гармонических составляющих первичного тока. В основном амплитуды высших гармоник первичного тока второго типа основной группы и гармоники дополнительной группы не превышают 0,5 % значения амплитуды основной гармоники выходного напряжения автономного инвертора, но, в условиях резонанса могут возникнуть и большие значения.

Также как и распределение мощности в выпрямителе, при гармонически насыщенном первичном токе инвертора, потребляемая энергия из звена постоянного тока в нагрузку передается только током первой гармоники, а токи высших гармоник создают мощность искажения. Определяем текущие значения мощности автономного инвертора напряжения:

$$P = \frac{1}{N} \sum_N i_n u_n \quad (38)$$

$$S = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{N/2} u_n^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N i_n^2} \quad (39)$$

, где N – число дискретных измерений электрических величин за период основной частоты выходного напряжения инвертора; n – текущий дискретный номер.

Находим полную мощность автономного инвертора напряжения по выражению:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2} \quad (40)$$

, где P – активная мощность; Q – реактивная мощность; T – мощность искажения.

Автономный инвертор напряжения воспроизводит в сеть электроснабжения активную и употребляет из сети реактивную мощность. Употребляемая этой системой реактивная мощность имеет достаточно большой объем и нередко составляет 50–60 % активной мощности. Интересно, что инвертор с широтно-импульсной модуляцией не вносит дополнительного фазового сдвига первой гармоники тока на входе, а этот сдвиг зависит только от фазового угла активно-индуктивной нагрузки. Значимость образующих мощности инвертора имеют связанность с коэффициентами мощности нагрузки, при этом выходной коэффициент его мощности будет отличен от коэффициента мощности нагрузки. При одинаковых величинах этих коэффициентов система вероятно будет направлять наивысшую полную мощность в нагрузку при номинальной активной мощности.

Коэффициент нелинейности выведем через коэффициент искажения синусоидальности тока:

$$K_{НИ} = \frac{1}{\sqrt{1 + K_{ui}^2}} \quad (41)$$

, где K_{ui} - коэффициент искажения синусоидального тока.

$$K_{ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} I_n^2}}{I_1} \quad (42)$$

Коэффициент мощности характеризует эффективность потребление энергии инвертора и выражается как отношение активной мощности к полной:

$$K_M = \frac{P}{S} = \cos\varphi_1 K_{HI} \quad (43)$$

, где φ_1 - фазовый сдвиг между первыми гармониками тока и напряжения.

Алгоритмы управления автономного инвертора можно разделить на алгоритмы однократной коммутации и алгоритмы многократной коммутации. В алгоритмах с однократной коммутацией, соответствующие управляемые полупроводниковые элементы включаются один раз на протяжении всего времени протекания через них тока, при этом выходное напряжение и ток автономного инвертора имеет прямоугольный вид.

Использование алгоритмов с многократной коммутацией управляемых полупроводниковых элементов автономного инвертора на интервале одного периода, позволяет получить форму выходного тока автономного инвертора приближенную к синусоидальной. Наибольшее распространение среди алгоритмов многократной коммутации получили системы управления на основе различных методов широтно-импульсной модуляции.

3.3 Влияние частотного преобразователя в составе асинхронного электродвигателя переменного тока на систему электроснабжения

В процессе математического анализа влияния регулируемого асинхронного электродвигателя на питающую сеть были исследованы нелинейные искажения токов в сети питания, а также потребляемая реактивная мощность, выпрямителя и инвертора, в составе частотного привода с общим звеном постоянного тока. Исходя из структуры частотного привода с общим звеном постоянного тока выходит, что входным элементом частотного привода

является выпрямитель и гальванически связывает его с сетью электроснабжения.

Так как, выпрямитель является нелинейным элементом, повсеместно употребляет несинусоидальный первичный ток из питающей сети. Инвертор в свою очередь – выходной элемент частотного привода и имеет гальваническую связь с питающей сетью только через звено постоянного тока и выпрямителя. В таком случае гармонический состав первичного тока частотного привода с общим звеном постоянного тока будем производить расчет, как с суммой гармонических колебаний первичного тока инвертора и первичного тока выпрямителя.

$$v_{xB} \left(\right) = I_{mx} \cos(\omega_x t + \varphi_x); y_{yII} \left(\right) = I_{my} \cos(\omega_y t + \varphi_y) \quad (44)$$

Суммирование двух гармонических колебаний одинаковой частоты и направления ($\omega_x = \omega_y = \omega$) осуществляется методом векторных диаграмм. А начальную фазу функции и амплитуду результирующего гармонического колебания $v_{zIII} \left(\right)$ определим методом суммирования векторов соответствующих гармоник I_{mx} и I_{my} для момента времени t .

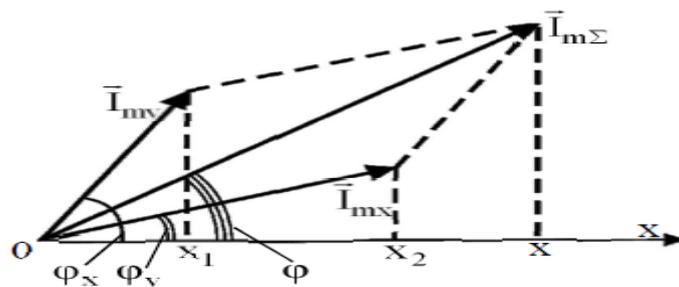


Рисунок 16 - График суммирования векторов

$$I_{m\Sigma} = \sqrt{I_{mx}^2 + I_{my}^2 + 2I_{mx}I_{my} \cos(\varphi_y - \varphi_x)} \quad (45)$$

, где $I_{m\Sigma}$ - амплитуда гармоники результирующей функции $v_{zIII} \left(\right)$.

Определим разность фаз φ результирующей функции $v_{zIII} \left(\right)$:

$$\varphi = \arccos \frac{I_{m\Sigma}^2 - I_{mx}^2 - I_{my}^2}{2I_{mx}I_{my}} \quad (46)$$

Сумма этих гармонических колебаний записывается в виде функции:

$$v_{zIII} = I_{m\Sigma} \cos(\omega t + \varphi) \quad (47)$$

Если разница начальных фаз функций v_{xB} и v_{yII} суммируемых гармонических колебаний будет соответствовать условиям

$$\begin{cases} \varphi = \varphi_y - \varphi_x = 0 \\ \varphi = \varphi_y - \varphi_x = 2\pi n, n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (48)$$

то $\cos(\varphi_y - \varphi_x) = 1$, и амплитуда гармоники примет вид:

$$I_{m\Sigma} = \sqrt{I_{mx}^2 + I_{my}^2 + 2I_{mx}I_{my}} = I_{mx} + I_{my} \quad (49)$$

В результате складываемые и результирующая гармоники станут синфазны суммарная амплитуда гармоник возрастет. Когда разница начальных фаз функций v_{xB} и v_{yII} суммы гармонических колебаний удовлетворяет условию $\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \pi(n+1), n = 1, 2, 3, \dots$ то $\cos(\varphi_y - \varphi_x) = -1$ и амплитуда гармоники примет вид:

$$I_{m\Sigma} = \sqrt{I_{mx}^2 + I_{my}^2 - 2I_{mx}I_{my}} = |I_{mx} - I_{my}| \quad (50)$$

В итоге, исходные гармоники находятся в противофазе и суммарная амплитуда гармоник снизится. Если частоты складываемых гармонических колебаний не одинаковы $\omega_x t \neq \omega_y t$, то результирующий вектор $I_{m\Sigma}$ будет иметь изменяющуюся величину, и вращаться с непостоянной скоростью, а результирующее колебание будет выглядеть как сложный колебательный процесс, и описываться другими более сложными зависимостями.

$$|I_{mx} + I_{my}| \geq I_{m\Sigma} \geq |I_{mx} - I_{my}| \quad (51)$$

Рассчитаем гармоники первичного тока частотного привода в виде ряда синусоидальных гармоник первичных токов выпрямителя и инвертора, и их дальнейшего складывания. Гармонический состав первичного тока выпрямителя по большей части содержит в своем составе канонические гармоники $\nu_1 f_c$. Гармонический состав первичного тока инвертора, содержит в своем составе, как канонические гармоники $(\nu_2 \omega, k\Omega)$, так и большую часть неканонических гармоник $(\nu_2 \omega - k\Omega, \nu_2 \omega + k\Omega)$ с малыми амплитудами (интергармоники и субгармоники).

$$F_{\Sigma} = \Phi_B k \pm 1 \vec{f}_B \pm \Phi_{II} k \pm 1 \vec{f}_{II} \pm k f_{ШИМ} \quad (52)$$

, где $k=0,1,2,3\dots$ - кратность группы гармоник; p_B, p_{II} - пульсность выпрямителя и инвертора; $f_B, f_{II}, f_{ШИМ}$ - основная частота выпрямителя, инвертора и широтно-импульсного модулятора.

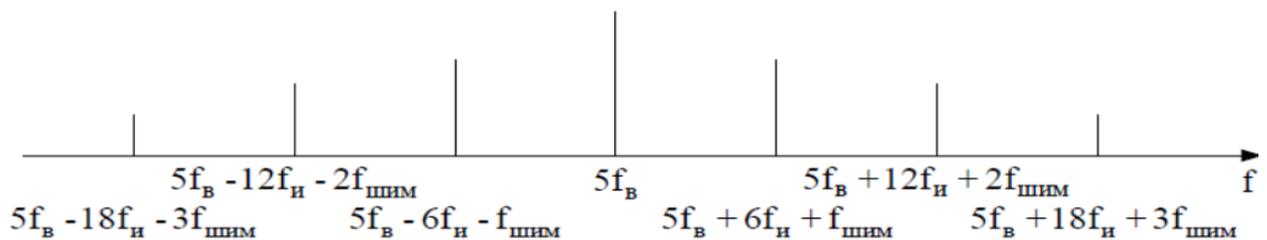


Рисунок 17 - Спектр субгармоник и интергармоник

При этом не следует забывать, что LC элементы звена постоянного тока частотного привода являются фильтрами для высокочастотных гармоник инвертора, то влияние инвертора на нелинейные искажения первичного тока частотного привода гораздо меньше чем влияние выпрямителя.

Номинальная мощность, мощность питающей сети и величина нагрузки частотного привода также оказывает влияние на уровень гармонических составляющих первичного тока частотного привода. Чем выше мощность питающего трансформатора и чем меньше мощность асинхронного

электродвигателя, подключенного к частотному приводу, тем больше уровень нелинейных искажений первичного тока системы привода.

Суммарный гармонический состав первичного тока частотного привода имеет зависимость также от индуктивности дросселя в звене постоянного тока частотного привода и величины емкости в конденсаторе. Увеличение значения величины емкости C_d в несколько понижает содержание высокочастотных гармоник в кривой первичного тока частотного привода. Поскольку с увеличением порядка гармоник значение величины индуктивного сопротивления увеличивается, то индуктивность снижает достаточно эффективно величину интергармоник.

Для определения свойств частотного привода в составе асинхронного двигателя переменного тока как потребителя электроэнергии в установившемся режиме анализируем потребляемую из питающей сети реактивную мощность.

В первую очередь, чтобы просчитать реактивную мощность на выходе частотного привода, необходимо представить отсутствие высших гармоник в кривых токов и напряжений самого привода, электрических потерь в вентилях выпрямителя и полупроводниковых ключах инвертора.

$$Q = \frac{18}{\pi^2} \omega_{03} L_{p.эк} i_6^2 \quad (53)$$

Выражение зависимости реактивной мощности Q от величины выходного тока выпрямителя i_B и входного индуктивного сопротивления $X_{p.эк} = \omega_{03} L_{p.эк}$. Ток i_B в процессе регулирования скорости и изменения момента нагрузки является переменной величиной. Из чего следует, на потребление Q влияет режим работы двигателя, а точнее ток статора i_1 и активная мощность P_1 потребляемые от частотного привода. Все три показателя связаны уравнением баланса мощностей частотного привода для определения тока инвертора преобразуется в формулу:

$$Ai_B^4 + Bi_B^2 + C = 0 \quad (54)$$

, где коэффициенты А, В, С выражаются из следующих уравнений

$$A = \left(\frac{18}{\pi^2} X_{p.ox} \right)^2 + \left(\frac{18}{\pi^2} R_{p.ox} + R_{p.ф} \right)^2 \quad (55)$$

$$B = 2 \left(\frac{18}{\pi^2} R_{p.ox} + R_{p.ф} \right) \left(\frac{3}{2} R_{p.ox} i_1^2 + P_1 \right) \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \right)^2 u^2 \quad (56)$$

$$C = \frac{3}{2} R_{p.вых} i_1^2 + P_1 \quad (57)$$

На входе реактивная мощность Q и на выходе реактивная мощность Q₁ частотного привода не равны, а входная реактивная мощность отличается от выходной мощности частотного привода при любых знаках P₁ и Q₁. Q всегда положительна т.к. она питается от источника питания выпрямителем.

Определим активную и полную мощности частотного привода:

$$P = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} i_6 \left[u^2 - \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi} X_{p.ox} \right)^2 i_6^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

$$S = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} u i_6 \quad (59)$$

Коэффициент мощности по основной гармонике примет вид:

$$k_{M\ominus} = \frac{P}{S} = \sqrt{1 - \left(\frac{2\sqrt{3}}{u} X_{p.ox} i_6 \right)^2} \quad (60)$$

Вывод

Произведен математический анализ всех элементов системы частотного привода из полученных данных составляется программа для расчетов в компьютерных приложениях MATLAB и mMaxima.

4 Разработка системы активного фильтра параллельного подключения с общим звеном постоянного тока

4.1 Разработка и описание силовой структуры «активного фильтра гармоник параллельного включения с общим звеном постоянного тока»

На сегодняшний день распространенной структурой активного фильтрокомпенсирующего устройства с параллельным подключением может быть представлена схема.

Составными элементами структуры такого фильтрокомпенсирующего устройства являются автономный инвертор напряжения, конденсаторная батарея с емкостью C_ϕ и синхронизирующая индуктивность L_ϕ . Конденсаторная батарея C_ϕ служит для обмена энергией с сетями электроснабжения и создает токи активного фильтра, компенсирующие нелинейные искажения первичного тока нелинейного потребителя электрической энергии и обеспечивает цепи образования разряда синхронной индуктивности самого фильтра.

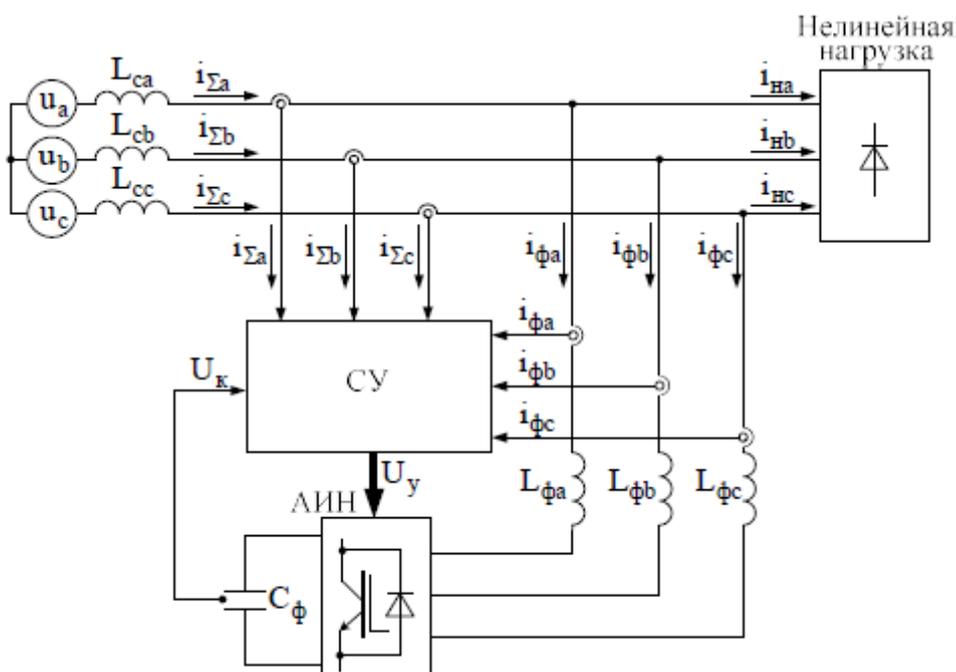


Рисунок 18 - Принципиальная схема параллельного активного фильтра

Размер емкости конденсаторной батареей C_d звена постоянного тока имеет важное значение, так как при небольшой емкости C_d возможны возникновения колебаний напряжения в цепи постоянного тока, выход из строя ключей и перенапряжения автономного инвертора частотного привода и автономного инвертора самого фильтрокомпенсирующего устройства, а большая емкость конденсаторной батареи C_d звена выпрямленного тока приведет к росту габаритных размеров и как следствие увеличению стоимости частотного привода и активного фильтра.

Компенсационный ток активного фильтра зависит от состояний каждого из силовых ключей инвертора активного фильтра. Примем к рассмотрению симметричную систему электроснабжения и симметричную нелинейную нагрузку $\left[\begin{matrix} e_a + e_b + e_c = 0, i_{на} + i_{nb} + i_{nc} = 0 \end{matrix} \right]$

Работу активного фильтра можно описать с помощью следующих формул:

$$L_a \frac{di_a}{dt} = U_a - u_a; L_b \frac{di_b}{dt} = U_b - u_b; L_c \frac{di_c}{dt} = U_c - u_c \quad (61)$$

, где u_a, u_b, u_c - выходные напряжения активного фильтра определим по формулам:

$$u_a = k_a U_{dc}; u_b = k_b U_{dc}; u_c = k_c U_{dc} \quad (62)$$

Таблица 2 - Состояние ключей

Номер состояния k	Силовые ключи						Коэффициенты переключения		
	VT ₁	VT ₂	VT ₃	VT ₄	VT ₅	VT ₆	k _a	k _b	k _c
0	1	0	0	1	0	1	2/3	-1/3	-1/3
1	0	1	1	0	0	1	-1/3	2/3	-1/3
2	0	1	0	1	1	0	-1/3	-1/3	2/3
3	0	1	1	0	1	0	-2/3	1/3	1/3
4	1	0	0	1	1	0	1/3	-2/3	1/3
5	1	0	1	0	0	1	1/3	1/3	-2/3

$$k_a = \frac{2}{3}; k_b = -\frac{1}{3}; k_c = -\frac{1}{3} \quad (63)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = U_a + \frac{2}{3}U_{dc}; L_b \frac{di_b}{dt} = U_b - \frac{1}{3}U_{dc}; L_c \frac{di_c}{dt} = U_c - \frac{1}{3}U_{dc} \quad (64)$$

Исходя из этого токи активного фильтра i_b, i_c будут снижаться, а ток i_a будет возрастать.

Дифференцированные токи активного фильтра должны соответствовать следующим условиям:

$$\frac{di_a}{dt} \geq 0; \frac{di_b}{dt} \leq 0; \frac{di_c}{dt} \leq 0. \quad (65)$$

Определим мощность искажения вызывающую изменение напряжение в звене постоянного тока активного фильтра:

$$S_{II} = \sqrt{3}U \sum_{n=2}^{\infty} I_n = m\sqrt{3}U \sum_{n=2}^{\infty} I_{nII} \cos \left[\omega t + f_n \right] \quad (66)$$

, где U – действующее напряжение первой гармоники.

Из выше изложенные расчетов, гармонический состав первичного тока частотного привода приравняем к гармоническому составу шестифазного выпрямителя. В качестве нелинейной нагрузки рассмотрим систему частотного привода в составе асинхронного двигателя.

Тогда в первичном токе частотного привода будут привелегировать 5, 7, 11, 13, 17 и 19 гармоники. Влияние остальных гармоник выпрямителя и гармоник инвертора игнорируем по причине их незначительного воздействия на размер суммарного коэффициента гармонических составляющих первичного тока частотного привода. Мощность искажения в звене постоянного тока примет вид:

$$S_H \approx \sqrt{3}U \left(\begin{array}{l} -I_{5H} \cos \left[\omega t + f_5 \right] + I_{7H} \cos \left[\omega t + f_7 \right] - I_{11H} \cos \left[2\omega t + f_{11} \right] + \\ + I_{13H} \cos \left[2\omega t + f_{13} \right] - I_{17H} \cos \left[8\omega t + f_{17} \right] + I_{19H} \cos \left[8\omega t + f_{19} \right] \end{array} \right) \quad (67)$$

Наивысший показатель из приведенных гармоник имеют 5-я и 7-я гармоники. Напряжение стабилизируется в периоде на конденсаторе звена выпрямленного тока фильтрокомпенсирующего устройства, будет иметь вид $T/12$ (T – период сетевого напряжения). За счет мощности, выделяемой конденсатором C_ϕ и переменам напряжения на конденсаторе на величину ΔU_{dc} , происходит компенсация мощности искажения.

Исходя из этого следует, что для более глубокой компенсации активным фильтром мощности искажения, отдаваемая конденсатором мощность на интервале $T/12$ должна равняться мощности искажения.

Необходимую емкость конденсатора в звене выпрямленного тока активного фильтра выражаем:

$$\int_0^{T/12} S_H dt = \frac{1}{2} C_\phi \left[U_d + \Delta U_d \right] - \frac{1}{2} C_\phi U_d^2 \quad (68)$$

Так же можно определить мощность искажения, как $S_H = S_1 THD_i$, где S_1 – полная мощность первой гармоники частотного привода.

Искаженный высокочастотными гармониками первичный ток, перемещаясь по элементам силовой цепи активного фильтра, образует увеличение потерь активной мощности в автономном инверторе напряжения фильтрокомпенсирующего устройства.

Эти потери на транзисторах (IGBT) выражаются потерями во время коммутации $P_{тр.перекл}$ и потерями в открытом состоянии $P_{тр.откр}$; потери мощности на обратных диодах слагаются из потерь в открытом состоянии $P_{д.откр}$ и потерь на выключение $P_{д.выкл}$. Полные потери на инверторе активного фильтра приобретают вид:

$$P_{\Sigma} = P_{тр.откр} + P_{тр.перекл} + P_{д.откр} + P_{д.выкл} \quad (69)$$

Определим потери транзистора в открытом состоянии:

$$P_{тр.откр} = I_{\max} \Delta U_{тр} \left(\frac{1}{8} + \frac{k_M}{3\pi} \cos \varphi \right) \quad (70)$$

, где I_{\max} - максимальное значение фазы тока, $\Delta U_{тр}$ - падение насыщения напряжения транзистора при максимальном токе и температуре, k_M - коэффициент модуляции.

Определим потери при коммутации транзистора:

$$P_{тр.перекл} = E_{т.вкл} + E_{т.выкл} \int_n \frac{1}{\pi} \quad (71)$$

, где $E_{т.вкл}$, $E_{т.выкл}$ - энергии выключения и включения ключа за импульс при пиковой амплитуде тока и максимальной температуре, f_n - частота коммутаций.

Определим потери при выключенном диоде:

$$P_{д.выкл} = 0.125 I_{\phi} t_{\phi} U_{\max} f_n \quad (72)$$

, где I_{ϕ} - максимальный ток восстановления диода, t_{ϕ} - время обратного восстановления диода, U_{\max} - максимальное напряжение диода.

Исходя из вышеизложенного определим емкость конденсатора в звене выпрямленного тока фильтрокомпенсирующего устройства:

$$\int_0^{T/12} P_{II} + P_{\Sigma} dt = \frac{1}{2} C_{\phi} U_{dc}^2 + \Delta U_{dc}^2 - \frac{1}{2} C_{\phi} U_{dc}^2 \quad (73)$$

$$C_{\phi} = 2 \frac{\int_0^{T/12} \langle P_H + P_{\Sigma} \rangle dt}{\Delta U_{dc} \langle U_{dc} + 2U_{dc} \rangle} \quad (74)$$

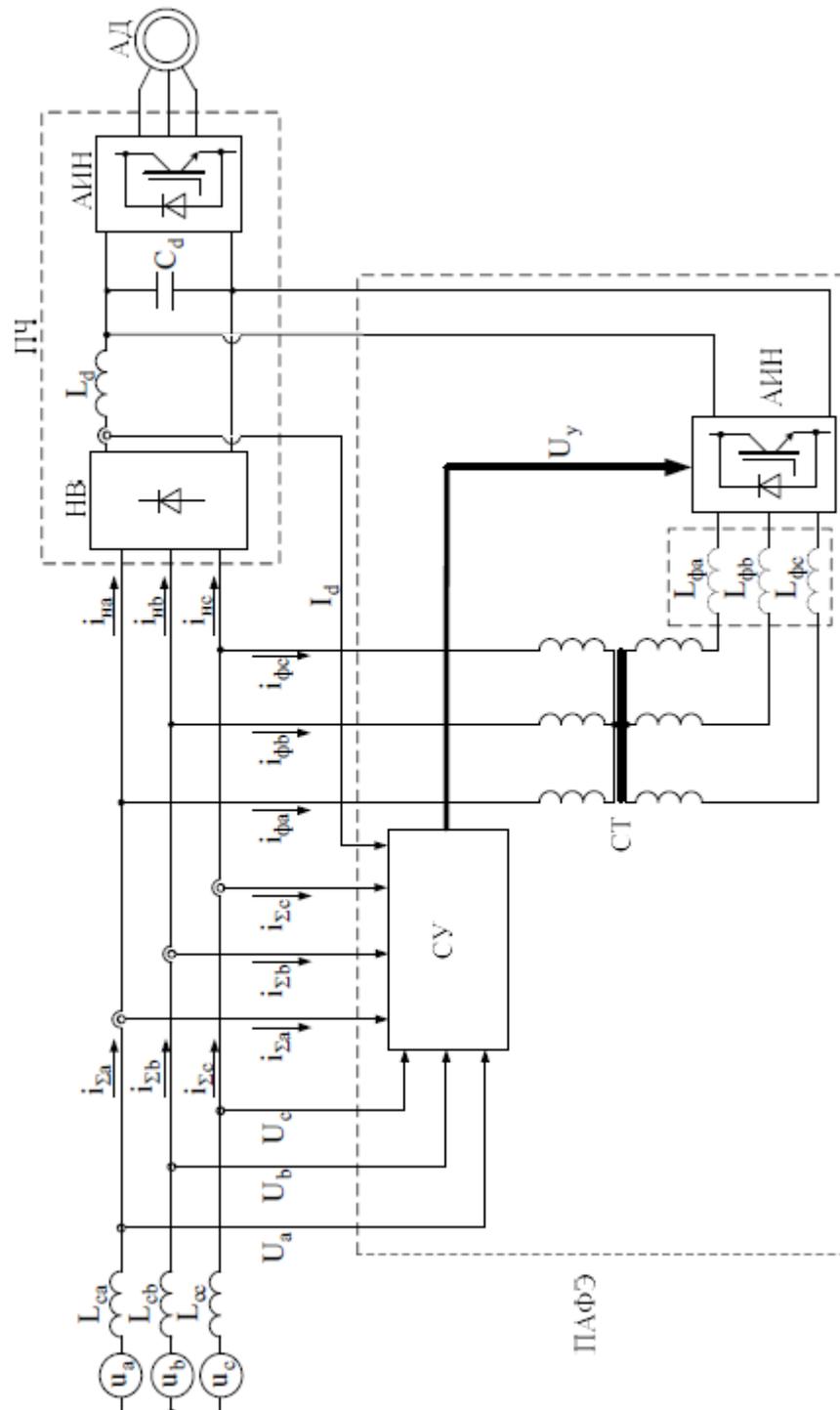


Рисунок 19 - Структурная схема общего звена постоянного тока

По результатам вышеприведенного математического анализа следует, что емкость конденсатора имеет линейную зависимость от компенсируемой

мощности нелинейной нагрузки. Емкость конденсатора также имеет зависимость от частоты коммутации ключей и параметров автономного инвертора напряжения активного фильтра и незначительно зависит от величины компенсационного тока. Эта емкость несущественна поэтому, при проектировании активного фильтра параллельного подключения, ее можно не учитывать.

Промежуточным звеном между синусоидальным напряжением сети и прямоугольным напряжением с выхода автономного инвертора активного фильтра является синхронизирующая индуктивность L_ϕ . Разница между мгновенным напряжением на выходе автономного инвертора активного фильтра и мгновенным напряжением сети прикладывается к синхронизирующей индуктивности L_ϕ , оберегая транзисторы инвертора активного фильтра от перенапряжений. Помимо этого, синхронизирующая индуктивность L_ϕ обладает ЭДС самоиндукции при коммутации ключей автономного инвертора активного фильтра, энергия которую создает заряд конденсаторной батареи C_ϕ звена выпрямленного тока инвертора активного фильтра до повышения напряжения, выше чем средневывпрямленное напряжение мостового выпрямителя. Данная разница позволяет отдавать запасенную энергию, в конденсаторной батарее C_ϕ автономного инвертора активного фильтра, назад в сеть электроснабжения.

Величину синхронизирующей индуктивности активного фильтра выразим отдельно для разных фаз по формуле:

$$L_\phi = \frac{U_c + 0.5U_d}{4\xi\Omega} \quad (75)$$

, где U_c – напряжение сети, U_d – среднее напряжение на конденсаторе, ξ – амплитуда несущего сигнала, Ω – частота несущего сигнала.

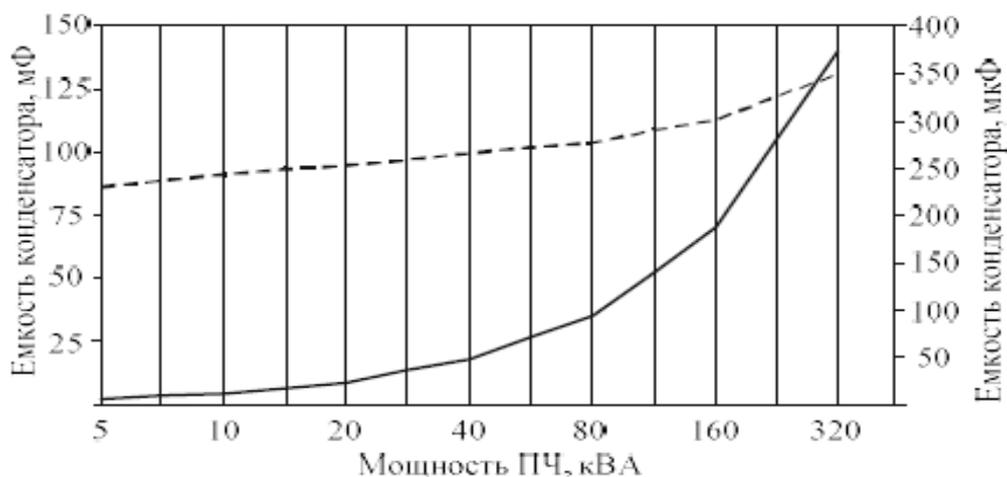


Рисунок 20 - Зависимость емкости накопительного конденсатора от мощности преобразователя нелинейной нагрузки

В период адаптации фильтрокомпенсирующего устройства к электроприводу переменного тока, возможно использование индивидуального активного фильтра параллельного подключения для частотного привода, в котором звено постоянного тока автономного инвертора активного фильтра и звено постоянного тока частотного привода будет выполнено общим. Проведем анализ емкости конденсаторной батареи C_d активного фильтра параллельного подключения с общим звеном постоянного тока. Рассматривая конденсаторную батарею C_d со стороны выпрямителя частотного привода, ее функцией будет сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения, а рассматривая конденсаторную батарею C_d со стороны автономного инвертора частотного привода, ее функцией будет создание контура для разряда индуктивности цепи нагрузки при коммутации управляемых ключей инвертора. Полную емкость конденсаторной батареи определим по выражению:

$$C_d = C_{\text{цп}} = C_B + C_{II} \quad (76)$$

Емкость конденсаторной батареи C_d в звене постоянного тока частотного привода выбираем исходя из мощности автономного инвертора частотного привода и она составляет не менее 100 мкФ на 1 кВт мощности и с запасом 20%. В активном фильтре с общим звеном постоянного тока, конденсаторная батарея C_d , выполняет те же функции, что и в активном фильтре без звена постоянного тока. Однако, во время работы активного фильтра с общим звеном постоянного тока вероятны два крайних режима работы конденсаторной батареи C_d .

Первый случай, когда ключи автономного инвертора активного фильтра работают синхронно с ключами инвертора частотного привода, то индуктивность нагрузки частотного привода может разряжаться, не затрагивая конденсатор звена выпрямленного тока C_d (цепь разряда: индуктивность нагрузки инвертор частотного привода – обратные диоды инвертора частотного привода – открытые транзисторы инвертора активного фильтра – система электроснабжения), и в данном случае необходимая емкость конденсаторной батареи C_d снизится по отношению с расчетной емкостью.

Второй случай, индуктивность нагрузки частотного привода одновременно разряжается с синхронизирующей индуктивностью L_ϕ активного фильтра (две цепи разряда: индуктивность нагрузки – обратные диоды инвертор частотного привода – конденсатор C_d и синхронизирующая индуктивность L_ϕ – обратные диоды автономного инвертора активного фильтра – конденсатор C_d), в таком режиме требуемая емкость конденсаторной батареи C_d увеличивается. Но, ключи автономного инвертора частотного привода и инвертора активного фильтра работают с разной частотой и заблаговременно установить увеличивается требуемая величина емкости или снижается нельзя. При этом нужно исходить из наихудшего результата и выбирать емкость выпрямленного тока по формуле:

$$C_d = C_{\text{III}} + C_{\phi} \quad (77)$$

, где C_{III} – полная емкость конденсаторной батареи в звене постоянного тока частотного привода, C_{ϕ} – емкость требуемая для цепи разряда инвертора активного фильтра.

Отметим что с увеличением порядка гармоник, их амплитудное значение уменьшается, а влияние на гармонический состав первичного тока частотного привода оказывают начальные гармоники спектра [5, 7, 11, 13].

Поскольку полная компенсация гармоник сложно реализуема, то основные меры по коррекции уровня качества электрической энергии направлены на понижение реактивной мощности и суммарных гармонических искажений частотного привода до требуемого уровня. Также обратим внимание на тот факт что в системах асинхронного электропривода переменного тока, для обеспечения необходимого запаса мощности, мощность частотного привода подбирается на одну а то и несколько ступеней выше номинальной мощности используемого в системе асинхронного двигателя, при данном сочетании в большей части случаев, асинхронные двигатели промышленных механизмов функционируют с незначительной загрузкой, когда момент на валу двигателя не превышает половины от номинального значения.

Исходя из вышеизложенного следует, что емкости звена выпрямленного тока C_d частотного привода в основных случаях использования активного фильтра с общим звеном выпрямленного тока будет необходимой величины для запуска процесса гармонической компенсации и компенсации реактивной мощности до удовлетворения требуемых показателей. В иных случаях недостающей емкости конденсатора C_d возможно добавление конденсатора необходимой емкости в звено выпрямленного тока автономного инвертора активного фильтра аналогично обычному активному фильтру с параллельным

подключением. Вдобавок, за счет емкости конденсатора C_d звена выпрямленного тока частотного привода, дополняемая величина емкости конденсатора автономного инвертора активного фильтра будет меньше величины емкости конденсатора обычного активного фильтра.

Для удовлетворительной работы разрабатываемого активного фильтра параллельного подключения нужно согласовать уровень напряжения в звене выпрямленного тока и уровня напряжения в сети электроснабжения, чтобы активный фильтр мог не только употреблять мощность из сети электроснабжения, но и возвращать ее обратно в питающую сеть. Согласование уровней напряжений осуществляется с помощью согласующего трансформатора. Трансформатор выбираем согласно условию:

$$U_d > U_{2m} \quad (78)$$

, где U_d – значение средневыпрямленного напряжения, U_{2m} – амплитуда напряжения на вторичной обмотке согласующего трансформатора.

Величина значения средневыпрямленного напряжения в звене постоянного тока U_d выбирается исходя из того, чтобы автономный инвертор активного фильтра был способен удовлетворить значения напряжения необходимые для компенсации вышеприведенных гармоник. Для этого, нужно учитывать уменьшение напряжения на согласующем трансформаторе:

$$\Delta U_T = \frac{S}{U} \left[R \cos \varphi + X \sin \varphi \right] \quad (79)$$

, где S – полная нагрузка согласующего трансформатора, U – напряжение на зажимах трансформатора, $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки трансформатора, X – реактивное сопротивление обмоток трансформатора, R – активное сопротивление обмоток трансформатора.

Отталкиваясь от размера потерь напряжения на трансформаторе, необходимо обеспечивать U_d на 15-20% больше чем U_{2m} , чтобы имелся задел по напряжению в звене выпрямленного тока. Средневыпрямленное напряжение в звене выпрямленного тока частотного привода:

$$U_d = k_{cx.в} U_c \quad (80)$$

, где U_c – действующее значение в питающей сети, k_{cx} – коэффициент схемы выпрямителя (для трехфазной мостовой схемы = 2.34)

Коэффициент трансформации трансформатора согласующего:

$$k_T = \frac{U_{cm}}{U_{cm.мреб}} \quad (81)$$

При удовлетворении равенства $U_{cm.мреб} = \frac{U_d}{1.15 \dots 1.2}$ ток может протекать от автономного инвертора активного фильтра в сеть электроснабжения в момент времени, даже при протекании напряжения на вторичной обмотке трансформатора через амплитудное значение. Чтобы исключить синхронизирующую индуктивность L_ϕ из системы фильтрокомпенсирующего устройства, путем сведения ее индуктивности к индуктивности рассеяния L_S согласующего трансформатора, для этого первичную и вторичную обмотки согласующего трансформатора рассматривать как две индуктивно-связанные и встречно включенные катушки индуктивности. Для определения индуктивности рассеяния обмоток согласующего трансформатора L_S , приведенную к фазе вторичной обмотки воспользуемся выражением:

$$L_S = \frac{x_{TP}}{\omega_1} \approx k_L \frac{sU_d}{\sqrt{1 - \frac{1}{\mu}} I_d f_1 B_m} \sqrt{\frac{U_d I_d}{s f_1 B_m}} = L_2 + L_1 = L_2 + L_1 \left(\frac{E_2}{U_1} \right)^2 \quad (82)$$

, где k_L – коэффициент схемы выпрямителя, s – количество стержней трансформатора, B_m – амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, p – число чередующихся секций обмоток.

Влияние гармоник на трансформатор в результате трансформации гармонических напряжений и токов имеет зависимость от типа трансформатора и схемы соединения его обмоток. Подключение схемой «треугольник», компенсируются все гармоники кратные трем в данной обмотке, а токи остальных гармоник подвергаются трансформации. Подключение обмоток трансформатора «звездой» с заземленной нейтралью, не приводит к компенсации гармоник кратных трем даже при сбалансированной нагрузке по первой гармонике мощности.

Все гармоники подвергнутся трансформации при подключении обмоток «звездой». В результате сравнения можно сделать вывод, что тип согласующего трансформатора активного фильтра с общим звеном выпрямленного тока используем стержневого типа со схемой соединения обмоток трансформатора «звезда-звезда». Электрические потери и их кратность в обмотках трансформатора с имеющимися гармоническими составляющими тока выражаем в виде формулы:

$$K - factor = \frac{\sum_{n_{min}}^{n_{max}} I_n^2 n^2}{\sum_{n_{min}}^{n_{max}} I_n^2} \quad (83)$$

Если гармонические составляющие тока ($K-factor > 1$), имеются в обмотках нагруженного трансформатора, то в некоторых случаях потери на вихревые токи увеличиваются до размеров активных потерь, что увеличивает вдвое суммарные потери трансформатора, достигая до 2% (и более) от номинальной мощности. Выбирая согласующий трансформатор надо учитывать потери,

вызываемые гармоническими составляющими напряжения и тока, мощность согласующего трансформатора увеличивается на величину данных потерь. В результате, требуемый запас мощности трансформатора определяем по выражению:

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I_{RMS}} \right)^2 \sum_{n=2}^{40} n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (84)$$

, где I_1 – основная гармоника тока, n – номер гармоники, I_{RMS} – истинное среднеквадратичное значение тока, $q=1.75$ – коэффициент зависящий от составляющих потерь в железе трансформатора, $e=0.3$ – коэффициент зависящий от составляющих потерь в меди.

4.2 Анализ работы с помощью преобразования в ряд Фурье системы частотный привод – активный фильтр

Образование сигналов тока i_{Σ}^* по средством частотной коррекции основывается на спектральном анализе первичного тока нелинейной нагрузки с помощью дискретного преобразования Фурье. Для этого производится фазное получение изображений токов нагрузки в частотной области.

Затем производится коррекция вектора тока нагрузки в соответствии с первой гармоникой тока нагрузки для устранения нелинейных искажений и компенсации реактивной мощности нагрузки, при этом, к полученному спектру тока возможно применение коррекции запаздывания.

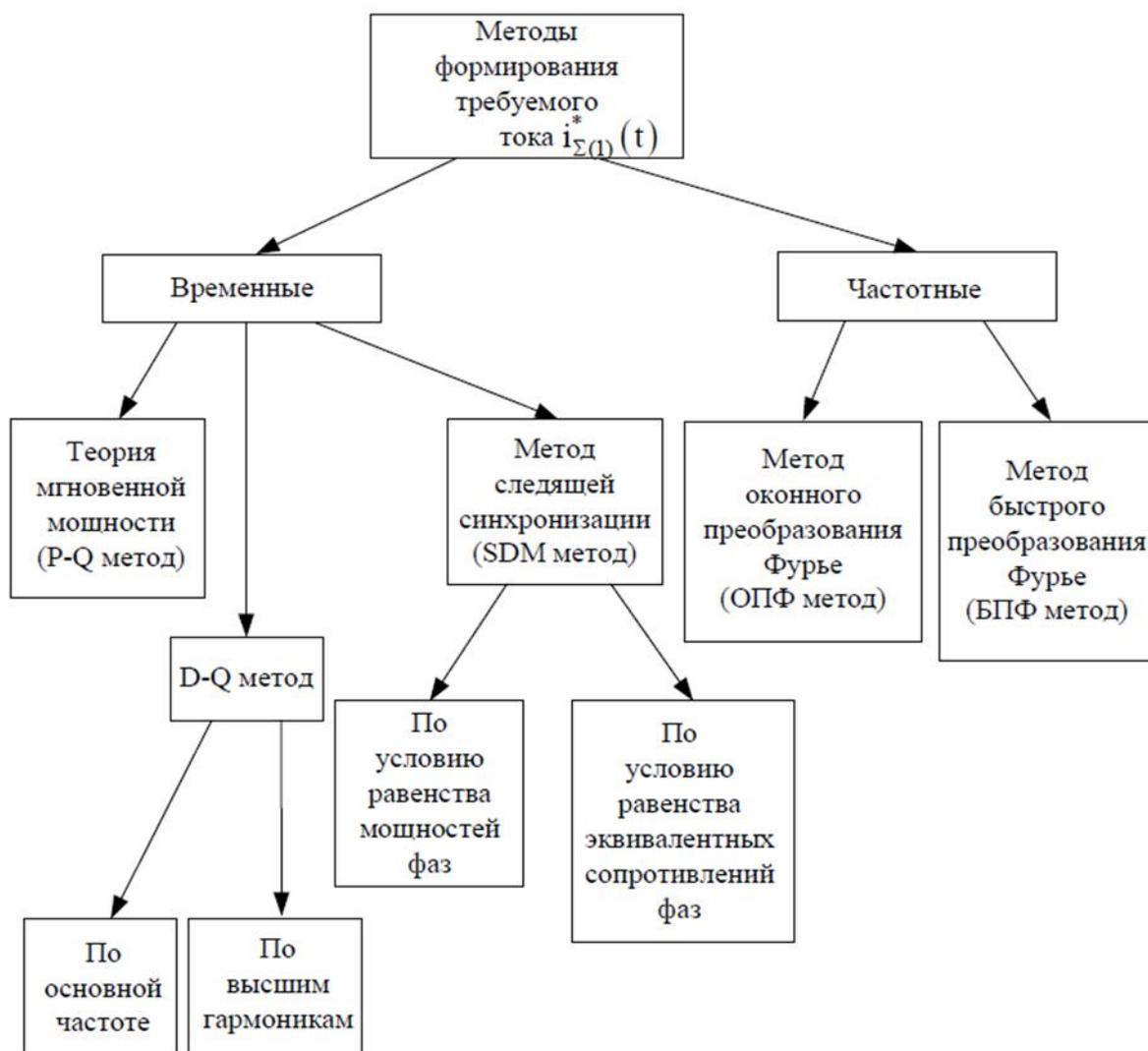


Рисунок 21 - Основные методы формирования требуемого тока

Затем, посредством обратного преобразование ряда Фурье, производится обратный переход во временную область и формирование сигналов для инвертора активного фильтра. Для выполнения дискретного преобразования Фурье и обратного преобразования Фурье используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье и оконного преобразования Фурье.

Принцип быстрого преобразования Фурье - это оптимизированный по скорости способ вычисления дискретного преобразования Фурье, который заключается в разделении преобразования массива (суммы из N слагаемых) на

два преобразования с количеством слагаемых $N/2$, вычислением их по отдельности и последующим объединением результатов. Процесс деления пополам может продолжаться до тех пор, пока длина преобразования не станет нечетной, при этом, сложность составляет $O(N^2)$. Для снижения сложности быстрого преобразования Фурье применяют либо «прореживание по времени», либо «прореживание по частоте».

При этом, путем использования алгоритмов «прореживания» можно добиться снижения сложности дискретного преобразования Фурье до $O(N \cdot \log_2 N)$. В общепринятом способе быстрого преобразования Фурье анализируется полный спектр сигнала, взятый во всем диапазоне существования переменной. Однако, для решения инженерных задач, зачастую интерес представляет распределение частот, в окрестности некоторого момента времени. В этом случае используется оконное преобразование Фурье, путем введения в преобразование окна $w(t)$ – движущейся функции. Использование оконной функции позволяет представить результат анализа в виде функции частоты ω и времени t положения окна.

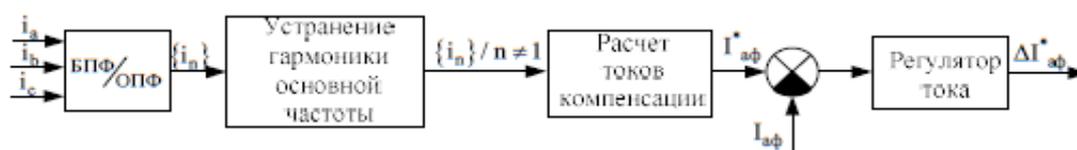


Рисунок 22 - Структурная схема блоков Фурье

Вывод

Из результатов проведенных исследований, можно заключить, что методы формирования сигналов тока i_{2O}^* временного типа не требуют сложных вычислений и, следовательно, увеличение мощностей вычислительных ресурсов, что дает возможность облегчить систему управления и увеличить быстродействие, но они не дают возможности

обеспечивать высокого уровня точности обработки задания и не обладает корректным управлением при искажениях напряжения сети электроснабжения. Методика частотной коррекции на основе преобразования Фурье, позволяют производить вычисление сигналов тока i_{Σ}^* с наивысшей точностью, но из-за высоких объемов вычислений в таких методиках присутствует отставание, составляющее, как правило, не менее одного периода частоты сети электроснабжения.

5 Экспериментальное исследование работы системы активного фильтра с применением компьютерного моделирования в среде MATLAB и mMaxima

5.1 Разработка компьютерной модели и составление сравнительного спектрального анализа в программе Matlab с расширением Simulink

Для подтверждения результатов теоретических расчетов разработанного активного фильтра с общим звеном постоянного тока произведем компьютерное моделирование. В качестве среды для разработки компьютерной модели «параллельный активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод асинхронного двигателя» используется оболочка Simulink программы Matlab . Разработанная компьютерная модель «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод-асинхронный двигатель» представлена в приложении Б (рисунок Б1).

При моделировании системы «активного фильтра с общим звеном постоянного тока – частотный привод-асинхронный двигатель» в качестве двигателя используются математическая модель стандартного асинхронного двигателя типа АИР180М4, параметры которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Технические характеристики асинхронного двигателя

Наименование параметра	Величина
Номинальная мощность, кВт	30
Номинальное действующее значение линейного напряжения, В	380
Номинальная частота напряжения, Гц	50
Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0.083
Индуктивность фазы обмотки статора, Гн	0.0007

Продолжение таблицы 3

Приведенное активное сопротивление фазы ротора, Ом	0.117
Приведенная индуктивность фазы ротора, Гн	0.0007
Взаимная индуктивность фаз статора и ротора, Гн	0.0314
Приведенный к валу момент инерции, кгм ²	0.0800
Число пар полюсов	2
Номинальная частота вращения, об/мин	1470

В процессе моделирования системы были сняты энергетические характеристики при пуске и в установившемся режиме работы асинхронного двигателя.

Для более детального научного исследования высокочастотных гармонических искажений тока прибегнем к построению наглядной компьютерной модели системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод – асинхронный двигатель» в программной среде для компьютерного моделирования Matlab Simulink с использованием блоков из программной библиотеки в разделе Simscape\SimPowerSystems и блок FFT для реализации спектрального анализа Simout.

Для эффективного выполнения компенсации активного фильтра с общим звеном постоянного тока нелинейных искажений первичного тока системы «частотный привод-асинхронный двигатель», используем метод сравнительного анализа состава гармонического колебания первичного тока, имеющего потребление системой «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод –асинхронный двигатель» из системы электроснабжения и первичного тока, потребляемого системой «частотный привод-асинхронный двигатель» из электроснабжающей сети.

Согласно спектральному анализу первичного тока системы «частотный привод-асинхронный двигатель», имеющего потребление из сети

электропитания, данный ток имеет гармонический состав насыщенный высокочастотным спектром, и уровень суммы коэффициента искажения K_i показывает величину в размере 63,09%.

В результате этого, в системе первичного тока блока «частотный привод-асинхронный двигатель» в основном большинстве привелегируют гармоники канонического характера (5, 7, 11, 13...), наряду с ними также в его составе имеются субгармоники и интергармоники.

Таким образом, в процессе моделирования считаем, что напряжение питающей сети является несинусоидальным (содержит 3, 5 и 7 гармоники, $K_u = 18,32\%$). Графические изображения мгновенных значений рассматриваемой основной гармоники напряжения сети электропитания $u_{a1}(t)$ и первичного тока блока «частотный привод-асинхронный двигатель» $i_{ан}(t)$ фазы А для всех участков представлены в приложении В (рисунок В.9).

Согласно спектральному анализу первичного тока системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод-асинхронный двигатель», имеющий потребление из сети электропитания, данный ток располагает гармоническим составом, в большей мере определяемый максимальный суммарный уровень нелинейных искажений составляет 2,43% и основной гармоникой тока.

Гармонический состав напряжения питающей сети представлен в приложении Б (рисунок Б4). Первичный ток системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод-асинхронный двигатель» $i_{ac}^*(t)$ и тока активного фильтра с общим звеном постоянного тока $i_{аф}(t)$ для фазы А для всех участков представлены в приложении Б (рисунок Б2).

Как следует из графиков, полученных в результате компьютерного моделирования, система активного фильтра с общим звеном постоянного тока позволяет обеспечивать высокую эффективность компенсации нелинейных искажений первичных токов и реактивной мощности, потребляемые блоком «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод-

асинхронный двигатель» из питающей сети в различных режимах работы и при различной нагрузке системы «частотный привод-асинхронный двигатель». Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают теоретические расчеты и подтверждают эффективность работы активного фильтра с общим звеном постоянного тока.

5.2 Математически графический анализ системы частотного привода в программе xMaxima

Рассмотрим влияние выпрямителя на качество питающей сети. Ток протекающий в выпрямителе определяется моментами открытия и закрытия полупроводниковых ключей, и имеет наличие управляющих сигналов (для управляемых выпрямителей) от разности потенциалов прикладываемых к ключам в каждый момент времени и зависит.

Разложим на гармоники выпрямленный ток

$$i = \frac{U - U_{\text{выпр}}}{\sqrt{R^2 + \omega L^2}} \quad (85)$$

, в системе компьютерной математики xMaxima. Опишем ток одной фазы следующей функцией:

$$I_{\text{rec}} = \frac{U_0 \cdot |\cos \omega \pi f t - U_{\text{rec}}| + |U_0 \cos \omega \pi f t - U_{\text{rec}}|}{2\sqrt{R^2 + \omega L^2}} \quad (86)$$

и сложим их пофазно.

Введем исходные данные: Частота питающей сети f_0 , Гц; Напряжение питающей сети, U_0 , В; Мощность электродвигателя W , Вт; Сопротивление R и

индуктивность L дросселя; Частота вращения двигателя f_d , об/с; Напряжение на двигателе U_{res} , В. (приложение В, программный расчет 1)

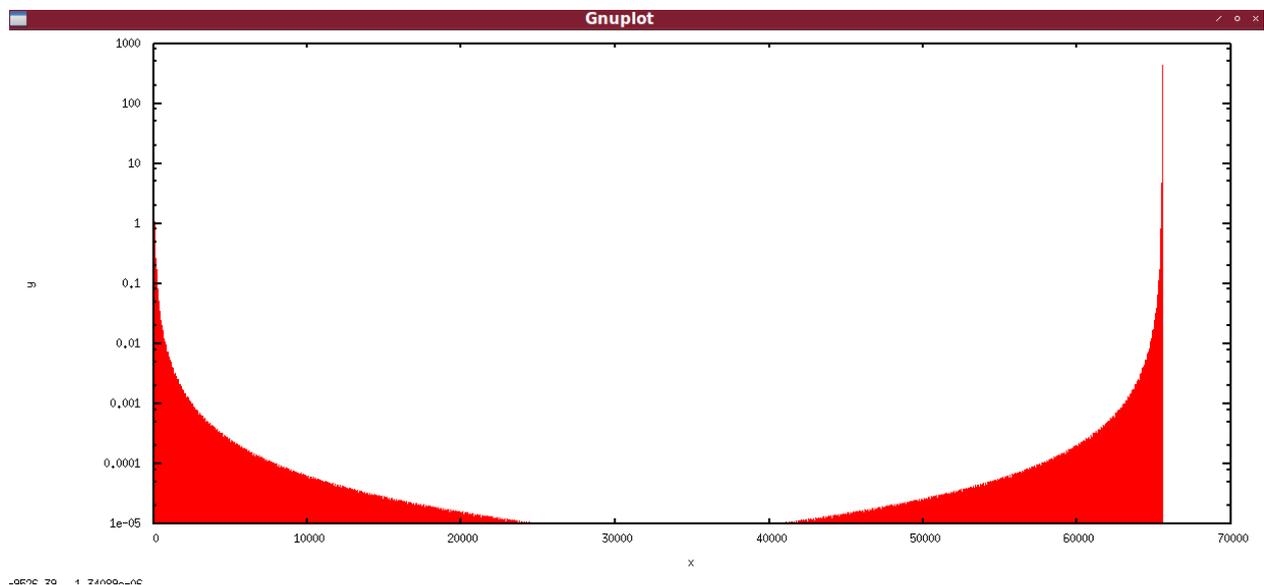


Рисунок 23 - Амплитуды гармоник выпрямителя

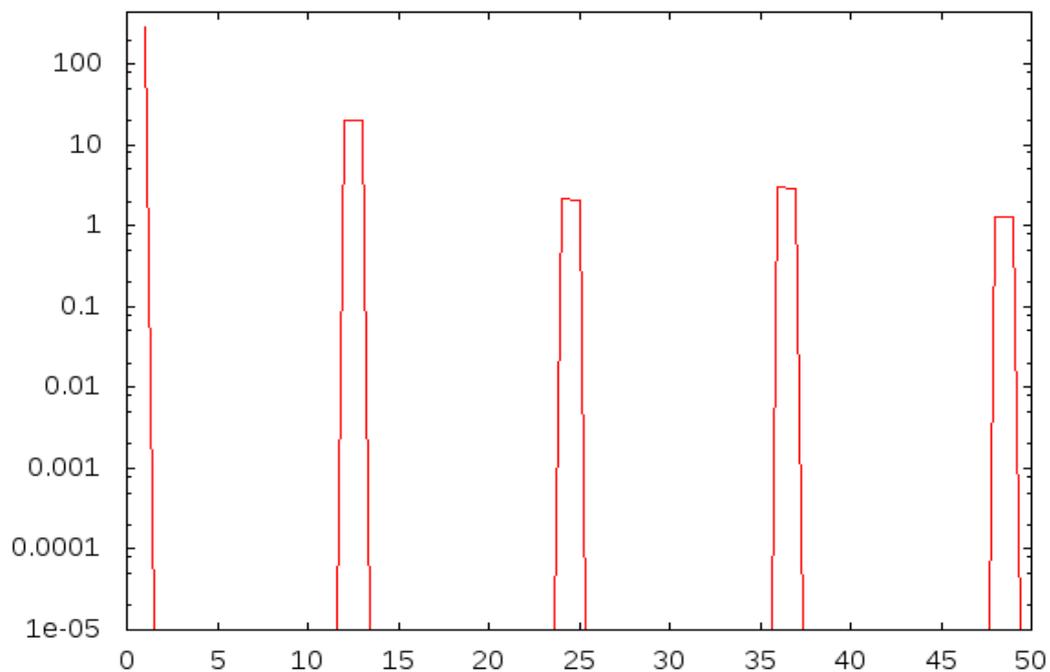


Рисунок 24 - Спектр до 50-й гармоники

Определим гармоники выпрямленного тока (приложение В, программный расчет 2)

Как видно из графика, более 5% от величины первой гармоники имеет только 13 гармоника. (приложение В, программный расчет 3)

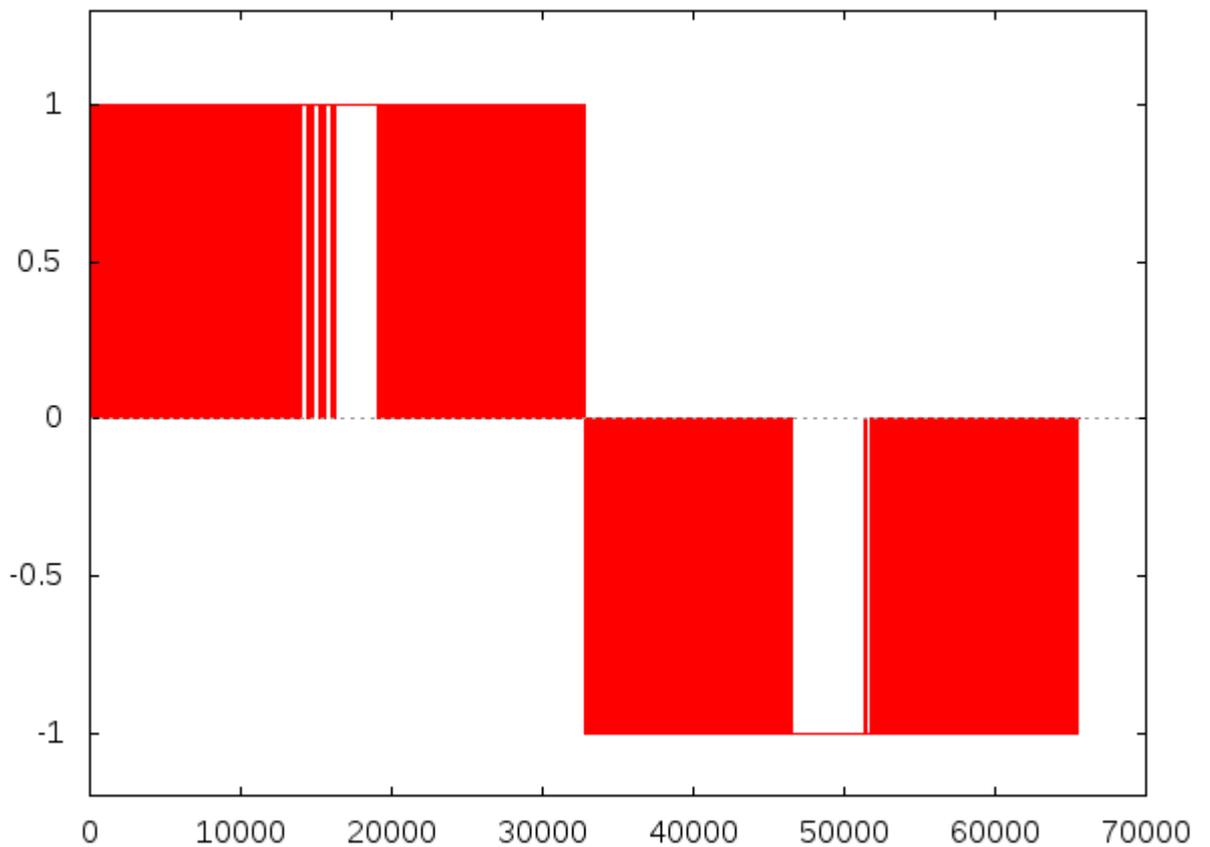
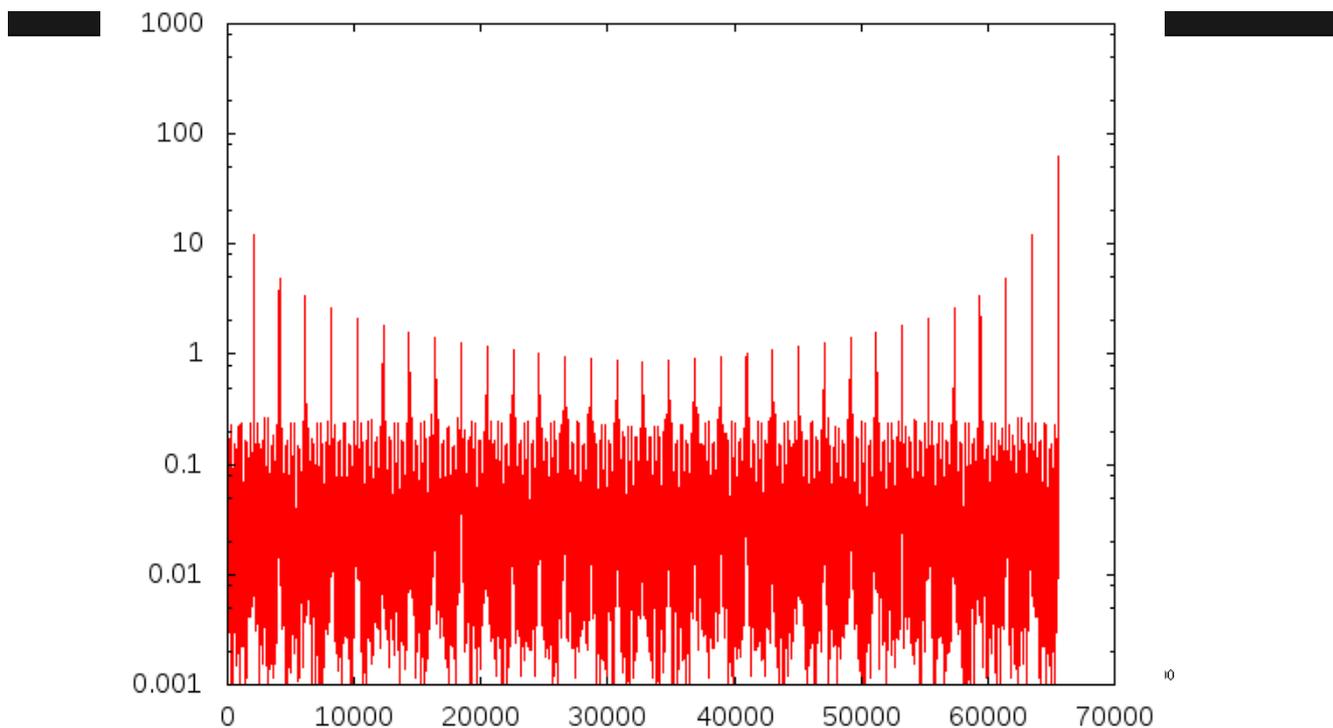
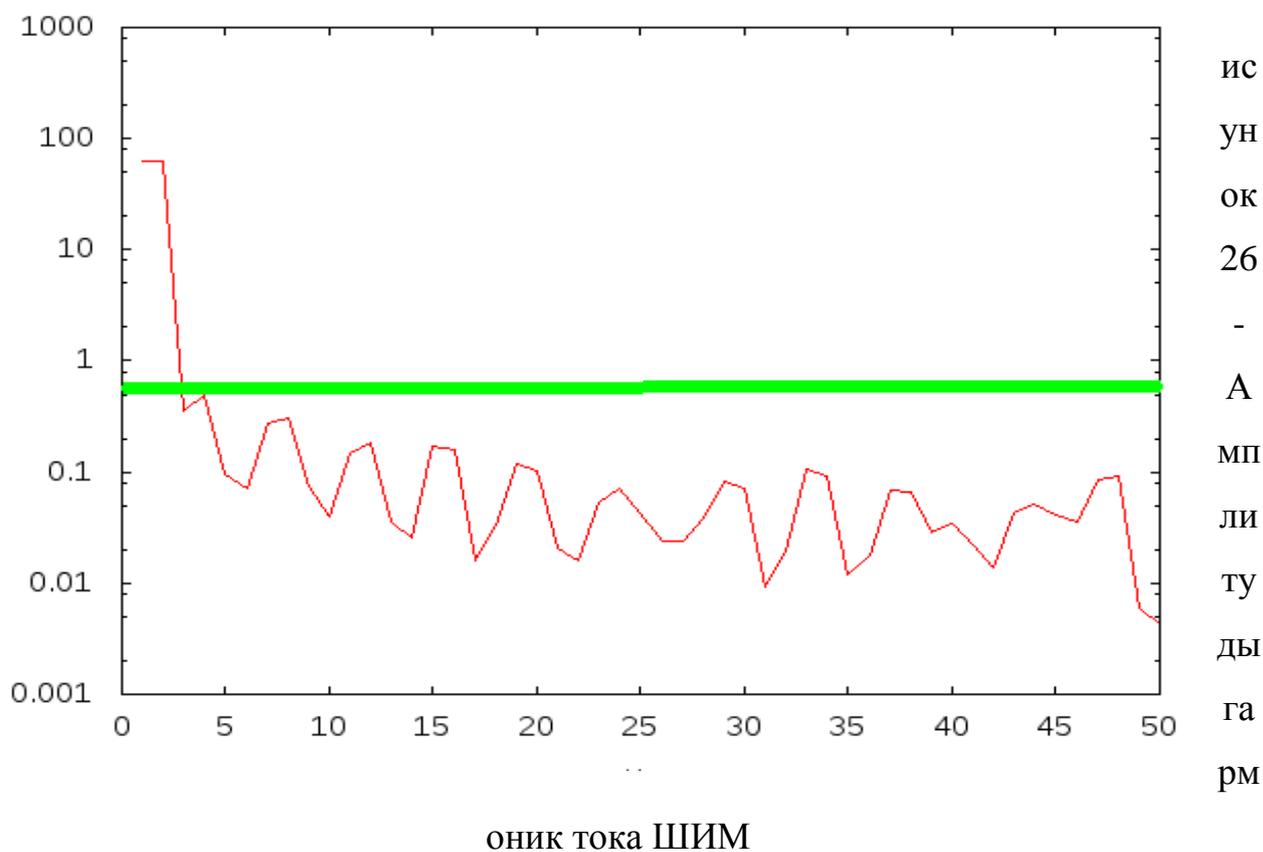


Рисунок 25 - Импульсы

Показать импульсы невозможно, они сливаются; построим график подачи



первых нескольких импульсов (приложение В, программный расчет 4)



оник тока ШИМ

Рисунок 27 - Кривая амплитуды тока

После 2-й гармоники амплитуды ШИМ-спектра не превышают 1% от амплитуды основной гармоники (приложение В, программный расчет 5).

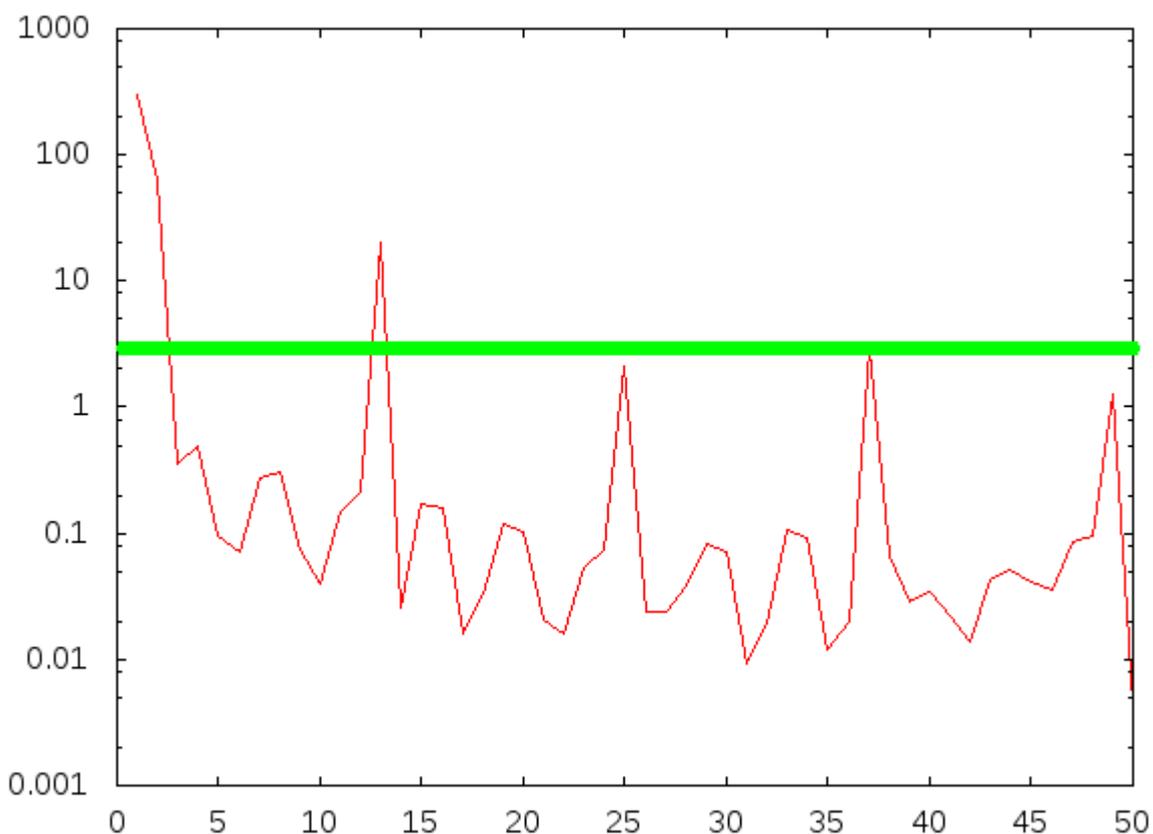


Рисунок 28 - Кривая амплитуды гармоник

Как видно из сравнения графиков, при высокой частоте импульсов ШИМ, требуется компенсировать влияние 2 (частота питающей сети) и 13 гармоник; амплитуды остальных гармоник не превышают 1% от основной расчетной. Применяя силовую структуру «активный фильтр гармоник параллельного включения с общим звеном постоянного тока», получаем следующий спектр гармоник (Приложение В, программный расчет 6).

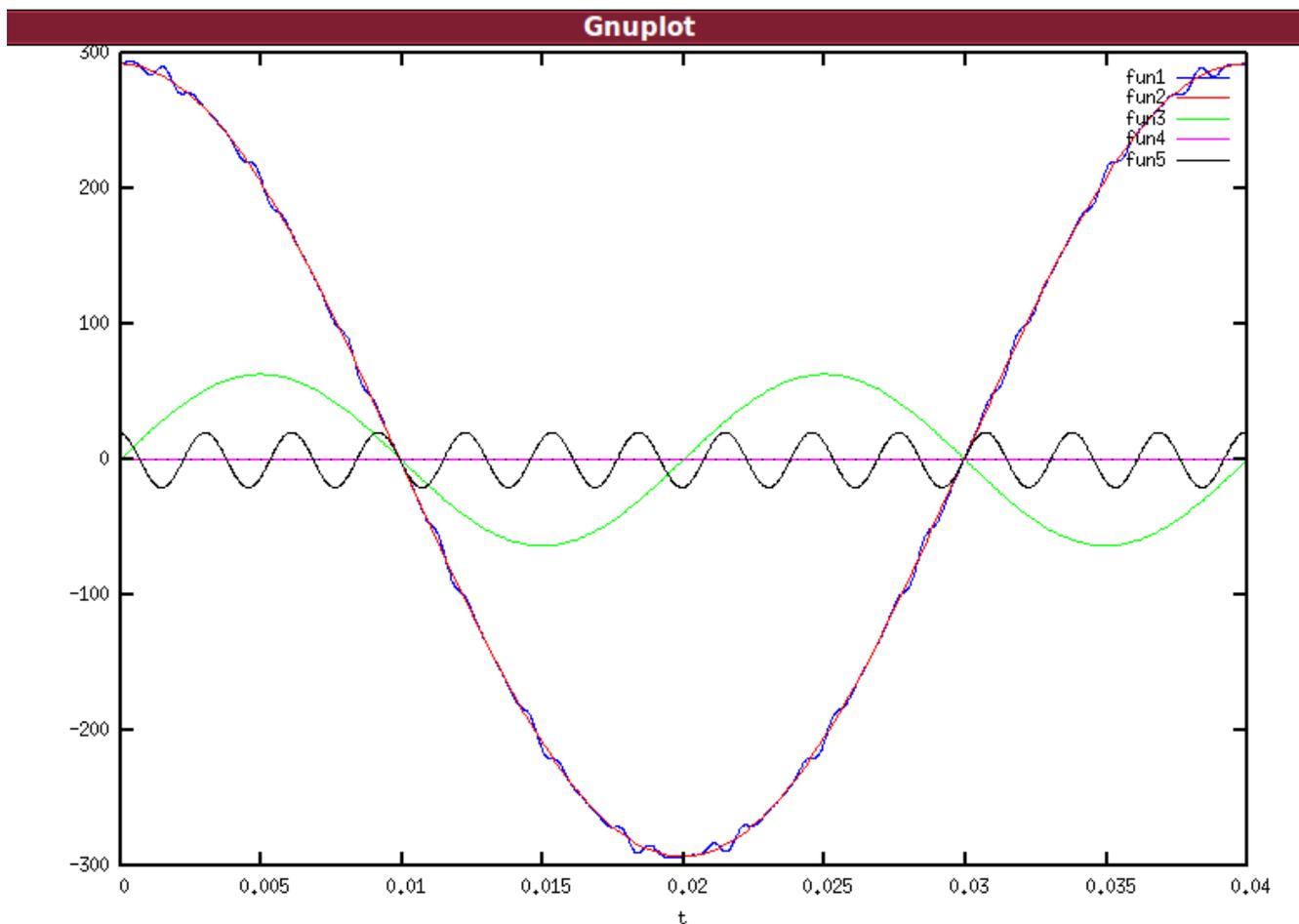


Рисунок 29 - Ток в сети после фильтрации 2 и 13 гармоник (синяя линия)

Распечатаем формулы гармоник, до 50 включительно (Приложение В, программный расчет 7).

Анализ ШИМ импульсов методом Фурье

Управление подачей мощности к нагрузке методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ или PWM широтно-импульсная модуляция, по-английски pulse-width modulation) заключается в изменении длительности импульса при постоянной частоте следования импульсов. Применение широтно-импульсной модуляции позволяет повысить КПД электрических преобразователей, особенно это касается импульсных преобразователей, составляющих сегодня основу вторичных источников питания различных электронных аппаратов.

Выходные импульсы получаются прямоугольными, частота их следования фиксирована, а длительность положительной части импульса связана с временем, которое можно описать формулой

$$\Delta T = \frac{t_k U_{\text{appr}} dt}{A_{\text{ШИМ}}} \quad (86)$$

где U_{appr} — напряжение, которое аппроксимируется; $A_{\text{ШИМ}}$ — напряжение аппроксимации; t_n и t_k — начало и конец ШИМ-импульса

Аппроксимируем сигнал $U_{\text{appr}} = \sin(\omega_{\text{ар}} * t)$ ШИМ-импульсами в системе компьютерной математики xMaxima. В связи с тем, что наглядность изображения на графике с увеличением частоты модулируемого сигнала и частоты дискретизации пропадает, в качестве демонстрации работы программы ограничимся частотой дискретизации 10 импульсов/период.

Разложить на гармоники импульсную функцию — задача нетривиальная, поэтому воспользуемся пакетом *fft*. Аппроксимируем требуемую синусоиду ШИМ-импульсами, опишем их двумя точками, затем разложим на гармоники по методу БПФ.

5.3 Ожидаемый экономический эффект с внедрением активного фильтра с общим звеном постоянного тока в систему частотного привода

В результате проведенного сравнительного анализа гармонического состава первичного тока блока частотный привод без активного фильтра и первичного тока системы частотный привод с использованием активного фильтра с общим звеном постоянного тока. Можно под итожить, что применение активного фильтра с общим звеном постоянного тока помогло уменьшить влияние нелинейных искажений первичного тока системного блока частотного привода в десятки раз.

Проведем оценку экономической эффективности использования разработанного активного фильтра с общим звеном постоянного тока в системе частотного привода асинхронного двигателя (30 кВт). Годовая экономия потребляемой реактивной мощности составит:

$$W_Q = Q_H - Q_C \cdot t_{\text{раб}} \cdot k_{\text{загр}} = (3 \cdot 10^3 - 0.2 \cdot 10^3) \cdot 8528 \cdot 0.8 = 87.4 \cdot 10^3 \text{ кВАр}$$

, где $t_{\text{раб}}$ – рабочее время в году, $k_{\text{загр}}$ – коэффициент загрузки оборудования.

При стоимости 1 кВАр·ч электрической энергии, равной 0,42 руб. желаемый экономический эффект от снижения потребления реактивной мощности на примере рассматриваемой системы ПЧ-АД составит 40150 руб./год.

Годовая экономия активной мощности за счет увеличения $\cos\varphi$ составит:

$$W_P = P_1 \cdot t_{\text{раб}} \cdot k_{\text{загр}} \cdot k_{\text{П}} \left(\frac{1 - \cos^2 \varphi_H}{\cos^2 \varphi_C} \right) = 12 \cdot 10^3 \cdot 8528 \cdot 0.8 \cdot 0.12 \left(\frac{1 - 0.55^2}{0.98^2} \right) = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кВт}$$

, где P_1 – потребление активной мощности без использования активного фильтра.

При стоимости одного кВт·ч электрической энергии, равной 2,83 руб. желаемый экономический эффект от снижения потребления реактивной мощности на примере рассматриваемой системы ПЧ-АД составит 29150 руб./год. Суммарный экономический эффект составит 72300 руб./год, то есть 2020 руб. на 1 кВт мощности ПЧ.

Однако, помимо прямого экономического эффекта, использование активного фильтра с общим звеном постоянного тока будет оказывать и косвенный экономический эффект, заключающийся в увеличении срока безаварийной эксплуатации электрооборудования и снижению затрат связанных с ремонтом и простоем электрооборудования.

Вывод

Разработана компьютерная модель в программе MATLAB системы «частотный привод с параллельно-подключенным активным фильтром» и проведены ее исследования и анализ в различных режимах работы. Полученные характеристики компьютерной модели данной системы, подтверждают теоретические характеристики.

Заключение

В результате проведенных исследований была решена задача, заключающаяся в сравнительном анализе и разработке методов компенсации нелинейных нагрузок для обеспечения требований ТУ ОЭЗ предъявленных при согласовании договора о строительстве завода АТТР. По полученным материалам диссертации можно сформулировать следующие выводы:

1. Произведены замеры показателей качества электроэнергии предприятия, определены источники нелинейных нагрузок. Основными источниками нелинейных нагрузок, не имеющих при проектировании производителем средств для их компенсации, являются частотные приводы в составе асинхронных двигателей в системе вентиляции.

2. Выполнены мероприятия по выделению системы вентиляции в отдельную группу.

3. Разработана силовая структура системы параллельного активного фильтра с общим звеном постоянного тока на основе ШИМ с частотно-временным методом с применением блока быстрого преобразования Фурье и баланса мощности. Эта система блока активного фильтра обладает высокой точностью и быстродействием, имеет высокую устойчивость работы при несинусоидальном напряжении сети электроснабжения.

4. Разработана компьютерная модель и произведен анализ полученных характеристик системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока – частотный привод – асинхронный двигатель». В результате компьютерного моделирования можно сделать вывод, что параллельный активный фильтр с общим звеном постоянного тока обладает способностью компенсировать нелинейные искажения первичного тока и реактивную мощность системы «частотный привод-асинхронный двигатель» и подтверждают расчетные характеристики разработанного активного фильтра с общим звеном постоянного тока.

5. Проведены исследования энергетических характеристик системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока –частотный привод-асинхронный двигатель». Данные исследования подтверждают высокую эффективность параллельного активного фильтра с общим звеном постоянного тока во время компенсации нелинейных искажений первичного тока и реактивной мощности, потребляемых блоком «частотный привод-асинхронный двигатель». Использование активного фильтра с общим звеном постоянного тока позволяет снизить сумму коэффициента гармонических составляющих первичного тока блока «частотный привод-асинхронный двигатель» больше чем на величину (с $K_i = 64,19$ % до показателя $K_i = 2,34$ %) и увеличивает показатель коэффициента мощности блока системы «частотный привод-асинхронный двигатель» с $\cos\varphi = 0,4 - 0,75$ до приближения показателей к $\cos\varphi \approx 1$. При всем при этом коэффициент полезного действия блока системы «активный фильтр с общим звеном постоянного тока –частотный привод-асинхронный двигатель» всего лишь незначительно уменьшается на 1-2% по сравнению с коэффициентом полезного действия блока системы без активного фильтра. Прогнозируемый экономический эффект от использования активного фильтра с общим звеном постоянного тока в системе частотного привода составит не менее 2000 рублей на 1 кВт мощности частотного привода в год.

Список используемых источников

1. ГОСТ Р 54149 – 2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012.с.20.
2. ГОСТ 32144 – 2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014.с.20.
3. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2014. с. 52.
4. Xiaobo Hysteresis Current Control Strategy for Three-phase Three-wire Active Power Filter; F. Xiaobo, S. Qian, Z. Dairun; Automation of Electric Power Systems. – 2013. – № 18.с. 57-61.
5. Жижеленко, И.В. Электромагнитная совместимость потребителей: монография; И.В. Жижеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк. М.: Машиностроение, 2012.с.350.
6. Беляев, В.Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией; В. Л. Беляев, С. Н. Радимов; Электромеханические и энергосберегающие системы. –2012. –№3.с. 469-471.
7. Кучумов, В.А. Расчет величин гармоник тока электровоза постоянного тока с прямым самоуправлением трехфазного тягового двигателя переменного тока; В.А. Кучумов, А.С. Княжева; Сборник научных трудов ОАО «ВНИИЖТ». – 2012. с. 92-100.
8. Sandeep G.J. Importance of Active Filters for Improvement of Power Quality; G. J. Sandeep, Sk. Rasoolahemmed; International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). –2013. –№ 4.с. 1164-1171.

9. Долингер, С.Ю. Проблемы активной фильтрации кривой тока в четырехпроводной трехфазной сети; С. Ю. Долингер, С. В. Бирюков, Р. К. Романовский; Омский научный вестник. –2012. –№2 (110).с. 215-218.

10. Дмитриев, С.М. Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник; С.М. Дмитриев, А.С. Плехов, В.Г. Титов, Д.Ю. Титов, С.Н. Яшин; Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2012. –№ 2.с. 206-214.

11. Кашканов, А.О. Энергосберегающее управление электрическими узлами нагрузки; А.О. Кашканов, А.С. Плехов; XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. –Москва. –2014.с. 5171-5179.

12. Мещеряков, В.Н. Компенсация гармонических искажений и реактивной мощности в однофазных электрических сетях посредством параллельного активного фильтра электроэнергии на базе релейного регулятора тока; В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин; Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Новочеркасск. –2013. –№4.с. 54-57.

13. The practical implementation of relay control of current as main part in system of active filter of electric power; V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin; Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». –2013. –№2.с. 25-31.

14. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр электроэнергии с общим звеном постоянного тока и системой управления на основе релейного регулятора тока; В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин; Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. –2014. –№7.с. 26-33.

15. Артюхов, И.И. Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов; И. И. Артюхов, И. И. Бочкарева, А. А. Тримбач; Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 4. – Вып. 2.с. 165 – 170.

16. Бочкарева, И.И. Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода вентиляторов установок охлаждения газа с источниками электроснабжения; И. И. Бочкарева; Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2 (Электронный журнал) URL: www.science-education.ru,102-5814.

17. Мещеряков, В.Н. Компенсация высших гармоник тока и напряжения на основе активного фильтра с релейным регулированием в сетях питания радиотехнических устройств и компьютерных систем; В.Н. Мещеряков, М.М. Хабибуллин; Материалы XIX международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2013. –Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева. –2013. –2 с.

18. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник; Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 224 с.

19. Артюхов, И. И. Влияние частотно-регулируемого электропривода на питающую сеть; И. И. Артюхов, И. И. Бочкарева, С. В. Молот; Научное обозрение. – 2015. – № 4.с. 29 – 34.

20. Мещеряков, В.Н. Активный фильтр высших гармоник адаптированный к электроприводу переменного тока; В.Н. Мещеряков, Д.В. Безденежных, М.М. Хабибуллин; Сборник тезисов докладов 9-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Управление большими системами. – Липецк: Издательство ЛГТУ. –2012.с.164-167.

21. Active power filter with relay current regulator and common DC link for compensation of harmonic distortion in power grids; V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, S.Valtchev I.S. Pavlov; IFIP Advances in Information and Communication Technology 423. Technological Innovation for Collective Awareness Systems. 5th IFIP WG 5.5;SOCOLNET Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems DoCEIS 2014. Lisbon. –2014.с. 427-434.

22. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids / V.N. Meshcheryakov, M.M. Khabibullin, V.V. Pikalov, S.Valtchev // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014). Antalya. –2014.

23. Плехов, А.С. Расчет емкости конденсатора в цепи постоянного тока активного фильтра гармоник / А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Е.А. Чернов // Инженерный вестник Дона. –2014. –№1.с. 10-17.

24. Наумец, А.Е. Оптимизация контура регулирования тока электромагнитного подшипника; А. Е. Наумец, Р.С. Таганов, Г. М. Мирясов, В.Г.Титов; Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. –2013. –№5. с. 298-302.

25. Шилин, В.Г. Исследование оптимального и скользящего режимов управления с релейным элементом, охваченным обратной связью; А.А. Шилин, В.Г. Букреев, Вестник ТГУ. –2014. –№3. с. 12-19.

26. Джендубаев, А.-З.Р. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение». Джендубаев А.-З. Р. Алиев И. И. – Черкеск. – 2014.

27. Глазырин, В.Е. Микропроцессорные релейные защиты блока генератор-трансформатор [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Глазырин В.Е., Осинцев А.А., Танфильев О.В.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.— 140 с.

28. Регулируемый электропривод. Моделирование переходных процессов [Электронный ресурс]: методические указания к практическим занятиям и курсовому проекту/ — Электрон. текстовые данные.— Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2014.— 25 с.

29. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учебник/ Овсянников А.Г., Борисов Р.К.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013.— 194 с.

30. Шойко В.П. Автоматическое регулирование в электрических системах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Шойко В.П.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012.— 195 с.

Приложение А



Приложение 1 к договору об осуществлении
технологического присоединения № 879005
от «26» 08.2015 г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

на технологическое присоединение объектов

ООО «Атсумитек Тойота Цусе Рус»

расположенных на территории Особой экономической зоны промышленно-производственного типа «Тольятти» на территории муниципального района Ставропольский Самарской области.

(заявка № 218 от 26 августа 2015 г.)

1. Наименование энергопринимающих устройств заявителя: ТП-10 кВ
2. Наименование и место нахождения объектов, в целях электроснабжения которых осуществляется технологическое присоединение энергопринимающих устройств заявителя: энергопринимающие устройства «Атсумитек Тойота Цусе Рус», расположенные по адресу: Самарская область. Ставропольский район, сельское поселение Подстепки. земельный участок с кадастровым № 63:32:1702003:24.
3. Максимальная мощность присоединяемых энергопринимающих устройств заявителя составляет: 919.94 кВт
4. Категория надежности: 1 этап - 919.94 кВт по второй категории НЭС.
2 этап - 919.94 кВт по второй категории НЭС.
5. Класс напряжения электрических сетей, к которым осуществляется технологическое присоединение 10 (кВ).
6. Год ввода в эксплуатацию энергопринимающих устройств заявителя:
1 этап - IV кв. 2015 г.. 2 этап - 2016 г.

7. Точка присоединения энергопринимающих устройств:

1 этап: существующие КЛ 10 кВ от разных секций шин РУ-10 кВ БКТП-6 АО «ОЭЗ». 2 этап - разные секций шин РУ-10 кВ РП-4 АО «ОЭЗ».

8. Распределение максимальной мощности по точкам присоединения:

1 и 2 этап - первая точка: 919.94 кВт, вторая точка: 919.94 кВт (резерв).

Фактическое распределение максимальной мощности может отличаться от указанного в зависимости от режима работы энергосистемы.

9. Сетевая организация осуществляет:

По I этапу:

- Проверку выполнения выданных технических условий Заявителем.
- С момента получения документов, подтверждающих готовность оборудования Заявителя к приему электрической энергии (Акт осмотра электроустановки, подписанный уполномоченным представителем органа федерального государственного энергетического надзора) осуществить фактическое присоединение объектов Заявителя.

По II этапу:

9.1 .Строительство и ввод в эксплуатацию РП-4 АО «ОЭЗ». После осуществления присоединения по схеме II этапа, восстановить ранее существующую ЛЭП 10 кВ от БКТП-2 до БКТП-6 АО «ОЭЗ».

9.2. Проверку выполнения выданных технических условий Заявителем.

9.3. С момента получения документов, подтверждающих готовность оборудования Заявителя к приему электрической энергии (Акт осмотра электроустановки, подписанный уполномоченным представителем органа федерального государственного энергетического надзора) осуществить фактическое присоединение объектов Заявителя.

10. Заявитель осуществляет:

По I этапу:

- Проектирование и строительство ТП 10/0,4 кВ с трансформаторами требуемой мощности, исполнение ТП 10/0,4 кВ, конструкцию,

электротехническое оборудование, исполнение коммутационных аппаратов согласовать с ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти» на стадии разработки ПСД. Для электроснабжения ТП 10/0,4 кВ Заявителя предусмотреть проектом прокладку двух ЛЭП 10 кВ расчетного сечения от существующих КЛ 10 кВ от ячеек разных СШ РУ 10 кВ БКТП-6 АО «ОЭЗ» до ТП Заявителя.

- Марку, трассы и способ прокладки ЛЭП 10 кВ от БКТП-6 АО «ОЭЗ» к вновь построенной ТП 10/0,4 кВ Заявителя согласовать с ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти» на стадии проектирования.

- Учет электроэнергии.

1. Расчетные приборы учета электроэнергии установить на границе балансовой принадлежности (п. 11.1. настоящих ТУ) в соответствии с Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии, раздел X «Правила организации учета электрической энергии на розничных рынках» (утверждены Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442), ПУЭ (гл. 1.5), РД 34.09.101-94. Типы, марки приборов учета (счетчики электрической энергии, измерительные трансформаторы) согласовать с АО «ОЭЗ», филиалом АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти».

2. В случае, если приборы учета не включены в систему АИИС КиТУЭ АО «ОЭЗ», Заявителю предусмотреть интеграцию приборов учета электроэнергии в вышеуказанную систему. Технические решения по интеграции согласовать с АО «ОЭЗ».

3. Требования к приборам учета электроэнергии:

- Приборы учета электроэнергии должны соответствовать действующей на территории РФ нормативно-технической документации:

счетчики - ГОСТ 31819.22-2012, ГОСТ 31819.23-2012; трансформаторы тока - ГОСТ 7746-2001. трансформаторы напряжения ГОСТ 1983-2001

4. Приборы учета электроэнергии (счетчики, трансформаторы тока) должны быть внесены в Госреестр средств измерений РФ и иметь класс точности: -счетчики и трансформатор тока - не хуже 0,5S.

-трансформаторы напряжения - не хуже 0,5.

5. Счетчики должны иметь два цифровых интерфейса RS-485 и оптический, резервное питание от сети 220 В с применением АВР. К применению рекомендуются счетчики типа СЭТ-4ТМ.03М.01 (ПСЧ-4ТМ.05М.04).

6. Требования к измерительным цепям:

- Подключение счетчиков к измерительным цепям выполнить через испытательную коробку (специализированный клеммник). Измерительные цепи должны быть выполнены отдельным изолированным кабелем, защищенным от короткого замыкания и влияния магнитных помех силового и электронного оборудования.

- В измерительных цепях должна быть предусмотрена возможность замены счетчика и подключения образцового счетчика без отключения присоединения.

7. Опломбирование, установку знаков визуального контроля, а также допуск в эксплуатацию расчетных приборов учета выполнить в соответствии с Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии, раздел X «Правила организации учета электрической энергии на розничных рынках» (утверждены Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 №442).

По II этапу:

10.1. Для электроснабжения ТП 10/0,4 кВ Заявителя (запроектированную и построенную по I этапу) предусмотреть проектом прокладку двух ЛЭП 10 кВ расчетного сечения от ячеек разных СШ РУ 10 кВ РП-4 АО «ОЭЗ». Номера фидеров РП-4 для присоединения дополнительно запросить в филиале АО

«ОЭЗ» в Самарской области / ОАО ОЭЗ ППТ «Тольятти на стадии разработки ПСД.

10.2. Марку, трассы и способ прокладки ЛЭП 10 кВ от РП-4 АО «ОЭЗ» ТП 10/0,4 кВ Заявителя согласовать с ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти» на стадии проектирования.

Общие требования для I и II этапов:

10.3 Токи короткого замыкания в электроустановках Заявителя для выбора электрооборудования и расчета уставок РЗА определить проектом и

согласовать в филиале АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти». Уставки устройств РЗА, устанавливаемых в электроустановках Заявителя уточнить на момент ввода в эксплуатацию электроустановок и согласовать с филиалом АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти».

10.4 В случае необходимости обеспечения I-й категории надежности электроснабжения в распределительных устройствах энергоустановок Заявителя предусмотреть схему резервирования с АВР.

10.5 Проектом электроснабжения определить необходимость установки средств компенсации реактивной мощности из расчета предельного значения коэффициента реактивной мощности не выше 0,4 ($\text{tg}\varphi < 0,4$) в точках присоединения электроустановок Заявителя к электрической сети АО «ОЭЗ», при необходимости установить эти средства, место установки определить проектом.

10.6 В случае наличия на предприятии особой группы электроприемников I-й категории надежности предусмотреть проектом и установить независимый источник питания (ДГУ, ИБП т.п.), рассчитанный на обеспечение аварийной брони и питание электрической энергией особой группы электроприемников I-й категории надежности с исключением возможности параллельной работы с системой.

10.7 В случае необходимости проектом предусмотреть выделение электроснабжения электроприемников аварийной брони на отдельные питающие линии, по которым подача электрической энергии и мощности не подлежит ограничению при угрозе аварийных энергетических режимов.

10.8 Проектом определить допустимый и фактический вклад потребителя по показателям качества электроэнергии (ГОСТ 32144-2013) в точках присоединения. В случае необходимости предусмотреть установку устройств, снижающих влияние потребителя на качество электроэнергии. Потребитель самостоятельно обеспечивает показатели качества электроэнергии в границах своей балансовой принадлежности.

10.9 Проект электроснабжения Заявителя выполнить с привлечением организации, имеющей право на осуществление данного вида деятельности и согласовать с АО «ОЭЗ», филиалом АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти» и со всеми организациями, осуществляемыми эксплуатацию инженерных сетей в данном районе.

10.10 Для проведения проверки выполнения технических условий Заявитель предоставляет в АО «ОЭЗ» (филиал АО «ОЭЗ» в Самарской области/ОАО «ОЭЗ ППТ »Тольятти») уведомление о выполнении технических условий с приложением следующих документов:

- копии сертификатов соответствия на электрооборудование (если оборудование подлежит обязательной сертификации) и (или) сопроводительной технической документации (технические паспорта оборудования), содержащей сведения о сертификации;

- копии разделов проектной документации, предусматривающих технические решения, обеспечивающие выполнение технических условий, в

том числе решения по схеме внешнего электроснабжения, релейной защите и автоматике, телемеханике и связи, в случае, если такая проектная документация не была представлена Заявителем в АО «ОЭЗ» (филиал АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти») до направления

Заявителем в АО «ОЭЗ» (филиал АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти») уведомления о выполнении технических условий (если в соответствии с законодательством Российской Федерации о градостроительной деятельности разработка проектной документации является обязательной);

- документы, содержащие информацию о результатах проведения пусконаладочных работ, приемо-сдаточных и иных испытаний;

временные нормальные схемы электрических соединений объекта электроэнергетики, в том числе однолинейную схему электрических соединений (электроустановки).

10.11 Получить разрешение управления Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на допуск к эксплуатации энергопринимающих устройств Заявителя.

10.12 В случае возникновения в ходе проектирования необходимости частичного отступления от технических условий обязательно их согласовать с АО «ОЭЗ» и филиалом АО «ОЭЗ» в Самарской области / ОАО «ОЭЗ ППТ «Тольятти» с корректировкой утвержденных технических условий.

11. Прочие условия:

11.1 Предварительно определить границу балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности между электрическими сетями АО «ОЭЗ» и Заявителем: На соединительных кабельных муфтах К Л 10 кВ на эстакаде АО «ОЭЗ» - для 1 этапа. На кабельных наконечниках отходящих ЛЭП 10 кВ (к построенной по 1 этапу ТП 10/0,4 кВ Заявителя) в РУ-10 кВ РП-4 ОАО «ОЭЗ» - для 2 этапа.

11.2. При наличии непрерывных технологических процессов, нарушение которых связано с высокими материальными затратами, оснастить электрические сети Заявителя средствами, обеспечивающими нечувствительность систем управления непрерывным технологическим процессом к провалам напряжения в соответствии с ГОСТ 32144-2013.

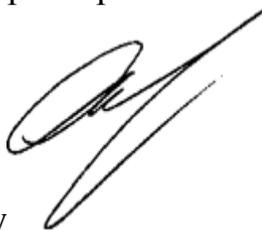
11.3. Подача напряжения по I и II этапам на электроприёмники потребителя будет произведена только после заключения договора технологического присоединения, выполнения заявителем ТУ, оформления акта осмотра электроустановок и разрешения на ввод их в эксплуатацию инспектором Ростехнадзора, оформления и согласования акта допуска в эксплуатацию расчетных приборов учета, заключения договора с энергоснабжающей организацией на поставку электроэнергии (мощности) для ООО «Атсумитек Тойота Цусе Рус».

12. Срок действия настоящих технических условий пять лет со дня заключения договора.

12.1. При невыполнении настоящих технических условий в срок и наличии на дату окончания срока их действия технической возможности технологического присоединения АО «ОЭЗ», по обращению Заявителя, вправе продлить срок действия настоящих технических условий.

13. Ранее выданные технические условия от 10.07.2015 № Э-Т-297 считать аннулированными.

Заместитель генерального директора



И.С. Минкин

АО «ОЭЗ» по строительству

Приложение Б

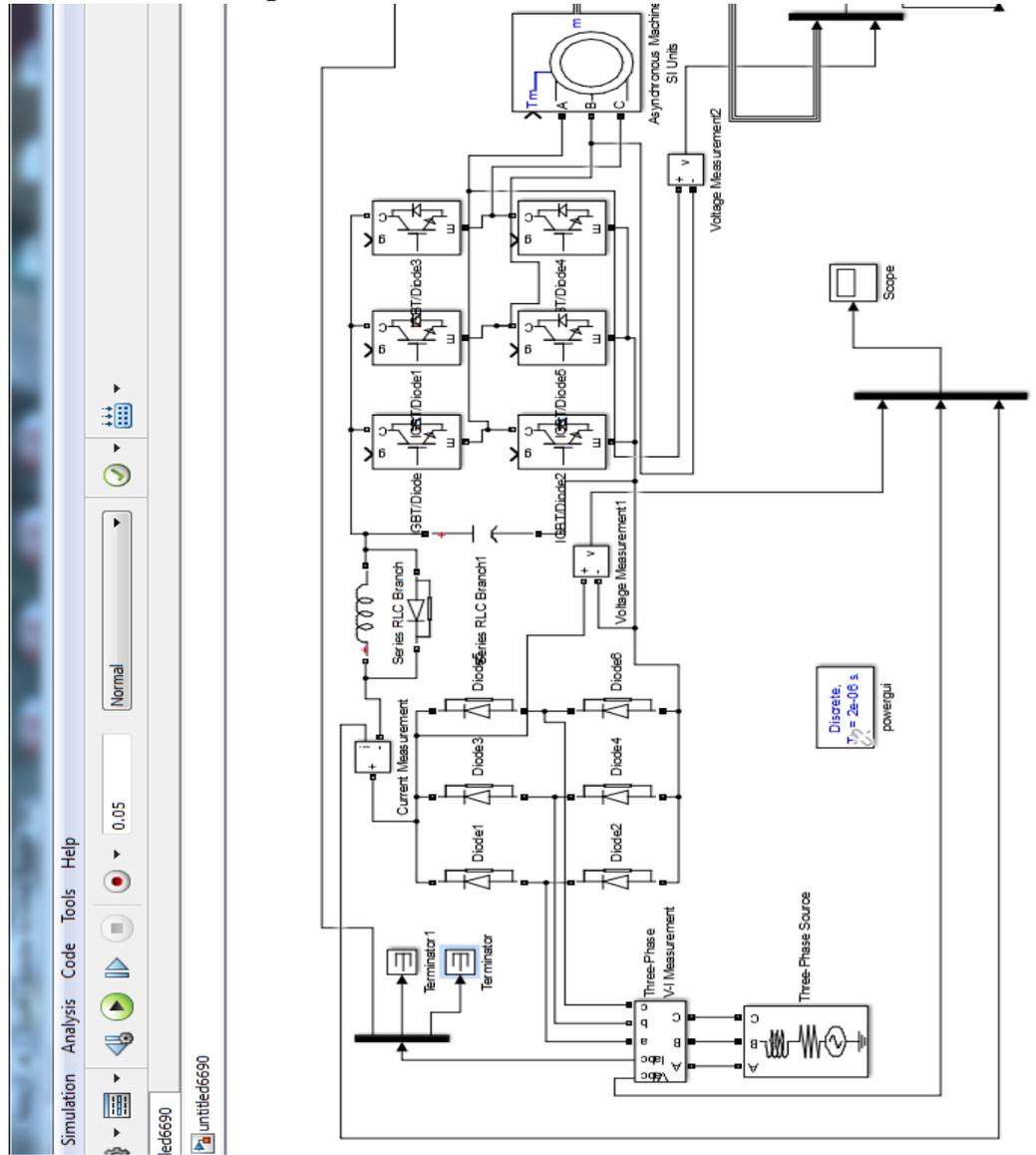


Рисунок1Б Модель системы частотного привода без активного фильтра.

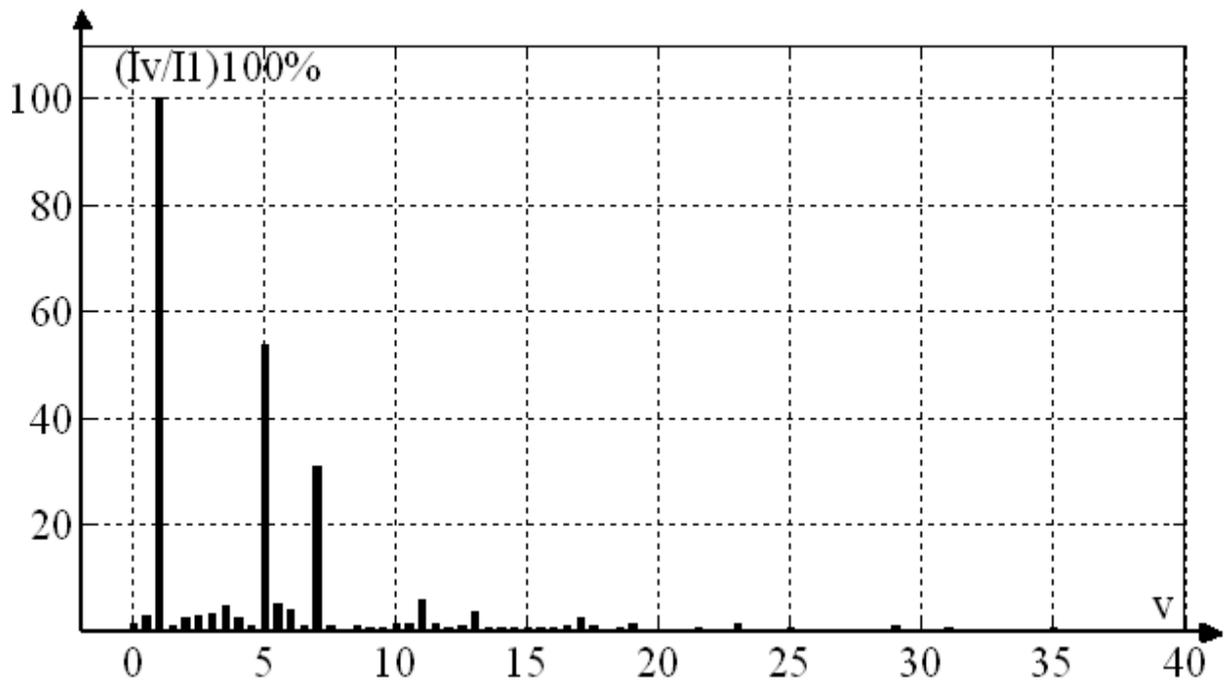


Рисунок 2Б - Спектр гармоник системы частотного привода без применения активного фильтра

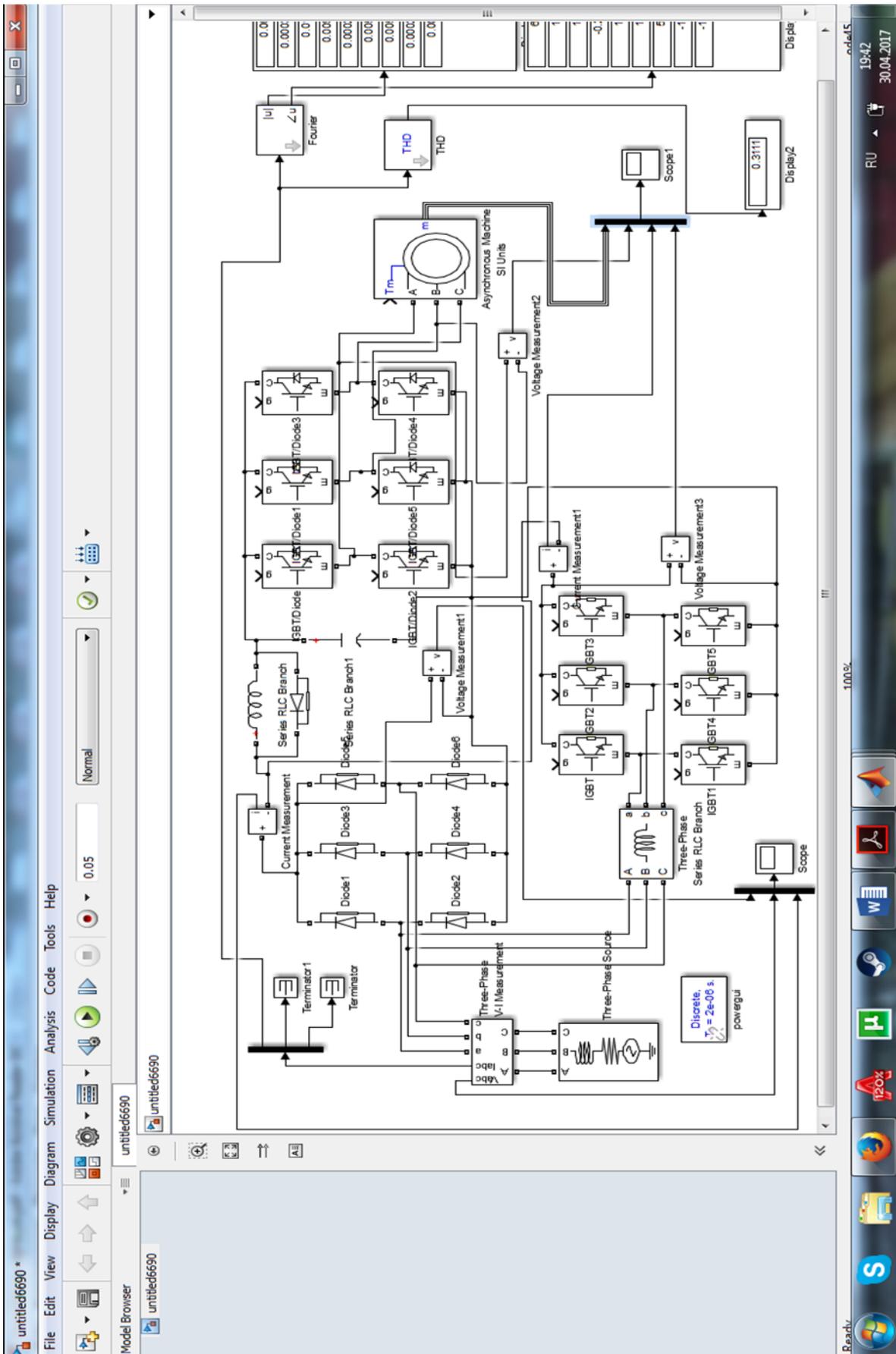


Рисунок 3Б - Модель системы частотного привода с применением активного фильтра

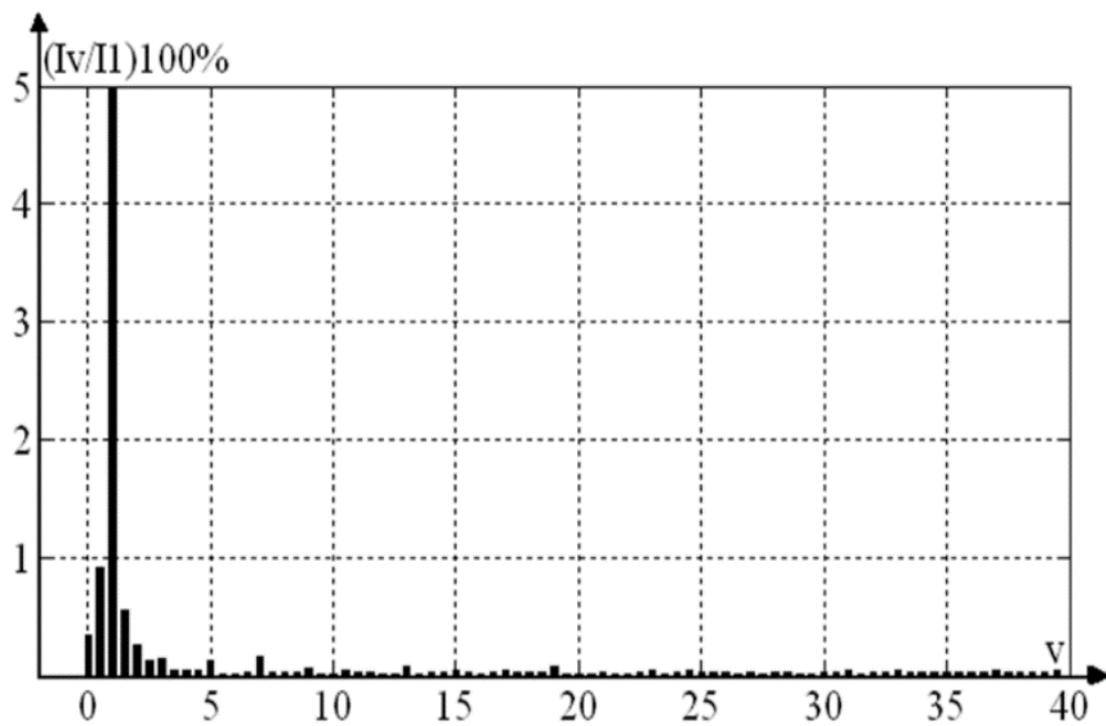


Рисунок 4Б Спектр гармоник с применением активного фильтра.

Приложение В

Программный расчет 1В

Данные вводим в форме: «f0: 50; »

```
(%i1) f0:50$ U0:380*sqrt(2)$ W: 30000$ R:1.5$ fd:25$ K:32$ L:1.0E-4$
U_rec:320$
```

```
/* выведем исходные данные для контроля */
```

```
display(f0,U0,W,U_rec,R,f,K,L,C1)$ K:32$ C1:W*1.2*10^-7$
```

```
 $\omega_{ap}:2*\%pi*fd$$ 
```

```
 $\omega0:2*\%pi*f0$$ 
```

```
/* выбираем расчетную частоту, которой кратны и частота питающей сети, и частота двигателя */ f:gcd(f0,fd)$
```

```
 $\omega:gcd(\omega_{ap}, \omega0)$$  /* формула выпрямленного напряжения, foo, B */
```

```
fooA:abs(U0*abs(sin( $\omega0*t-(2*\%pi)/3$ ))-U_rec)+(U0*abs(sin( $\omega0*t-(2*\%pi)/3$ ))-U_rec)$
```

```
fooB:abs(U0*abs(sin( $\omega0*t$ ))-U_rec)+(U0*abs(sin( $\omega0*t$ ))-U_rec)$
```

```
fooC:abs(U0*abs(sin( $(2*\%pi)/3+\omega0*t$ ))-U_rec)+(U0*abs(sin( $(2*\%pi)/3+\omega0*t$ ))-U_rec)$
```

```
foo:fooC+fooB+fooA$
```

```
plot2d([foo,fooA,fooB,fooC],[t,0,1/f0])$
```

```
/* пользовательская функция */ signx(x):=if x < 0 then -1 else (if x > 0 then 1 else 0)$
```

```
load(fft)$
```

```
(%i11)  $f0 = 50$ 
```

```
 $U0 = 95 * 2^{5/2}$ 
```

```
 $W = 30000$ 
```

```
 $U\_rec = 320$ 
```

```
 $R = 1.5$ 
```

```
 $f = f$ 
```

```
 $K = 32$ 
```

```
 $L = 1.0E-4$ 
```

```
 $C1 = 2.5E-4$ 
```

```
(%i23) "/usr/share/maxima/5.37.2/share/calculus/fourie.mac"
```

```
(%i24) Nimp:floor((2048*fd)/f)$
```

```
k_discr:2^floor(log(Nimp*K)/log(2))$
```

```
Nn:makelist(i,i,1,k_discr)$
```

```
ev(step_1:1/(Nimp*f),numer)$
```

```
/* массив значений времени, "попиксельно" */ tn:makelist(((i-1)/f)/k_discr,i,1,k_discr)$
```

```
uL:ev(foo,t = tn)$
```

```
k:makelist(i,i,1,50)$
```

```
(%i31) cosn:cos(2*\%pi*Nn*f*t)$ sinn:sin(2*\%pi*Nn*f*t)$
```

```

ev(z1:fft(uL),numer)$
ev(cn:      makelist(sqrt((realpart(z1[1+k_discr-i])      +realpart(z1[i]))^2
+(imagpart(z1[1+k_discr-i])-imagpart(z1[i]))^2),i,1,k_discr),numer)$
N1:k_discr/2$
plot2d([discrete,Nn,cn],[color,red],[y, 10^-5,10^3],[logy])$
(%i35)      plot2d([discrete,k,      makelist(cn[i],i,1,50)],[color,red],[y,      10^-
5,10^3],[logy],[gnuplot_term,png],[gnuplot_out_file,"Амплитуды гармоник, до 50-
й, выпрямленного напряжения.png"])$
Программный расчет 2
(%i36) cnIrec:cn/sqrt((2*%pi*f*Nn*L)^2+R^2)$
plot2d([discrete,Nn,cnIrec],[color,red],[y,1/10^5,10^3],[logy],[gnuplot_term,png],[gn
uplot_out_file,"Амплитуды гармоник выпрямленного тока.png"])$
plot2d([discrete,k,makelist(cnIrec[i],i,1,50)],[color,red],[y,1/10^5,cn[1]],[logy],[gnup
lot_term,png],[gnuplot_out_file,"Амплитуды гармоник, до 50-й, выпрямленного
тока.png"])$
Программный расчет 3
(%i40) /* вспомогательная функция */ abc:integrate(sin(omega_ap*tr),tr)$
t_1:makelist(step_1*(i-1),i,1,Nimp)$
ev(DT:ev(abc,tr = step_1+t_1)-ev(abc,tr = t_1),numer)$
n:floor(tn/step_1)$
n1:n+1$
y_pl:makelist(if      abs(DT[n1[i]])+n[i]*step_1      <=      tn[i]      then      0      else
signx(DT[n1[i]]),i,1,k_discr)$
(%i46)      /* нарисуем график подачи импульсов ШИМ */
plot2d([discrete,Nn,y_pl],[color,red],[y,-
1.2,1.3],[gnuplot_term,png],[gnuplot_out_file,"Импульсы      аппроксимации
выходного напряжения.png"])$
Программный расчет 4
(%i47)      plot2d([discrete,makelist(cnIrec[i],i,1,200),      makelist(y_pl[i],i,1,200)
],[color,red],[y,-1.2,1.3] )$
(%i49) /* разлагаем на гармоники токи ШИМ */ Id:(sqrt(2)*W)/U_rec$
ev(zI2:fft(y_pl*Id),numer)$
ev(cnI2:makelist(sqrt((imagpart(zI2[(-i)+k_discr+1])-
imagpart(zI2[i]))^2+(realpart(zI2[(-
i)+k_discr+1])+realpart(zI2[i]))^2),i,1,k_discr),numer)$
plot2d([discrete,Nn,cnI2],[color,red],[y,1/10^3,10^3],[logy],[gnuplot_term,png],[gnu
plot_out_file,"Амплитуды гармоник тока ШИМ.png"])$
(%i52)
plot2d([discrete,k,makelist(cnI2[i],i,1,50)],[color,red],[y,1/10^3,10^3],[logy],[gnuplo
t_term,png],[gnuplot_out_file,"Амплитуды гармоник ШИМ, до 50-й.png"])$
Программный расчет 5

```

```

(%i55) zI1: z1/(%i*ω*Nn*L +R)$ zSum: zI1+zI2$
(%i57) /* определим гармоники суммарного влияния выпр. и ШИМ */
ev(cnS:makelist(sqrt((imagpart(zSum[(-i)+k_discr+1]- zSum[i]))^2+(realpart(
zSum[(-i)+k_discr+1]+ zSum[i]))^2),i,1,k_discr),numer)$
(%i58)
plot2d([discrete,k,makelist(cnS[i],i,1,50)],[color,red],[y,1/10^3,10^3],[logy],[gnuplot
_term,png],[gnuplot_out_file,"Амплитуды гармоник тока (sum), до 50-й.png"])$
Программный расчет 6
(%i58) N_garm: makelist (realpart(zSum[i])*cos(i*ω*t) + imagpart(zSum[i])*sin(i*
ω*t) ,i,1,50) $
(%i59) B: sum(N_garm[i], i,1,50) $ plot2d([B-N_garm[2] -N_garm[13] ,
N_garm[1] , N_garm[2] , N_garm[12] , N_garm[13] ], [t, 0, 1/f])$
Программный расчет 7
(%i61) pe4: makelist([ "# " , i , N_garm[i] ] , i,1,50)$ display(pe4),numer;
pe4 = [{"# ",1, 292.8166580609264*cos(157.0796326794896*t)
-3.06640875095302*sin(157.0796326794896*t)},
{"# ",2,
63.36233711998952*sin(314.1592653589793*t)
+0.1408549362323009*cos(314.1592653589793*t)},
{"# ",3,
(-0.09379825587767978*sin(471.2388980384689*t))
-0.01193742749872343*cos(471.2388980384689*t)},
{"# ",4,
0.4477121503167046*sin(628.3185307179587*t)
+0.06834386170589096*cos(628.3185307179587*t)},
{"# ",5,
0.04406691511243759*sin(785.3981633974482*t)
-0.03921653992751126*cos(785.3981633974482*t)},
{"# ",6,
0.04748090050933373*sin(942.4777960769379*t)
+0.009314288376993371*cos(942.4777960769379*t)},
{"# ",7,
0.05428987545991239*cos(1099.557428756427*t)
-0.01724940428458602*sin(1099.557428756427*t)},
{"# ",8,
0.2827725674875928*sin(1256.637061435917*t)
+0.01376511944890129*cos(1256.637061435917*t)},
{"# ",9,
0.01967885271868752*sin(1413.716694115406*t)
-0.01770631029159481*cos(1413.716694115406*t)},
{"# ",10,

```

$0.03721159083460224*\sin(1570.796326794896*t)$
 $-0.03135265910273188*\cos(1570.796326794896*t)],$
["# ",11,
 $(-0.03589340048034874*\sin(1727.875959474386*t))$
 $-0.0082683730742913*\cos(1727.875959474386*t)],$
["# ",12,
 $0.1793323182000559*\sin(1884.955592153875*t)$
 $+0.03251258877705721*\cos(1884.955592153875*t)],$
["# ",13,
 $20.18497449739435*\cos(2042.035224833365*t)$
 $-2.7499664116191*\sin(2042.035224833365*t)],$
["# ",14,
 $0.008812937922770733*\cos(2199.114857512855*t)$
 $-0.03050570249851402*\sin(2199.114857512855*t)],$
["# ",15,
 $0.01577699294676256*\sin(2356.194490192345*t)$
 $+0.01239729192626538*\cos(2356.194490192345*t)],$
["# ",16,
 $0.1525931134092399*\sin(2513.274122871834*t)$
 $+0.009032990387032007*\cos(2513.274122871834*t)],$
["# ",17,
 $0.00749455966129075*\sin(2670.353755551324*t)$
 $+0.004753972076366004*\cos(2670.353755551324*t)],$
["# ",18,
 $7.954690258335686E-4*\sin(2827.433388230813*t)$
 $-0.01812368769090553*\cos(2827.433388230813*t)],$
["# ",19,
 $(-0.001225526127068938*\sin(2984.513020910303*t))$
 $-0.0152328726624206*\cos(2984.513020910303*t)],$
["# ",20,
 $0.1183391131111045*\sin(3141.592653589793*t)$
 $-0.003949573194441474*\cos(3141.592653589793*t)],$
["# ",21,
 $(-0.01689660116074477*\sin(3298.672286269282*t))$
 $-0.01080160758794786*\cos(3298.672286269282*t)],$
["# ",22,
 $0.003809150624282872*\cos(3455.751918948772*t)$
 $-0.002739945599157423*\sin(3455.751918948772*t)],$
["# ",23,
 $0.007374600984012284*\cos(3612.831551628262*t)$
 $-0.008751793118111437*\sin(3612.831551628262*t)],$

["# ",24,
0.05627365417715989*sin(3769.911184307751*t)
+0.01590954924950095*cos(3769.911184307751*t)],

["# ",25,
2.054742787839961*cos(3926.990816987241*t)
-0.526398591669439*sin(3926.990816987241*t)],

["# ",26,
0.03223871256142105*sin(4084.070449666731*t)
-0.001393897862487867*cos(4084.070449666731*t)],

["# ",27,
0.007727795806662023*cos(4241.150082346221*t)
-0.009555334306443692*sin(4241.150082346221*t)],

["# ",28,
0.02032282174537762*sin(4398.22971502571*t)
+0.01335057357382868*cos(4398.22971502571*t)],

["# ",29,
0.01224660983089615*sin(4555.3093477052*t)
+0.007292732511400685*cos(4555.3093477052*t)],

["# ",30,
0.06890965946115202*sin(4712.38898038469*t)
+0.004497435996345997*cos(4712.38898038469*t)],

["# ",31,
0.003380194279605528*sin(4869.468613064179*t)
-0.005942247469121666*cos(4869.468613064179*t)],

["# ",32,
0.004496112294307165*sin(5026.548245743669*t)
+0.001142477746088581*cos(5026.548245743669*t)],

["# ",33,
0.0146513876474476*sin(5183.627878423159*t)
-0.00201638859461411*cos(5183.627878423159*t)],

["# ",34,
0.09108762964578282*sin(5340.707511102648*t)
-0.007713699679559983*cos(5340.707511102648*t)],

["# ",35,
(-5.110450358208812E-4*sin(5497.787143782138*t))
-0.003255675094190723*cos(5497.787143782138*t)],

["# ",36,
(-0.002987061420956895*sin(5654.866776461627*t))
-0.008043921713556323*cos(5654.866776461627*t)],

["# ",37,
1.061010886071332*sin(5811.946409141117*t)

$-2.752568947536009 \cdot \cos(5811.946409141117 \cdot t)$,
 ["# ",38,
 $0.06828428565483369 \cdot \sin(5969.026041820607 \cdot t)$
 $-0.002788820620683748 \cdot \cos(5969.026041820607 \cdot t)$],
 ["# ",39,
 $(-0.003557316265123938 \cdot \sin(6126.105674500097 \cdot t))$
 $-0.003634971501801685 \cdot \cos(6126.105674500097 \cdot t)$],
 ["# ",40,
 $0.03135051827376321 \cdot \sin(6283.185307179586 \cdot t)$
 $-0.003349803645113514 \cdot \cos(6283.185307179586 \cdot t)$],
 ["# ",41,
 $(-0.003147682327536565 \cdot \sin(6440.264939859076 \cdot t))$
 $-0.01515395901331054 \cdot \cos(6440.264939859076 \cdot t)$],
 ["# ",42,
 $0.00228733553200872 \cdot \sin(6597.344572538565 \cdot t)$
 $-0.007011669353304131 \cdot \cos(6597.344572538565 \cdot t)$],
 ["# ",43,
 $0.008521727517768092 \cdot \cos(6754.424205218055 \cdot t)$
 $-0.01585037693741076 \cdot \sin(6754.424205218055 \cdot t)$],
 ["# ",44,
 $0.05409487091346116 \cdot \sin(6911.503837897545 \cdot t)$
 $+0.009463792964947466 \cdot \cos(6911.503837897545 \cdot t)$],
 ["# ",45,
 $0.01084383820317163 \cdot \cos(7068.583470577035 \cdot t)$
 $-0.006582988297733614 \cdot \sin(7068.583470577035 \cdot t)$],
 ["# ",46,
 $0.0114242821562495 \cdot \cos(7225.663103256524 \cdot t)$
 $-0.02851301182534308 \cdot \sin(7225.663103256524 \cdot t)$],
 ["# ",47,
 $1.059079759271269 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(7382.742735936014 \cdot t)$
 $+0.01086978629252353 \cdot \cos(7382.742735936014 \cdot t)$],
 ["# ",48,
 $0.08110357702268606 \cdot \sin(7539.822368615503 \cdot t)$
 $+0.01314943127943489 \cdot \cos(7539.822368615503 \cdot t)$],
 ["# ",49,
 $1.122247086001837 \cdot \cos(7696.902001294993 \cdot t)$
 $-0.5636954108572946 \cdot \sin(7696.902001294993 \cdot t)$],
 ["# ",50,
 $0.001384768628131545 \cdot \cos(7853.981633974483 \cdot t)$
 $-0.0072221472962448 \cdot \sin(7853.981633974483 \cdot t)$]

