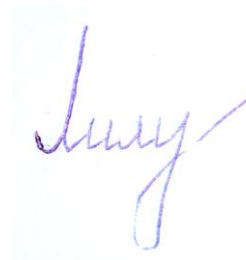


ФГБОУ ВПО «БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. В. Г. ШУХОВА»

На правах рукописи



Лимаров Денис Сергеевич

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЦЕХОВЫХ СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С  
НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические  
системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Авербух Михаил Александрович,  
доктор технических наук, профессор

Белгород – 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
Глава 1. Анализ проблемы электромагнитной совместимости в цеховых системах электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками .....	10
1.1. Анализ объекта исследования как источника высших гармоник тока и напряжения.....	10
1.2. Электромагнитная совместимость в цеховых системах электроснабжения и качество электроэнергии .....	14
1.3. Методы и средства решения проблем, связанных с возникновением высших гармонических составляющих токов и напряжений .....	19
Глава 2. Оценка гармонического состава токов и напряжений в цеховых системах электроснабжения с частотным крановым электроприводом.....	27
2.1. Экспериментальная оценка основных показателей качества электроэнергии в цеховых системах электроснабжения.....	27
2.2. Разработка имитационной модели цеховой системы электроснабжения в пакете Matlab.....	36
2.3. Сравнительный анализ основных показателей электромагнитной совместимости крановых электроприводов с цеховой системой электроснабжения.....	57
Глава 3. Разработка системы управления активным фильтром.....	63
3.1. Обоснование и выбор системы управления активным фильтром.....	63
3.2. Реализация системы управления активным фильтром на базе нечеткой логики.....	73
3.3. Моделирование системы управления активным фильтром на базе нечеткой логики в среде Matlab Simulink.....	84
Глава 4. Расчет и моделирование режимов работы цеховой системы	93

электроснабжения с активного фильтра гармоник.....	
4.1. Расчет основных параметров активного фильтра гармоник.....	93
4.2. Моделирование цеховой системы электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками.....	97
4.3. Разработка алгоритма работы СУ АФГ на базе нечеткой логики для реального фильтра.....	115
4.4. Экономическая оценка эффективности внедрения и использования АФГ.....	128
Заключение .....	131
Список литературы .....	132
Приложения .....	143
Приложение 1. Программа экспериментальных исследований электромагнитной совместимости в низковольтной сети 0,4 кВ при работе мостового однобалочного электрического крана, грузоподъемностью 15 тонн.....	143
Приложение 2. Протокол №1 измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VFS11-4075. Протокол №2 измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VFS11-4055. Протокол №3 измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VFS11-4055.....	148
Приложение 3. Акт внедрения результатов кандидатской диссертационной работы.....	173
Приложение 4. Исходный код программы управления фаззи-регулятором для СУ АФГ на базе нечеткой логики.....	175

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы.** На современных промышленных предприятиях Российской Федерации к общей шине цеховых систем электроснабжения подключается значительное число электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Это регулируемый электропривод динамических нагнетателей, металлорежущих станков, крановых механизмов. Так как электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками могут работать при различных режимах, так например, крановые механизмы, то характерной особенностью таких электроприемников является резкопеременный режим работы, обусловленный возможностью одновременной работы трех основных механизмов крана: подъем – спуск груза, перемещение тали и перемещение крана. Это обстоятельство приводит к тому, что преобладают переходные режимы, которые могут составлять до 60 % одного цикла работы крановых механизмов. Так как в основе регулируемого электропривода лежит принцип преобразования электроэнергии, за счет использования статических преобразователей, то такие установки являются электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, а значит генераторами высших гармоник тока и напряжения в питающую систему электроснабжения. В связи с этим возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприемников с питающей сетью и возможное нарушение работы других электроприемников, подключенных к общей шине цеховой системы электроснабжения.

Проблема ЭМС широко освещена в работах отечественных и зарубежных ученых, таких как: Арриллага Дж., Бадер М.П., Вагин Г.Я., Жежеленко И.В, Железко Ю.С., Короткевич М.А., Костенко М.Ф., Лизалек Н.Н., Манусов В.З., Сальников В.Г., Сарин Л.И., Челазнов А.А. и др. Авторы устанавливают природу возникновения высших гармонических составляющих на сеть, а также предлагают методы и средства их

компенсации. Исследования Апполонского С.М., Горелова В.П., Овсянникова А.Г., Ивановой Е.В., Карякина Р.Н. охватывают различные аспекты обеспечения ЭМС технических средств. Однако во всех работах рассматриваются стационарные режимы работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и не учитывается резкопеременный характер нагрузки.

В связи с этим, исследования, проводимые для обеспечения ЭМС в цеховых системах электроснабжения, где применяются электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками, работающие в динамических режимах, являются актуальными.

**Цель работы.** Обеспечение электромагнитной совместимости электроприемников с нелинейными вольт -амперными характеристиками в цеховой системе электроснабжения за счёт использования активных фильтров гармоник (АФГ) с системой управления на базе нечеткой логики.

Для достижения поставленной цели работы требуется решить следующие **основные задачи:**

1. Выполнить анализ гармонического состава токов и напряжений в узле нагрузки цеховой системы электроснабжения электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и различных способов компенсации высших гармонических составляющих на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

2. Экспериментально исследовать гармонический состав напряжений и токов, генерируемых в сеть электроприёмниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками при динамических режимах работы на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

3. Разработать имитационную модель цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками (на примере мостового крана), для оценки электромагнитной совместимости в узле нагрузки цеховой системы электроснабжения.

4. Разработать систему управления активным параллельным фильтром гармоник на базе нечеткой логики, в том числе базу нечетких правил для формирования сигнала управления фаззи – регулятором.

5. Провести оценку эффективности применения разработанного активного фильтра с системой управления на базе нечеткой логики для компенсации высших гармоник тока и напряжения в системе электроснабжения электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Имитационная модель с активным фильтром высших гармоник тока и напряжения системы электроснабжения крановых электроприемников.

2. Система управления активным фильтром высших гармонических составляющих тока и напряжения, включающая блок фаззи-регулятора.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии, обеспечивающих электромагнитную совместимость в узлах нагрузок без использования и при использовании активного фильтра.

4. Алгоритм расчета входных и выходных лингвистических переменных фаззи-регулятора, реализуемого в контроллере системы управления активным фильтром.

Для решения поставленных задач были использованы методы анализа систем электроснабжения, гармонического анализа, основные положения теоретической электротехники, теории нечетких множеств и теории вероятностей и математической статистики. Проведены исследования ЭМС электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере системы электроснабжения мостовых кранов с помощью имитационной модели с использованием современного прикладного программного обеспечения - пакета программ MATLAB/SimPowerSystems.

**Научная новизна** заключается в том, что впервые:

1. Установлены уровни высших гармонических составляющих токов и напряжений, генерируемых в цеховую систему электроснабжения, в зависимости от динамических режимов работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере системы электроснабжения мостовых кранов.

2. Доказана возможность применения нечетких множеств для формирования алгоритма управления АФГ при динамических режимах работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

3. Разработана база правил нечеткого вывода и определены параметры терм на основе экспертных оценок и статического анализа для формирования фаззи-регулятора системы управления АФГ.

4. Разработан алгоритм входных и выходных лингвистических переменных фаззи-регулятора, реализуемого в контроллере системы управления активным фильтром.

**Практическая значимость.** Разработан комплексный подход к обеспечению ЭМС в соответствии требований ГОСТ 32144-2013 для цеховой системы электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками. При работе таких электроприемников большую часть времени рабочего цикла составляют переходные режимы. Обеспечение ЭМС в этом случае достигается за счет применения АФГ с системой управления на базе нечеткого вывода, которая позволяет улучшить качество напряжения и снизить энергозатраты потребления электрической энергии в отраслях промышленности, где применяются различные электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками крановых механизмов.

**Публикации.** По материалам проведенных исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе четыре – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: II Международной научно-практической конференции «Современная наука: теория и практика», г. Ставрополь, 2011 год. Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: взгляд молодых ученых», г. Курск, 14-20 ноября 2012 г.; X Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», Курск, 19-23 марта 2013 г.; III Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития», Курск, 29 июня 2013 г.; XVI Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике", г. Санкт - Петербург, 5-6 декабря 2013 г.; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин, 10 апреля 2014 г.; Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергетика и энергоэффективные технологии», г. Белгород, 2014 год.; II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом», г. Новосибирск, февраль 2015 г.; XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство», г. Старый Оскол, 3-5 декабря 2014 г.; XVIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», г. Томск, 5-7 декабря 2012 г.

**Личный вклад автора.** Постановка и решение задач исследования, разработка имитационной модели узла нагрузки, системы управления АФГ, проведение экспериментов на реальном объекте принадлежат автору. Вклад в опубликованных работах, написанных в соавторстве в изданиях рекомендованных ВАК РФ: в 1 статье – проведено освещение проблемы ЭМС при работе частотно - регулируемых электроприводов механизмов



кранов и предложены различные методы решения этой проблемы; во 2 статье – участие в проведении экспериментов и анализа результатов; в 3 статье – описание проведенных экспериментов для оценки качества электроэнергии, разработка и описание работы имитационной модели; в 4 статье - представлено построение нечеткого регулятора в системе управления активным фильтром для компенсации высших гармоник генерируемых в цеховую систему электроснабжения нелинейными электроприемниками на примере частотных электроприводов мостового крана.

**Достоверность результатов.** Эксперименты на исследуемом объекте проводились с помощью приборов, сертифицированных и поверенных для соответствующих измерений. Достоверность результатов научных исследований подтверждается корректным проведением экспериментов на мостовом однобалочном кране, совместно с инженерно-техническим персоналом энергетической службы предприятия и в соответствии установленной программы для проведения измерений показателей качества электроэнергии. Также стоит отметить, что все теоретические результаты получены на основании теории вероятности и математической статистики, методов построения и расчета схем замещения, теоретической электротехники и теории нечеткого вывода.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 27 таблиц, 66 рисунков и список литературы из 91 наименования. Общий объем работы составляет 142 страницы машинописного текста.

# 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЦЕХОВЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКАМИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

## 1.1. АНАЛИЗ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ИСТОЧНИКА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Объектом исследования является цеховая система электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками. В промышленности широкое применение находят различные краны для перемещения грузов. Статические и динамические нагрузки крановых механизмов определяют выбор систем электроприводов и требования к ним: широкий диапазон изменения моментов сопротивления; необходимость реверсирования; ограничение момента в элементах механизмов; обеспечение работы на пониженной скорости; ограничение ускорений [1].

В качестве примера представлены технические характеристики однобалочного мостового крана грузоподъемностью 15 т (таблица 1.1) [2].

Таблица 1.1. Технические характеристики мостового крана

1. Грузоподъемность, т	15	
2. Пролет крана $L_n$ , м	15	
3. Высота подъема крюка $H$ , м	9	
4. Группа режима работы крана	S3	
5. Скорость, м/с	подъема	0,1
	передвижения тали	0,33
	передвижения крана	0,5
6. Управление краном	с пола	
8. Род тока и напряжение:	переменный - 380 В; 50 Гц	
9. Суммарная мощность электродвигателей, кВт	17	

Технические характеристики электроприводов крановых механизмов представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Технические характеристики электроприводов крановых механизмов

Наименование электроприемника	Тип электропривода/ преобразователя частоты	Номинальная мощность Р. Номинальная полная мощность S	Номинальный ток I, А	Номинальный КПД $\eta$ , %	Номинальный коэффициент мощности, $\cos\varphi$
Электропривод передвижения крана	АМТФ132М6	5 кВт	16	87	0,86
ППЧ с ПЗПТ к электроприводу передвижения крана	VF-S11- 4055PL	5.5 кВА	14.3	-	-
Электропривод передвижения тали	ДМТН112-6	4,5 кВт	12,7	71,5	0,75
ППЧ с ПЗПТ к электроприводу передвижения тали	VF-S11- 4055PL	5.5 кВА	14.3	-	-
Электропривод подъема	4МТКН132LB6	7,5 кВт	19,4	76	0,77
ППЧ с ПЗПТ к электроприводу подъема	VF-S11- 4075PL	7.5 кВА	17.1	-	-

Основной особенностью мостовых кранов, является одновременность работы приводов подъема крана, перемещения крана и перемещения тали [3,4,5]. В связи с этим, тахограмма движения, представляется сложной конфигурацией, в которой преобладают участки неравномерного движения (рис. 1.1). Как следует из тахограммы, период нестационарной работы привода соизмерим с установившимся режимом, и может составлять 60% и более процентов полного цикла работы крана.

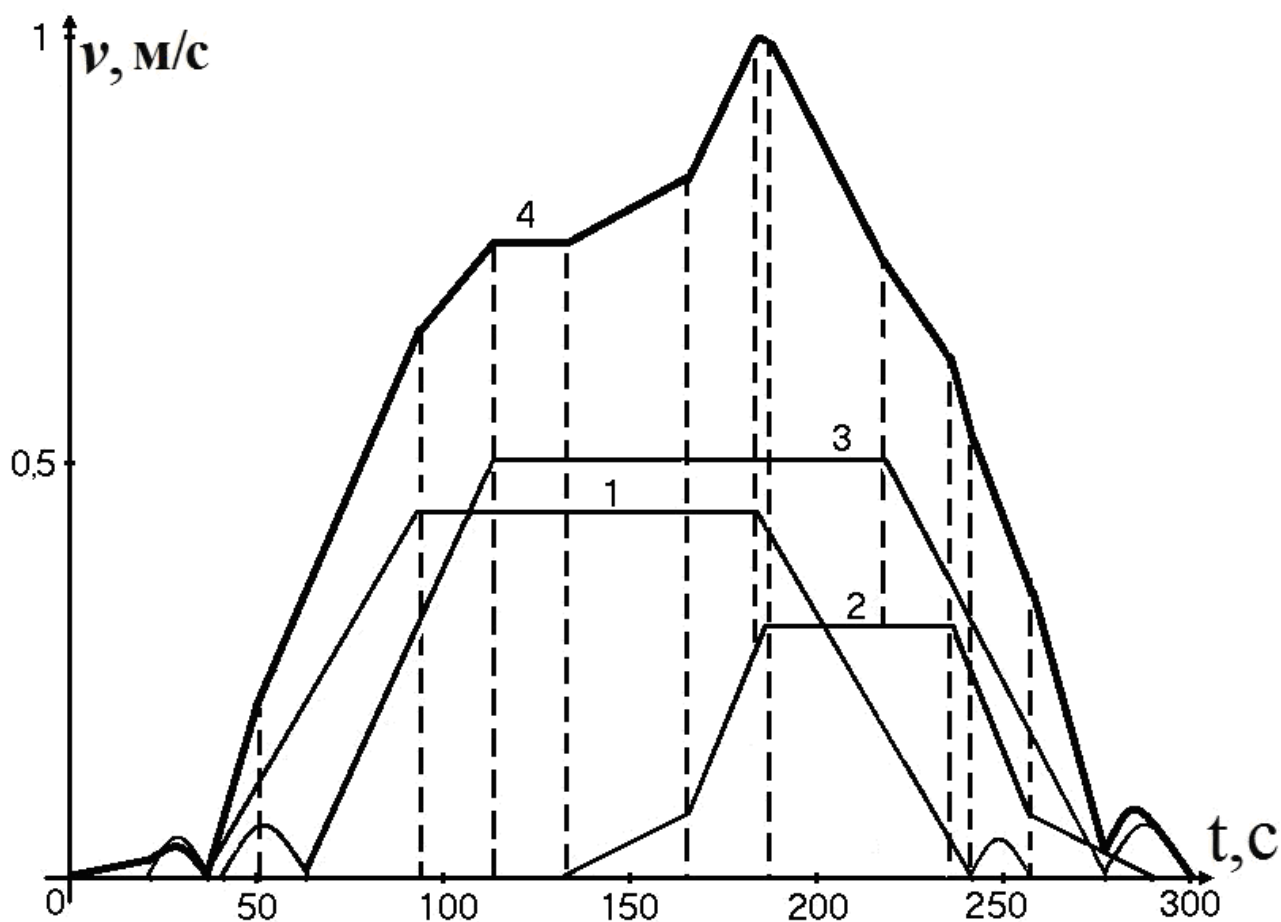


Рис. 1.1. Совмещенная тахограмма изменения скорости для: 1) механизмов подъема, 2) перемещения тали, 3) перемещения крана 4) суммарная диаграмма

Выполнение требуемых тахограмм движения осуществляется за счет применения регулируемого электропривода. На современных кранах используется регулируемый электропривод на базе полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД). Основной проблемой использования ППЧ-АД является обеспечение электромагнитной совместимости электропривода с системой электроснабжения.

Снижение уровня электромагнитной совместимости преобразователя частоты выражается следующим образом [6]:

– снижение качества электрической энергии в системе электроснабжения (генерирование высокочастотных составляющих тока и напряжения в цеховую систему электроснабжения);

- снижение коэффициента мощности сети;
- повышение потерь мощности;
- нагрев электротехнических элементов систем электроснабжения (проводов, трансформаторов, дросселей и др.);
- ухудшение работы систем автоматизации и телемеханики;
- ложное срабатывание систем автоматики и защиты;
- образование электромагнитных полей, которые оказывают негативное влияние на систему автоматического управления самого электропривода;
- провалы напряжения и перенапряжения при пуске и торможении электрических двигателей.

Преобладание нестационарных режимов работы способствует увеличению уровня гармоник генерируемых в цеховую систему электроснабжения электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Все это определяет необходимость оценки уровня электромагнитной совместимости в узле подключения крановых электроприводов к цеховой системе электроснабжения [7].

В связи с вышесказанным, исследования, проводимые для обеспечения электромагнитной совместимости и оценки качества электроэнергии цеховой системы электроснабжения, где применяются электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками (электропривод переменного тока на базе полупроводниковый преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока – асинхронный двигатель с коротко замкнутым двигателем), работающие в динамических режимах, являются актуальными.

## 1.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЦЕХОВЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Уровень электромагнитной совместимости определен в действующем стандарте ГОСТ 32144 – 2013 [8], как уровень кондуктивных электромагнитных помех [9], используемых в качестве опорных для координации между допустимым уровнем помех и уровнем помех, воспринимаемых техническими средствами, подключенными к цеховой электрической системе электроснабжения, без нарушения их нормального функционирования. Таким образом, воздействие ППЧ-АД на цеховую систему электроснабжения и других потребителей, обусловлено влиянием полупроводниковых преобразователей на качество электрической энергии.

Процесс генерирования высших гармоник тока в питающую сеть неуправляемым выпрямителем на входе ППЧ [10] представлен на рис. 1.2:

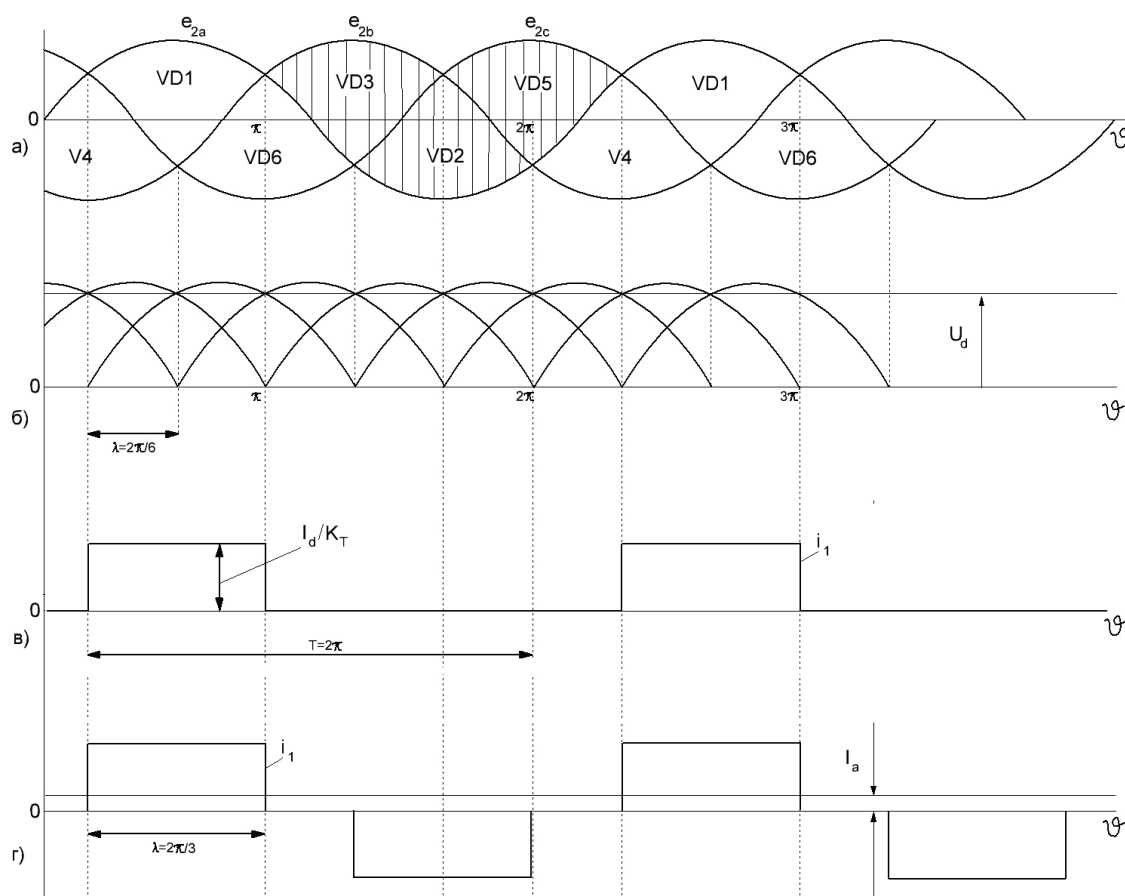


Рис. 1.2. Временная диаграмма работы неуправляемого выпрямителя

а) очередность проводящего состояния вентилях, б) проводимость тока вентилями в каждый момент времени (два вентиля соединяют две различные фазы), в) разностороннее прохождение тока через первичную и вторичную обмотки трансформатора, определяемое двумя вентилями, подключенными к каждой вторичной обмотке трансформатора г) протекание тока через вентиль (время протекания составляет третью часть периода питающего напряжения).

На рис.1.2 диаграммы показаны без учета явления коммутации и при идеальном сглаживании выпрямленного тока.

Для определения нормируемых стандартом показателей качества электроэнергии необходимо произвести разложение кривой первичного тока в ряд Фурье. Следует отметить, что при использовании неуправляемого выпрямителя угол коммутации  $\alpha=0$  ток в первичной обмотке трансформатора носит прямоугольную форму, соответственно коэффициенты разложения кривой первичного тока в ряд Фурье будут иметь вид [11]:

$$a(n) = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{n \cdot \pi \cdot x_k} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{3}\right) \cdot \left[ \begin{aligned} & \left(\frac{1}{n+1}\right) \cdot \sin\left((n+1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sin((n+1) \cdot \psi) - \\ & - \left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sin\left((n-1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sin((n-1) \cdot \psi) \end{aligned} \right]$$

$$b(n) = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_m}{n \cdot \pi \cdot x_k} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{3}\right) \cdot \left[ \begin{aligned} & - \left(\frac{1}{n+1}\right) \cdot \sin\left((n+1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \cos((n+1) \cdot \psi) + \\ & + \left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sin\left((n-1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \cos((n-1) \cdot \psi) \end{aligned} \right]$$

В стандарте ГОСТ 32144 – 2013 определены следующие основные показатели качества электрической энергии (таблица 1.3):

Таблица 1.3. Основные показатели качества электроэнергии

Наименование показателя	Расчетная формула	Примечание
<b>Медленные изменения напряжения</b> (отклонения напряжения от номинальных значений, длящиеся более 1 минуты)	$\delta U_{(-)} = \frac{U_{\hat{m}} - U_{(-)}}{U_{\hat{m}}} 100;$ $\delta U_{(+)} = \frac{U_{(+)} - U_{\hat{m}}}{U_{\hat{m}}} 100;$	$U_{(-)}, U_{(+)}$ - значения напряжения, меньшие и большие номинального; $U_{\hat{m}}$ - номинальное значение напряжения

<p><b>Колебания напряжения питания</b> (одиночное быстрое отклонение амплитуды напряжения от номинального значения, длящееся менее 1 минуты)</p>	$\delta U_t = \frac{U_i - U_{i+1}}{U_{\hat{m}}} 100;$	<p><math>U_i, U_{i+1}</math> - значения следующих один за другим экстремумов огибающей действующие значения основной частоты</p>
<p><b>Несинусоидальность напряжения</b> (отклонения формы напряжения от синусоидальной)</p>	$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{\hat{m}}} 100,$	<p><math>U_{(n)}</math> - амплитудные значения гармонических составляющих напряжения, <math>K_u</math> - суммарный коэффициент</p>
		<p>гармонических составляющих напряжения (не должен превышать 8 % по требованиям [5] для объектов напряжением 0.4 кВ)</p>
<p><b>Провал напряжения (перенапряжения)</b> (временное уменьшение (увеличение) напряжения)</p>	$\Delta t_{\dot{v}} = t_{\dot{v}i} - t_{\dot{v}z};$ $\delta U_{\dot{v}} = \frac{U_{\hat{m}} - U_{\min}}{U_{\hat{m}}} 100;$ $\delta U_{\dot{v}} = \frac{U_{\hat{m}} - U_{\max}}{U_{\hat{m}}} 100;$ $\delta U_{\dot{v}} = \frac{m(\delta U_{\dot{v}} \Delta t_{\dot{v}})}{N_{\dot{v}}} 100;$	<p><math>t_{\dot{v}i}, t_{\dot{v}z}</math> - начальный и конечный моменты времени провала напряжения;  <math>U_{\min}, U_{\max}</math> - минимальное и максимальное значение напряжения; <math>m(\delta U_{\dot{v}} \Delta t_{\dot{v}})</math> - число провалов напряжения глубиной (высотой) <math>\delta U_{\dot{v}}</math> и длительностью <math>\Delta t_{\dot{v}}</math>;  <math>N_{\dot{v}}</math> - суммарное число провалов напряжения</p>
<p><b>Импульсное напряжение или временное перенапряжение</b> (перенапряжение, представляющее одиночный импульс напряжения или колебание напряжения, длительностью в несколько миллисекунд)</p>	$K_{\dot{E}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}U_{\hat{m}}};$	<p><math>K_{\dot{E}}</math> - коэффициент временного перенапряжения</p>



Наиболее подробно рассмотрим влияние гармоник на основные элементы цеховой системы электроснабжения. Основные формы воздействий и их описание представлены в табл. 1.4:

Таблица 1.4. Влияние гармоник на элементы системы электроснабжения

Вид влияния	Описание воздействия
1. Влияние высших гармоник на батареи конденсаторов в [11].	<p>Батареи конденсаторов предназначены для компенсации реактивной мощности нагрузки, то есть для повышения коэффициента мощности электроустановки здания. Однако в условиях несинусоидальности тока батареи конденсаторов</p>
	<p>одновременно являются элементами, абсорбирующими гармоники со всей сети, так как сопротивление конденсатора обратно пропорционально частоте <math>f</math>:</p> $x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2\pi k f_0 \cdot C};$ <p>где <math>f_0</math>-основная частота, Гц; <math>k</math> – порядок гармоники; <math>C</math> – емкость конденсаторов.</p> <p>Батареи конденсаторов изменяют нормальный путь гармоник тока от нелинейного потребителя к источнику питания, замыкая часть этого тока через себя. Так как сопротивления элементов сети имеют индуктивный характер, то при применении установок компенсации реактивной мощности и наличии нелинейных потребителей появляется вероятность проявления резонансных явлений (как по току, так и по напряжению) на отдельных элементах системы электроснабжения.</p>
2. Возникновение дополнительных потерь в трансформаторах [12].	<p>Протекание по обмоткам трансформатора несинусоидальных токов, вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, приводит к увеличению активного сопротивления обмоток трансформатора и, как следствие, к дополнительному нагреву.</p> <p>Отрицательное воздействие гармоник на мощные</p>

	<p>трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединенных в треугольник. Это может привести к их перегрузке. Кроме того, высокочастотные гармоники тока — это причина появления вихревых токов в обмотках трансформатора, что вызывает дополнительные потери мощности и перегрев трансформатора. Причем потери на вихревые токи составляют в общих потерях до 60-70 %.</p>
<p><i>3. Тепловое и электрическое старение изоляции [13].</i></p>	<p>Электрическое старение возникает из частичных разрядов, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка, например частичные разряды в газовых включениях. Частичные разряды связаны с рассеянием энергии, следствием которого является электрическое, механическое и химическое воздействия на окружающий диэлектрик. В результате развиваются местные дефекты в изоляции, что приводит к сокращению срока службы.</p> <p>Старение изоляции проводников и кабелей обусловлено протеканием несинусоидального тока, приводящего к повышенному нагреву наружной поверхности жил кабеля вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости.</p>
<p><i>4. Влияние гармоник в аварийных режимах [14].</i></p>	<p>Существенным оказывается влияние гармоник на работу защиты, строящейся на измерении сопротивления. Дистанционная защита, в которой производится измерение сопротивлений на основной частоте, может давать значительные ошибки в случае наличия в токе короткого замыкания высших гармоник (особенно 3-го порядка). Большое содержание гармоник обычно наблюдается в случаях, когда ток короткого замыкания течет через землю</p>

	(сопротивление земли доминирует в общем сопротивлении контура). Если гармоники не отфильтровываются, вероятность ложной работы весьма высока.
--	---

### 1.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ, СВЯЗАННЫХ С ВОЗНИКНОВЕНИЕМ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Исследования и имеющийся опыт показывают, что частотно-регулируемые асинхронные электроприводы влияние на протекание электромагнитных и электромеханических процессов в электротехническом комплексе НПП в установившихся режимах, при коротких замыканиях, АВР, самозапуске. В то же время процессы коммутации в преобразователях частоты, сопровождающиеся скачкообразным изменением параметров цепей, вносят искажения в формы напряжения и тока, как в сети электроснабжения, так и в самих асинхронных двигателях.

Искажения сопровождаются генерированием высших гармоник, перенапряжениями на статоре двигателя, прикладываемых к междуфазной и витковой изоляции обмотки, а также относительно земли.

Это определяет необходимость обеспечения условий для электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразователей частоты, как с системой электроснабжения, так и с приводными асинхронными двигателями.

Основными средствами решения проблемы ЭМС представлены в виде блок схеме (рис. 1.3).

Различные методы обеспечения ЭМС используются, для ослабления влияния, вызываемого высшими гармониками тока и напряжения на электроприемники, подключенные к одной цеховой системе электроснабжения.

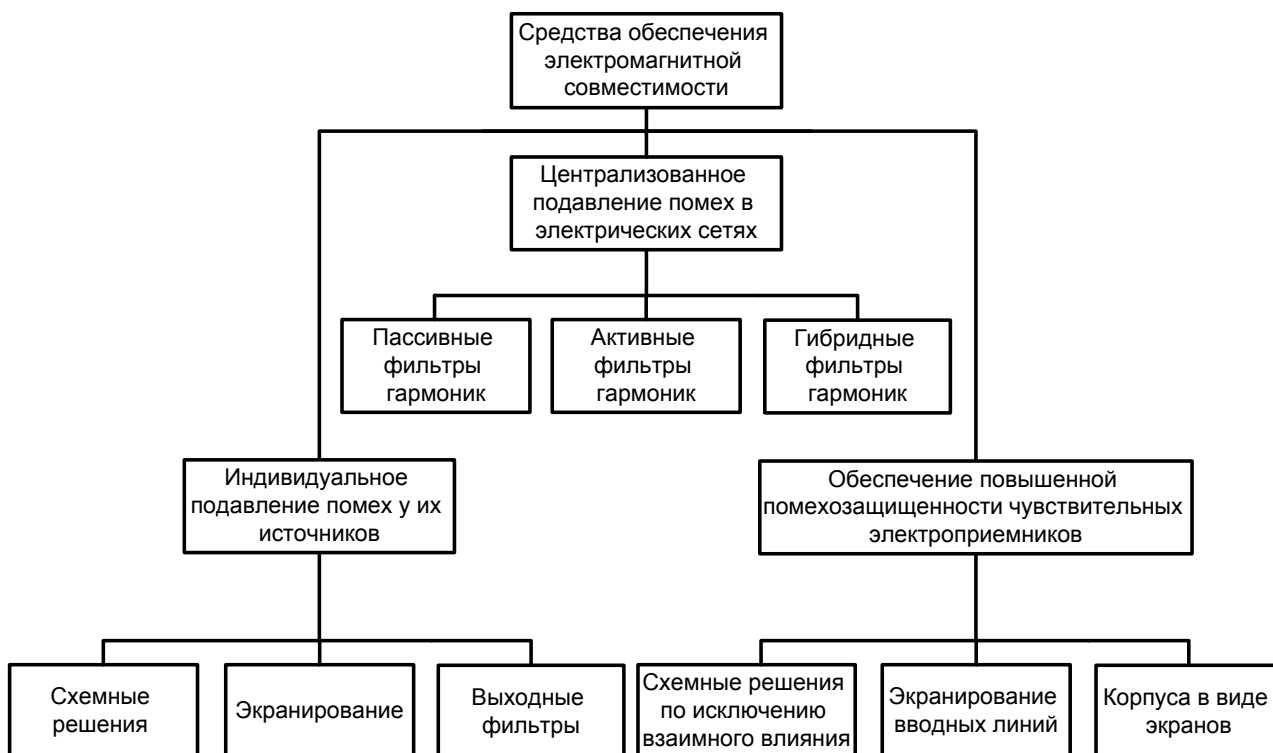


Рис.1.3. Блок схема средств обеспечения ЭМС

К основным методам обеспечения электромагнитной совместимости можно отнести:

**1) Обеспечение симметричного режима работы трехфазной системы [15].**

Для того, чтобы добиться сбалансированности нагрузок по фазам и при этом обеспечить минимальный ток в проводнике нейтрали и минимальное содержание гармоник в выходном напряжении необходимы соответствующие схемы контроля и управления будут поддерживать номинальное действующее значение выходного напряжения, в то же самое время, стремясь обеспечить его синусоидальную форму. В общем случае несбалансированная нагрузка воздействует на напряжение, вызывая его искажение. Стоит отметить, что преобладают искажения напряжения, которые сгенерированы в распределительной сети.

**2) Применение двенадцатипульсного выпрямителя [16].**

Для снижения величины коэффициента гармонических составляющих тока до уровня менее 10% используют 12-полупериодные (12-ти пульсные)

выпрямители. Они состояются из двух шестифазных выпрямителей ( $m=6$ ), собранных по трехфазной мостовой схеме, по выходу включены последовательно и работают на общую нагрузку. Для повышения частоты пульсации выходного напряжения в 2 раза ( $m_{\text{экв}}=12$ ) выпрямительные блоки должны работать с фазовым сдвигом  $\psi=2\pi/12$ . необходимый фазовый сдвиг получается при использовании трансформатора с двумя группами вторичных обмоток, каждая из которых питает исходную схему с шестикратной пульсацией (рис. 1.4):

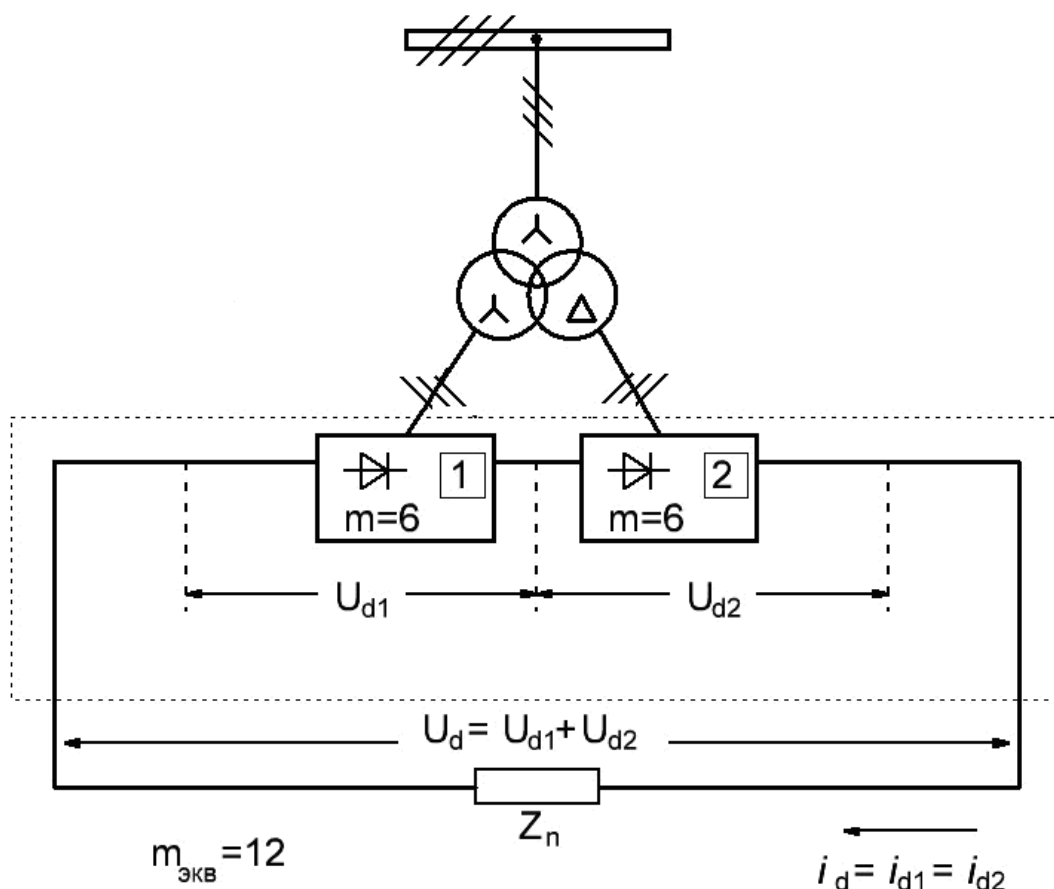


Рис. 1.4. Двенадцатипульсный выпрямитель

### 3) Включение в систему разделительного трансформатора с обмотками "треугольник-звезда" [17].

Сбалансированные гармоники, кратные третьей, наводят соответствующие магнитные потоки в стержнях сердечника трансформатора и, если они равны по величине и совпадают по фазе, то напряжения, наведенные в первичной обмотке, будут скомпенсированы. Схема

разделительного трансформатора с обмотками "треугольник-звезда" приведена на рис. 1.5.

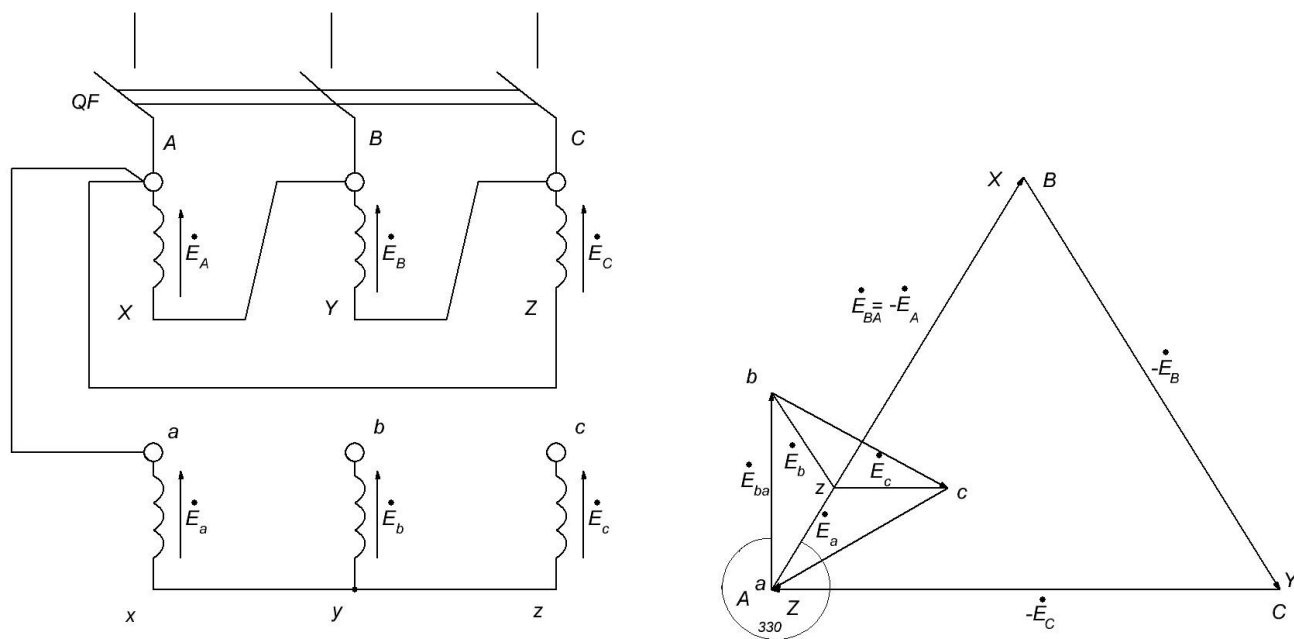


Рис. 1.5. Схема разделительного трансформатора с обмотками "треугольник-звезда"

Кроме этого любой трансформатор имеет индуктивность рассеяния, которая добавляется к существующему полному входному сопротивлению распределительной сети. В связи с этим происходит эффект уменьшения коэффициента амплитуды тока нагрузки и суммарного значения коэффициента гармонических составляющих тока.

Однако в таком режиме работы искажение напряжения увеличивается, а достигаемое максимальное значение напряжения постоянного тока для питания инвертора преобразователя снижается.

#### 4) Использование фильтров компенсации высших гармоник.

Особое значение имеют фильтры, устанавливаемые на входе преобразователя. Шестипульсные выпрямители, применяемые в трехфазных преобразователях, создают высокий уровень пятой гармоники тока в питающей сети. Для снижения гармонического состава потребляемого тока и повышения коэффициента мощности системы в фазные провода включают индуктивные сопротивления (дроссели). Повышением эффективности

подавления высших гармоник тока является включение входного фильтра, настроенного на пятую гармонику.

Увеличение общего действующего значения тока при наличие высших гармонических составляющих в системе приводит к перегреву всего оборудования распределенной сети электропитания, снижению коэффициента мощности, снижению электрического и механического КПД нагрузок, ухудшению характеристик защитных автоматов и завышению требуемой мощности автономных электроэнергетических установок [18].

Одним из наиболее эффективных примеров такого оборудования являются фильтрокомпенсирующие устройства.

В свою очередь по наличию активных элементов различают пассивные, активные и гибридные фильтры.

В качестве пассивных фильтров широко применяются LC-фильтры, т. е. цепи, содержащие реактивности разных знаков. Благодаря резонансным явлениям в таких цепях выделяются колебания, находящиеся в полосе пропускания. Однако для формирования необходимых частотных характеристик эти фильтры должны содержать и резисторы. Обычно при подобном построении фильтра отказываются от применения индуктивности, которая является более габаритным и дорогим и менее стабильным элементом по сравнению с емкостью. Таким образом, получаются RC-фильтры. Стоит отметить, что пассивные фильтры гармоник эффективны, для компенсации гармонических искажений, создаваемых нелинейными электроприемниками, с практически неизменным режимом работы. Пассивные фильтры обладают рядом недостатков: возможность перекомпенсации при мощности потребителя ниже установленной и недокомпенсации при увеличении потребляемой мощности выше номинального значения, т.е. применение пассивных фильтров ограничено и эффективно при стационарной нагрузке. Также к недостаткам можно отнести большую потребляемую мощность и высокие массогабаритные показатели..

К гибридным фильтрам можно отнести СТАТКОМ [19], который представляет собой электронный генератор электродвижущей силы промышленной частоты, регулируемой по амплитуде и обеспечивающей как выдачу, так и потребление реактивной мощности. Устройство выполнено на принципе преобразования напряжения, при использовании высокочастотного широтно-импульсного управления. Схема СТАТКОМ представлена на рис.1.6.

Возможность использования СТАТКОМ для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения в сети переменного тока связана с его способностью к работе в качестве электронного генератора напряжения заданной фазы и амплитуды.

Поскольку СТАТКОМ контролирует токи на реактивном сопротивлении фазного реактора (или фазного реактора и трансформатора), то задача компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения в сети с помощью СТАТКОМ сводится к созданию в фазах реактора и в фазах сетевого трансформатора такого тока, который бы содержал компенсационные составляющие высших гармоник. Амплитуды, фазы и последовательности этих гармоник определяются амплитудами, фазами и последовательностью постороннего источника гармоник сетевого тока или напряжения, подлежащих компенсации.

Активные фильтры гармоник в отличие от пассивных фильтров содержат элементы управления, позволяющие изменять частотные характеристики фильтра. Однако элементная база до недавнего времени не позволяла создавать активные фильтры для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения. Развитие силовой электроники: GTO-тиристоров, IGBT-транзисторов, определило элементную базу, являющуюся основой для построения активных фильтров гармоник..

Активные фильтры гармоник (АФГ) предназначены для обеспечения синусоидальной формы тока, потребляемого от первичного источника при нелинейной нагрузке [17]. АФГ анализирует гармонический состав тока на



входе преобразователя и генерирует в точке его подключения высшие гармоники тока в противофазе с высшими гармониками входного тока преобразователя. В результате высшие гармоники компенсируются (нейтрализуются) и ток в общей цепи (потребляемый от источника) сохраняет синусоидальную форму.

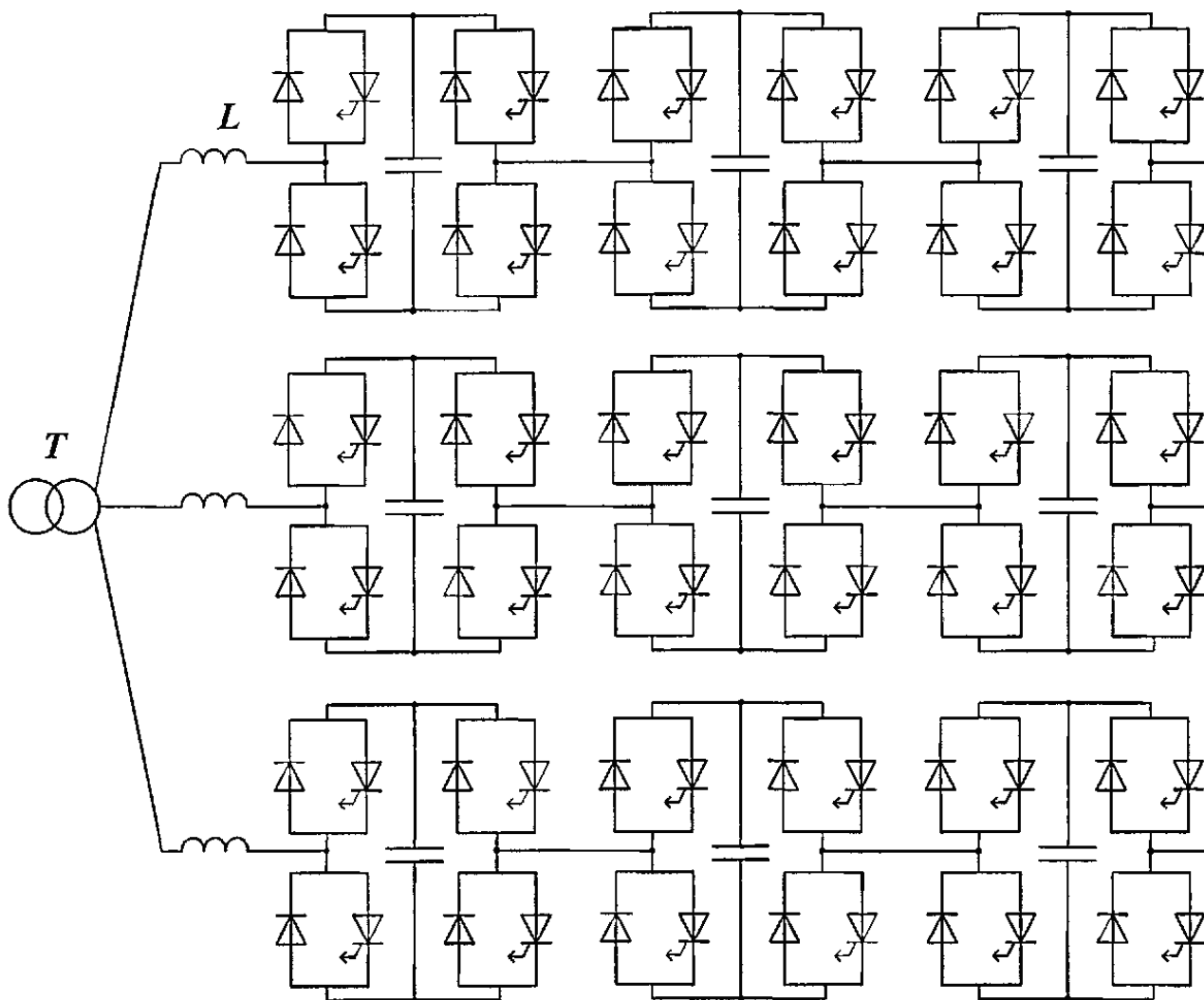


Рис. 1.6. Принципиальная схема СТАТКОМ

Принцип работы активного фильтра заключается в том, что система управления анализирует гармонический состав потребляемого тока, выделяет основную гармонику и ток искажения. Затем активный фильтр инжектирует в сеть ток, находящийся в противофазе с током искажения.

Широкие возможности функциональных свойств активного фильтра позволяет применять его не только для снижения уровня гармоник, но и для компенсации реактивной мощности.

Таким образом, в результате анализа работ, посвященных электромагнитной совместимости в цеховых системах электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками, целесообразным перспективным техническим средством является активный фильтр гармоник.

### **Выводы:**

1. Проанализированы особенности работы электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой, на примере электроприводов крановых механизмов, как источников генерирования в цеховую систему электроснабжения высших гармоник тока и напряжения.

2. Выявлено, что уровень высших гармоник тока и напряжения зависит от работы крановых механизмов в динамических режимах, которые могут составлять до 60% за один цикл технологических операций крана.

3. Оценены возможные влияния высших гармоник тока и напряжения на элементы цеховой системы электроснабжения и представлены основные показатели качества электроэнергии, характеризующие электромагнитную совместимость электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками и питающей цеховой системой электроснабжения.

4. Рассмотрены основные технические решения, позволяющие компенсировать действия высших гармонических составляющих в цеховых системах электроснабжения и показана перспективность применения активных параллельных фильтров высших гармоник тока и напряжения.

## 2. ОЦЕНКА ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕХОВЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ЧАСТОТНЫМ КРАНОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

### 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЦЕХОВЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Учитывая необходимость оценки уровня электромагнитной совместимости в узле подключения кранового электропривода к сети электроснабжения различными методами [18,19], необходимо провести реальную оценку электромагнитной обстановки, на секции шин, к которой подключен мостовой кран. С этой целью были проведены эксперименты для оценки ЭМС на реально действующем крановом оборудовании [20].

Целью проведенных измерений было: определение уровня гармоник напряжения и тока в узле нагрузки при различных режимах работы крановых двигателей; снятие осциллограмм кривых тока и напряжения; оценка основных показателей электромагнитной совместимости; определение значений активной и реактивной мощностей экспериментальным путем для их дальнейшего сопоставления с полученными результатами имитационного моделирования и аналитических расчетов.

Измерения показателей качества электроэнергии, активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического состава тока и напряжения на входе преобразователей частоты проводились при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1» в соответствии с методикой, указанной в инструкции по эксплуатации прибора [21] и регистрировали параметры нормируемые ГОСТ 32144-2013 [5]. Время непрерывного измерения параметров для ППЧ, подключенных к двигателям передвижения и подъема крана составляла 24 часа для каждого. Измерения были проведены при различных повторно-кратковременных режимах работы крановых электроприводов.

Показатели электромагнитной совместимости в сети 0.4 кВ определяются на низкой стороне согласующего трансформатора ТМПН 100 0.4/0.4 (рис.2.1)

В таблице 2.1 приведен перечень приборов, использованных при выполнении измерений.

Таблица 2.1. Перечень измерительных приборов

Наименование измеряемого параметра	Погрешность измерения	Предел измерения
<b>Энергомонитор 3.3Т</b>		
Ток, А	$\pm (1 + 0,05 \cdot (\frac{100}{I} - 1)), \% *$	150
Напряжение, В	$\pm (0,1 + 0,01 \cdot (\frac{415}{U} - 1)), \% *$	622,5
Фазовый угол, градус	$\pm 0,5$	360
Активная мощность, Вт	$\pm (2 + 0,1 \cdot (\frac{2075}{P} - 1)), \% *$	3735
Реактивная мощность, вар	$\pm 4 \%$	3735
Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40 ( $K_{U(n)}$ ), %	$\pm 5 \%$	49,9
Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40 ( $K_{I(n)}$ ), %	$\pm 10 \%$	49,9
<b>Мультиметр цифровой MS8217</b>		
Напряжение, В	$\pm 0.5, \%$	1000 В

**Примечание к таблице 2.1.** В формулы, отмеченные знаком \*, подставляются измеренные значения, токов, напряжений и мощности.

Описание подготовительных работ, порядка проведения эксперимента, а также программа эксперимента приведены в приложении 1.

На рис. 2.1 представлена схема электроснабжения мостового крана с подключенным прибором Энергомонитор – 3.3Т1. Символом «1,2,3» показаны точки измерения. Схема подключения прибора Энергомонитор 3.3Т к трехфазной

четырёхпроводной системе электроснабжения через блок трансформаторов тока показана на рис. 2.2..

При трехфазной четырехпроводной системе подключения прибора, происходит регистрация следующих основных параметров [21]:

- напряжения первой гармоники прямой  $U_y$ , обратной  $U_{2(1)}$  и нулевой  $U_{0(1)}$  последовательностей;

- установившееся отклонение напряжения прямой последовательности  $\delta U_y$  установившееся отклонение фазных напряжений  $\delta U_{YA}, \delta U_{YB}, \delta U_{YC}$ ;

- коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности  $K_{0U}$ ;

- коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности  $K_{2U}$ ;

- отклонение частоты  $\Delta f$ ;

- действующие значения первых гармоник фазных и межфазных напряжений;

- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения по каждой фазе  $K_{UA}, K_{UB}, K_{UC}$ ;

- коэффициенты гармонических составляющих напряжения по каждой фазе  $K_{UA(n)}, K_{UB(n)}, K_{UC(n)}$  для  $n$  от 2 до 40;

- ток первой гармоники прямой последовательности  $I_{1(1)}$ ;

- ток первой гармоники обратной последовательности  $I_{2(1)}$ ;

- действующие значения первых гармоник фазных токов;

- активная мощность прямой  $P_1$ , обратной  $P_2$  и нулевой  $P_0$  последовательности;

- фазные углы между первыми гармониками напряжения и тока прямой  $\varphi_{1UI}$ , обратной  $\varphi_{2UI}$  и нулевой  $\varphi_{0UI}$  последовательности;

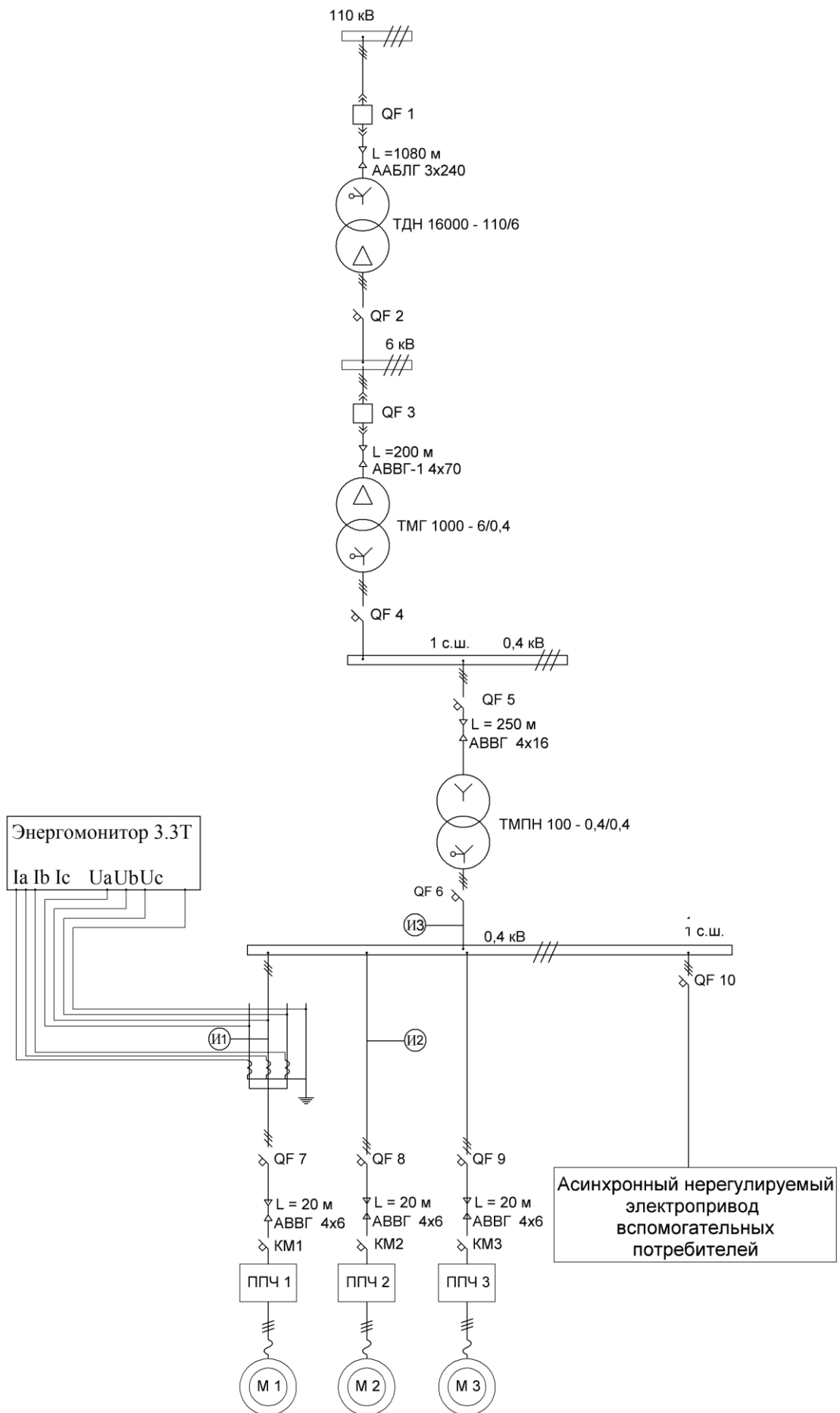


Рис. 2.1. Система электроснабжения электроприемников мостового крана

- суммарный коэффициент гармонических составляющих тока по каждой фазе  $K_{IA}, K_{IB}, K_{IC}$  ;
- коэффициенты гармонических составляющих тока по каждой фазе  $K_{IA(n)}, K_{IB(n)}, K_{IC(n)}$  для n от 2 до 40;
- кратковременная доза фликера  $P_{st}$  по каждой фазе.

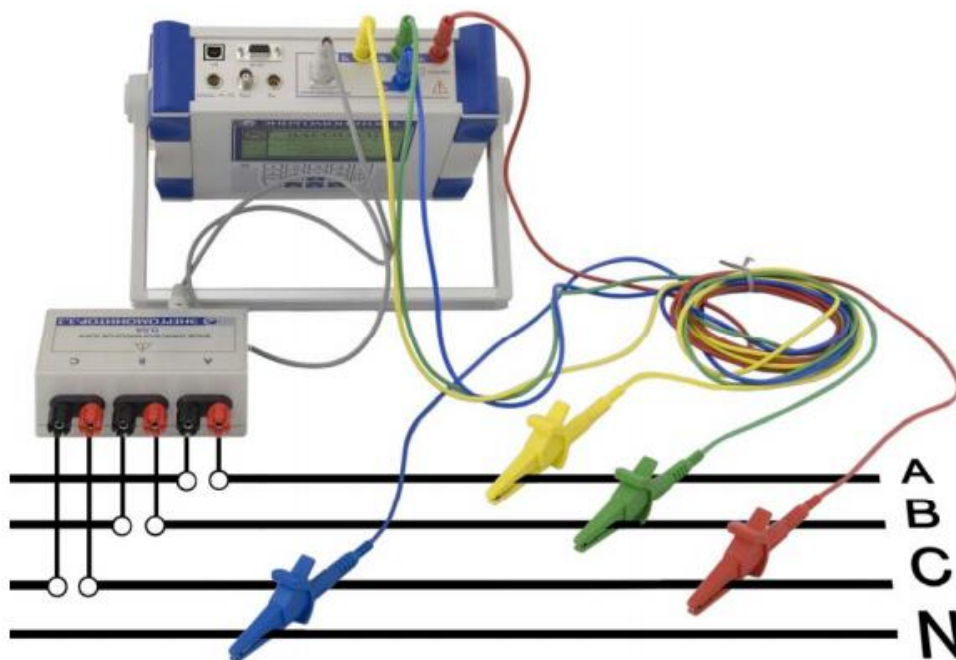


Рис. 2.2. Схема подключения прибора Энергомонитор 3.3Т к трехфазной четырехпроводной сети

На рис. 2.2 представлен внешний вид экрана прибора Энергомонитор – 3.3 Т1 в процессе регистрации ПКЭ.

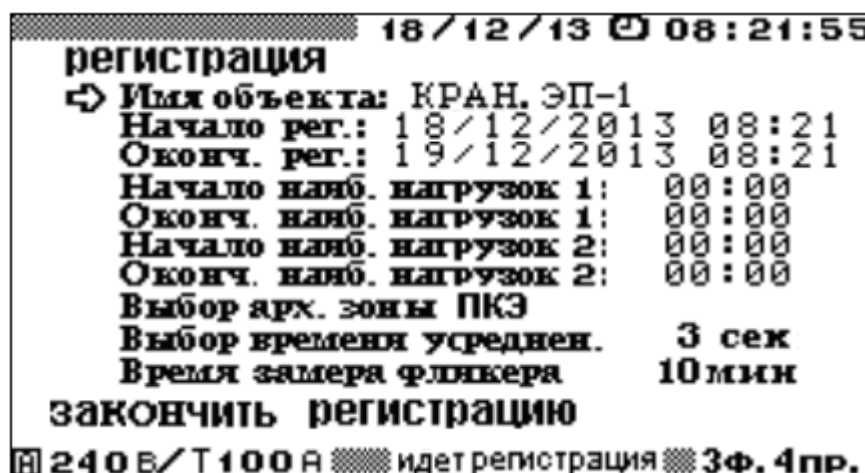


Рис. 2.2. Экран прибора «Энергомонитор 3.3 Т1» во время регистрации измерений

В таблицах 2.2 - 2.5 приведены результаты десяти измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VF-S11- 4075PL. Остальные результаты приведены в протоколах измерений, утвержденными главными специалистами предприятия (приложение 2).

Таблица 2.2. Амплитуда первой гармоники тока фазы А и коэффициенты n-ых гармонических составляющих,  $n = 2 \div 10$ .

№	$I_{A(1)}$ , А	$K_{IA(2)}$ , %	$K_{IA(3)}$ , %	$K_{IA(4)}$ , %	$K_{IA(5)}$ , %	$K_{IA(6)}$ , %	$K_{IA(7)}$ , %	$K_{IA(8)}$ , %	$K_{IA(9)}$ , %	$K_{IA(10)}$ , %
1	0,58	0,38	1,53	0,38	64,61	0,32	55,78	0,5	1,22	0,33
2	0,91	0,23	2,03	0,55	74,81	0,28	62,36	0	0,83	0,06
3	1,65	0,91	1,16	0,18	66,8	0,37	46,36	0,42	1,2	0,35
4	2,95	0,58	0,23	0,16	52	0,16	26,61	0,26	1,06	0,08
5	4,38	0,66	0,19	0,52	42,49	0,31	17,73	0,14	0,95	0,25
6	7,09	0,32	2,45	0,08	33,61	0,25	12,17	0,4	0,5	0,23
7	10,71	0,26	0,67	0,17	29	0,17	10,05	0,37	0,38	0,22
8	15,64	0,3	0,31	0,33	26,67	0,38	9,36	0,07	0,5	0,12
9	19,82	0,7	0,37	0,28	25,42	0,28	9,38	0,1	0,28	0,21
10	22,59	1,92	0,75	1,98	25,07	0,6	8,43	0,6	0,23	0,31

Таблица 2.3. Коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А,  $n = 11 \div 20$ .

№	$K_I$ $A(11)$ , %	$K_I$ $A(12)$ , %	$K_I$ $A(13)$ , %	$K_I$ $A(14)$ , %	$K_I$ $A(15)$ , %	$K_I$ $A(16)$ , %	$K_I$ $A(17)$ , %	$K_I$ $A(18)$ , %	$K_I$ $A(19)$ , %	$K_I$ $A(20)$ , %
1	43,45	0,99	39,77	0,84	0,99	0,81	18,54	1,05	15,24	0,73
2	48	0	39,31	0,11	1,23	0,19	21,57	0,25	18,19	0,54
3	30,06	0,36	25,85	0,42	1,09	0,21	14,2	0,3	13,8	0,42
4	22,44	0,27	17,22	0,14	0,61	0,14	10,31	0,2	13,68	0,03
5	18,93	0,24	10,93	0,19	0,69	0,15	10,35	0,15	10,57	0,21
6	13,64	0,31	6,34	0,12	0,62	0,12	7,95	0,07	7,08	0,17
7	11,39	0,14	5,27	0,25	0,23	0,1	6,34	0,12	5,76	0,19
8	9,82	0,07	5,21	0,14	0,25	0,12	5,3	0,13	5,17	0,13
9	9,2	0,23	5,41	0,09	0,21	0,14	4,94	0,13	5,01	0,16
10	9,01	0,2	4,97	0,24	0,17	0,24	4,69	0,16	4,85	0,22



Таблица 2.4. Коэффициенты несинусоидальности напряжения и тока в фазе А и значения фазных напряжений.

№	$K_{U_A}, \%$	$K_{U_B}, \%$	$K_{U_C}, \%$	$K_{I_A}, \%$	$K_{I_B}, \%$	$K_{I_C}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	8,43	8,26	8,9	50	48,29	49,03	224,94	226,99	225,23
2	8,14	7,6	9,88	50	50	50	224,95	226,97	225,24
3	10,26	9	11,2	50	50	50	224,96	227	225,25
4	10,93	9,74	8,68	50	50	50	224,87	226,89	225,17
5	10,99	10,19	10,55	50	50	50	224,98	226,97	225,23
6	11,39	10,46	9,91	42,93	43,13	43,4	224,73	226,72	224,97
7	11,65	10,61	8,26	36,09	36,41	35,31	224,43	226,41	224,66
8	11,21	10,72	11	32,59	32,89	32,71	223,95	226	224,29
9	10,44	10,55	10,46	31,19	31,52	31,29	223,52	225,58	223,88
10	9,49	10,28	8,49	30,59	30,75	30,95	223,32	225,36	223,67

Таблица 2.5. Линейные напряжения, активная и реактивная мощность.

№	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, \text{вар}$	$Q_B, \text{вар}$	$Q_C, \text{вар}$
1	390,56	391,09	391,2	46,06	50,465	52,485	-217,6	-231,79	-227,55
2	390,55	391,08	391,23	88,835	92,085	94,525	-307,18	-319,49	-313,85
3	390,59	391,1	391,25	178,075	182,535	183,775	-412,99	-427,71	-418,55
4	390,39	390,93	391,11	331,115	337,785	336,39	-546,62	-563,23	-550,24
5	390,58	391,05	391,27	499,58	509,21	504,05	-652,53	-668,78	-651,81
6	390,15	390,6	390,82	805,835	824,395	809,8	-793,33	-806,85	-785,53
7	389,63	390,05	390,31	1234,19	1253,91	1242,115	-992,72	-1013,28	-977,89
8	388,83	389,44	389,52	1794,62	1819,71	1804,035	-1265,5	-1304,32	-1277,21
9	388,09	388,72	388,8	2254,9	2281,07	2262,375	-1101,22	-133,17	63,4
10	387,72	388,33	388,47	2530,525	2542,22	2505,55	198,95	1662,81	1641,34

В таблицах 2.2 – 2.5 приведены значения следующих величин:

- $I_{A(1)}$ , А – амплитудное значение первой гармоники фазы А, А;
- $K_{I_{A(n)}}$ , % - коэффициент n-ой гармонической составляющей,  $n = 2 \div 20$ , %;
- $K_U$ , % - коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- $K_I$ , % - коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения, В;
- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , - линейные напряжения, В;
- $P_A, P_B, P_C$ , - активная мощность для каждой фазы, Вт;
- $Q_A, Q_B, Q_C$ , - реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

На основании полученных результатов эксперимента, построены спектры высших гармонических составляющих тока, измеренные в точках И1 и И2 (рис. 2.2 а, б).

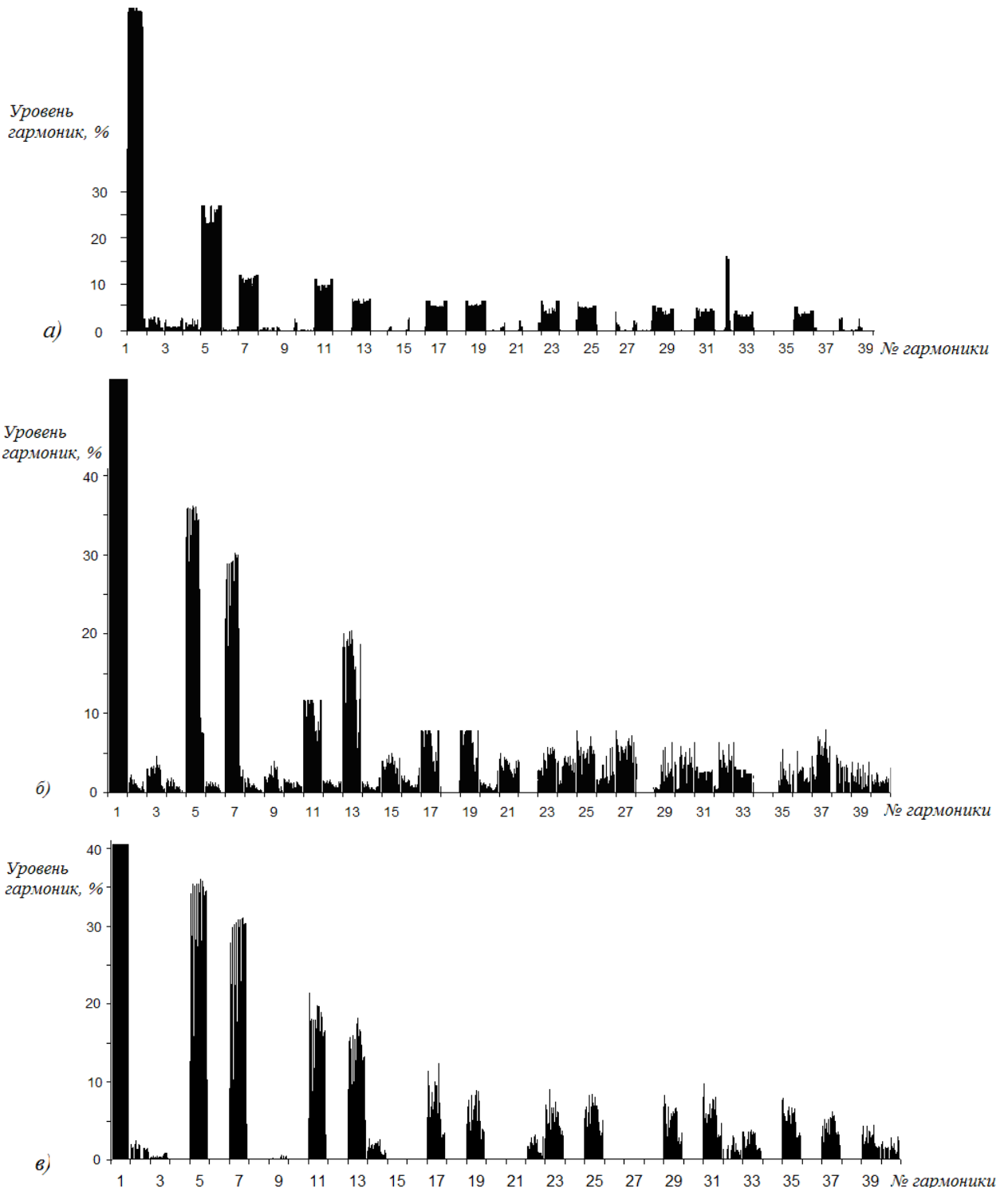
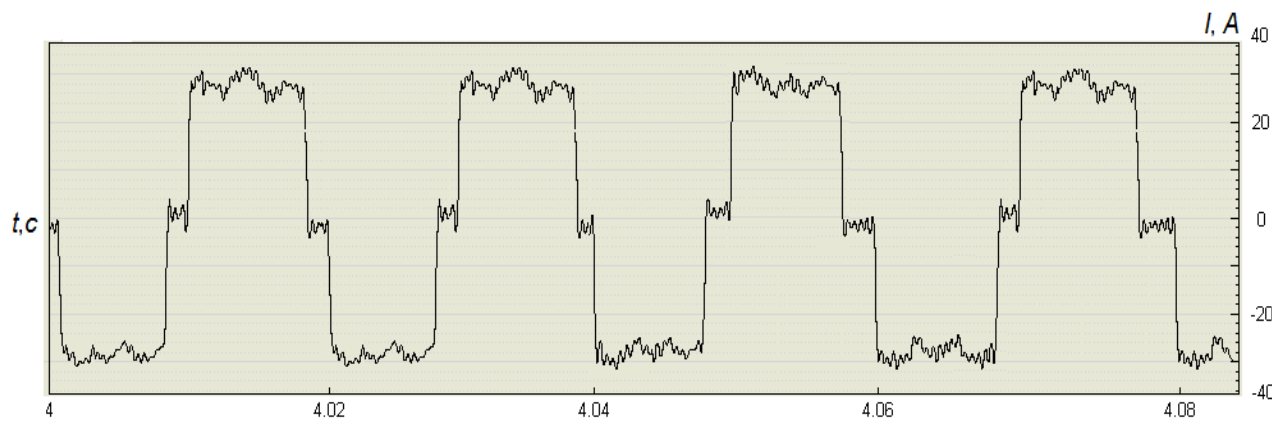


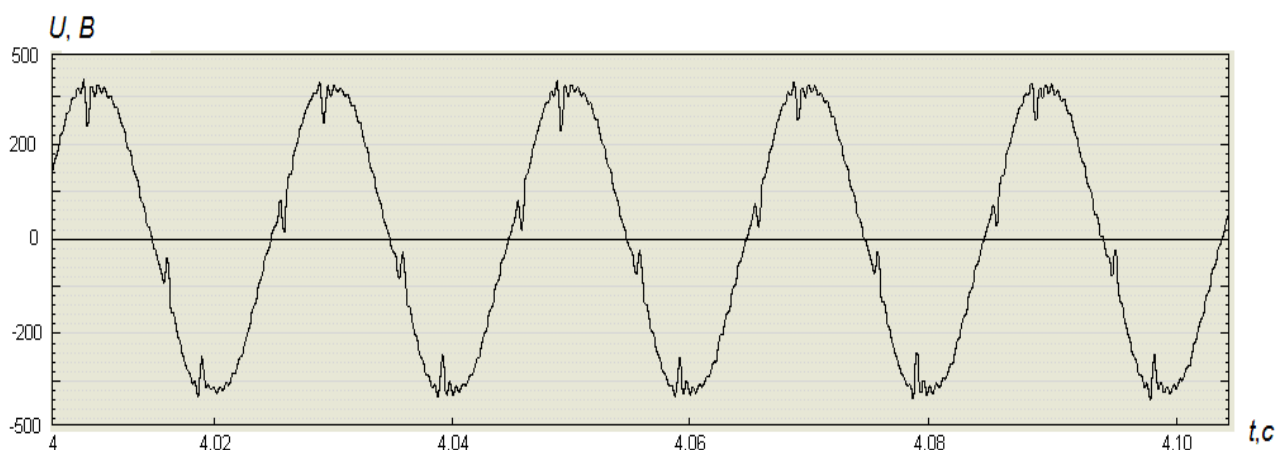
Рис.2.2. Спектр высших гармонических составляющих тока в точках измерения И1 – а , И2 – б, И3 – в.

Как следует из рис. 2.2 (а, б) в гармоническом составе тока имеют преобладание 5, 7, 11 гармоники. Токи искажения, вызванные этими гармониками, составляют до 60% от уровня основной гармоники.

Осциллограммы фазного тока и напряжения приведены на рис 2.3 а, б соответственно:



а)



б)

Рис. 2.3. Измеренные осциллограмма и фазного тока и напряжения в точке измерения И1

Результаты экспериментов показали, что в некоторые периоды времени в цикле работы крановых механизмов максимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения составило ~ 12 %, а значение суммарного коэффициента гармонических составляющих тока ~35%.

## 2.2. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЦЕХОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ПАКЕТЕ MATLAB

Определить показатели качества электроэнергии, характеризующие электромагнитную совместимость (ЭМС), аналитическим путем весьма сложная задача. Существующие методы расчетов направлены на определение суммарного коэффициента гармонических составляющих могут быть разделены на два класса [22]:

- основанные на расчете суммарного коэффициента гармонических составляющих по результатам предварительного определения значений гармонических составляющих на базе экспериментальных осциллограмм напряжения и тока;
- непосредственное определение суммарного коэффициента гармонических составляющих без предварительного гармонического анализа. К этому классу относятся графический и вероятностный методы анализа.

Однако перечисленные методы анализа применимы для статического (установившегося) режима работы электроприводов. В случае переходных процессов произвести расчет перечисленными методами не представляется возможным. Даже в статических режимах анализ суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений или токов перечисленными методами дает погрешность, достигающую 20% и более процентов [22]. Кроме того, при составлении схем замещения электрической сети приходится использовать ряд допущений для определения электрических параметров. В противном случае расчетные соотношения настолько усложняются, что теряется физический смысл задачи и вычислительная погрешность может превысить погрешность от принятых первоначальных упрощений и допущений. Основной проблемой при определении параметров электрической сети является построение адекватной расчетной модели. С одной стороны, традиционные методы построения моделей позволяют оценить параметры электрической сети. С другой стороны, стремление

получить всю исчерпывающую информацию для построения точной математической модели сложной реальной ситуации может привести к потере времени и средств, поскольку это в большинстве случаев в принципе невозможно.

Поэтому, для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения, была построена виртуальная модель реальной системы электропривода мостового однобалочного электрического крана, грузоподъемностью 15 тонн, построенного на базе полупроводниковый преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД) в пакете Matlab 7.2 [23,24,25]. Блок Powergui, позволяет исследовать спектральный состав напряжений и токов нагрузки в различных точках схемы электроснабжения.

Преимуществом программного комплекса MATLAB по сравнению с другими специализированными пакетами для моделирования электрических схем является большой выбор алгоритмов, как с переменным, так и с фиксированным шагом расчета. Это позволяет сократить время расчёта при сохранении высокой точности, за счёт подбора более подходящего алгоритма. Также, имеется возможность сохранения и последующей обработки результатов моделирования в Simulink с помощью командных средств MATLAB.

На рис. 2.4 представлена имитационная модель цеховой системы электроснабжения с электроприводами мостового однобалочного электрического крана, грузоподъемностью 15 тонн.

Имитационная модель включает:

- трехфазный источник синусоидального напряжения (Three-Phase Source);
- трехфазные выключатели переменного тока (Three-Phase Breaker), управляемые генераторами ступенчатого сигнала (Step);
- понижающие трехфазные двухобмоточные трансформаторы (Three-phase Reduce transformer (Two Windings));

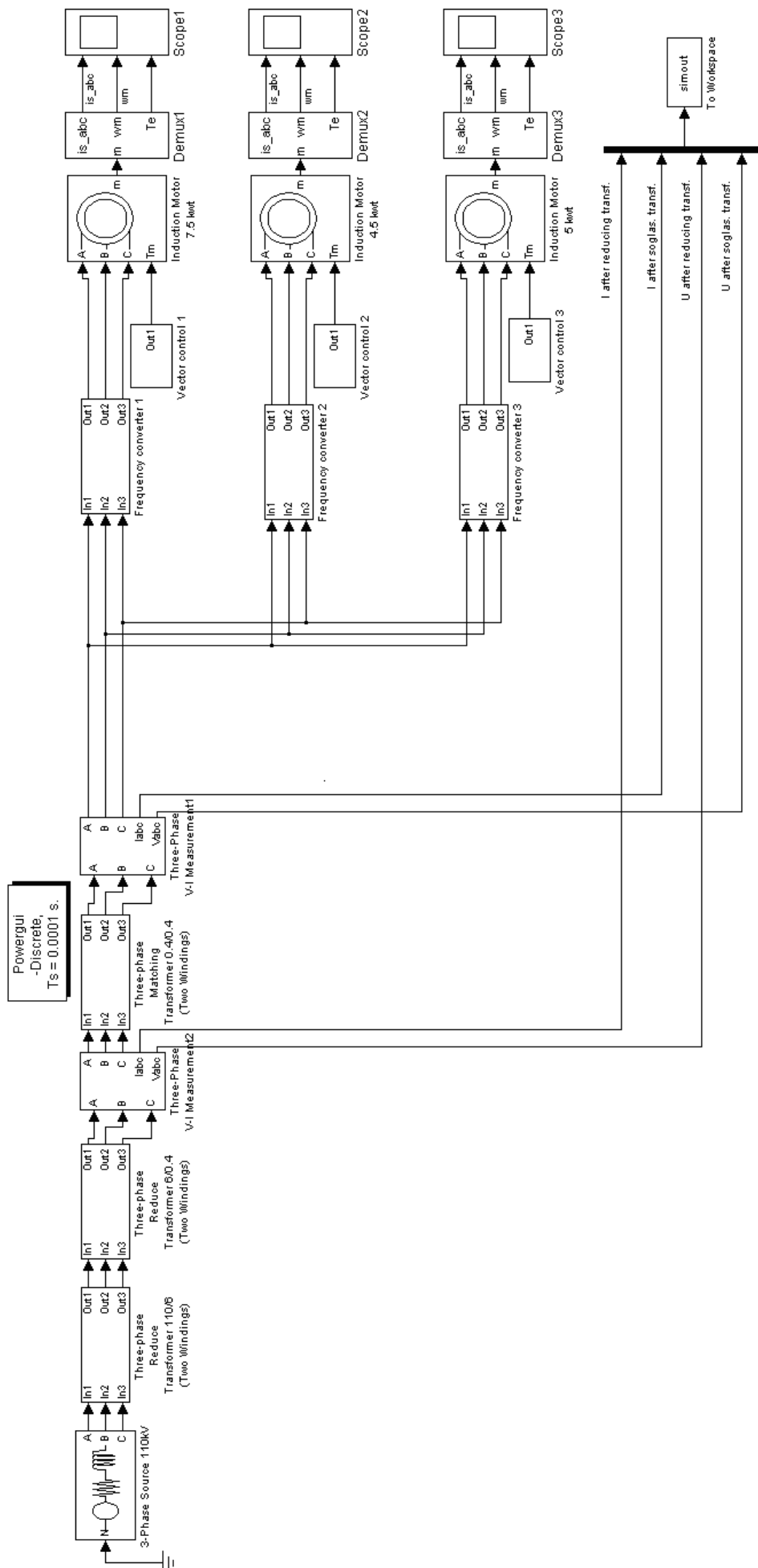


Рис. 2.4. имитационная модель цеховой системы электроснабжения с электроприводами мостового однобалочного электрического крана

- согласующий трехфазный двухобмоточный трансформатор (Three-phase Matching transformer (Two Windings)).

В состав блока Frequency converter (преобразователь частоты) входят следующие элементы:

- неуправляемые выпрямители (Universal Bridge );
- шестипульсные инверторы (Rectifier), управляемые генератором пилообразных импульсов (PWM Generator);
- промежуточные звенья постоянного тока (LC-фильтр)(Intermediate link DC)
- асинхронный двигатели (Induction motor) с векторной системой регулирования скорости;
- анализатор гармоник (Workspace).

Для измерения динамических процессов в электроприводе используется измерительный блок Machines Measurement Demux, подающий сигнал на осциллоскоп (Scope).

Для измерения напряжения используются вольтметры (Voltage Measurement), а соответствующие осциллоскопы (Scope) позволяют производить наблюдение за изменением напряжения.

Для измерения тока используются амперметры (Current Measurement), а соответствующие им осциллоскопы (Scope) позволяют производить наблюдение за изменением тока.

Измерение мощности производится с помощью трехфазного измерителя токов и напряжений (Three-Phase V-I Measurement) и трехфазного измерителя активной и реактивной мощности (3-phase Instantaneous Active & Reactive Power).

Для моделирования источника напряжения в среде Matlab из базы данных Simulink выбираем блок 3-Phase Sources, внешний вид которого и параметры настройки представлены на рис. 2.5 а, б соответственно:

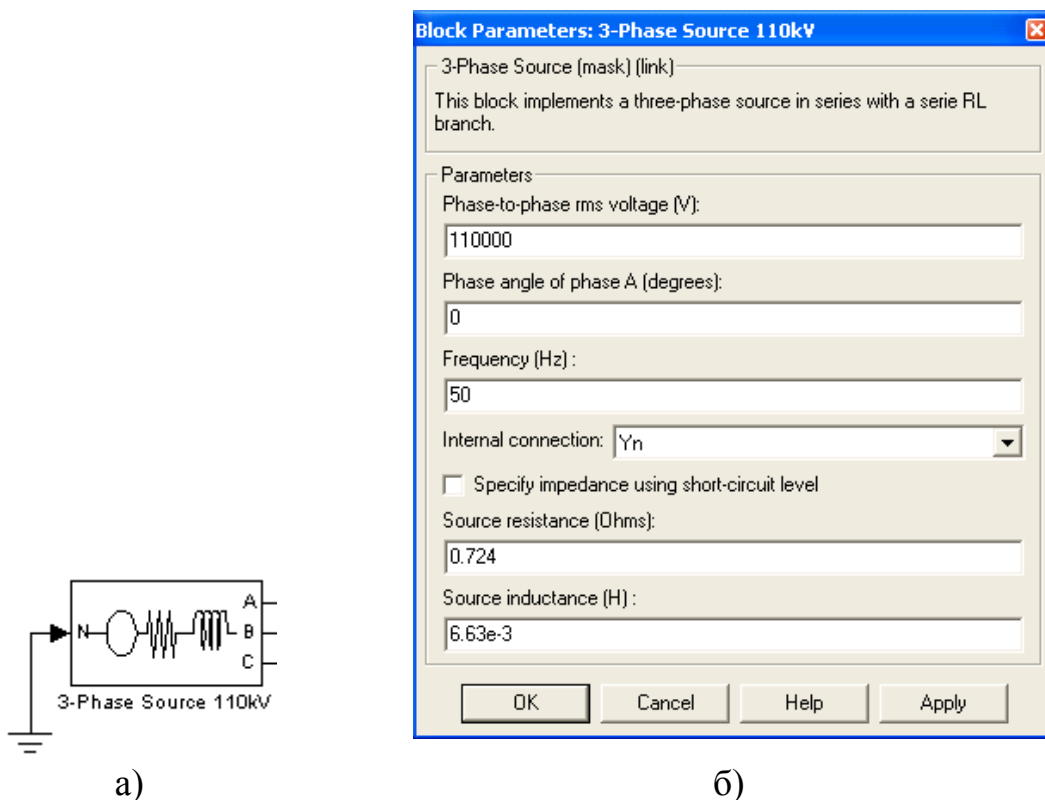


Рис 2.5 Трехфазный источник напряжения а) и окно параметров настройки б).

В полях настройки заданы:

- амплитуда фазного напряжения в вольтах (Phase-to-ground rms voltage (V));
- начальная фаза напряжения в градусах (Phase angle of phase A (degrees));
- частота напряжения в герцах (Frequency (Hz));
- внутренние параметры источника.

Для моделирования понижающих и согласующего трансформаторов в из базы данных Simulink выбираем блоки Three-phase transformer (Two Windings). Для введения параметров трансформатора в окно настройки необходимо рассчитать активное сопротивление и индуктивность первичной и вторичной обмоток. Расчет [26] производится согласно Т-образной схеме замещения (рис. 2.6).



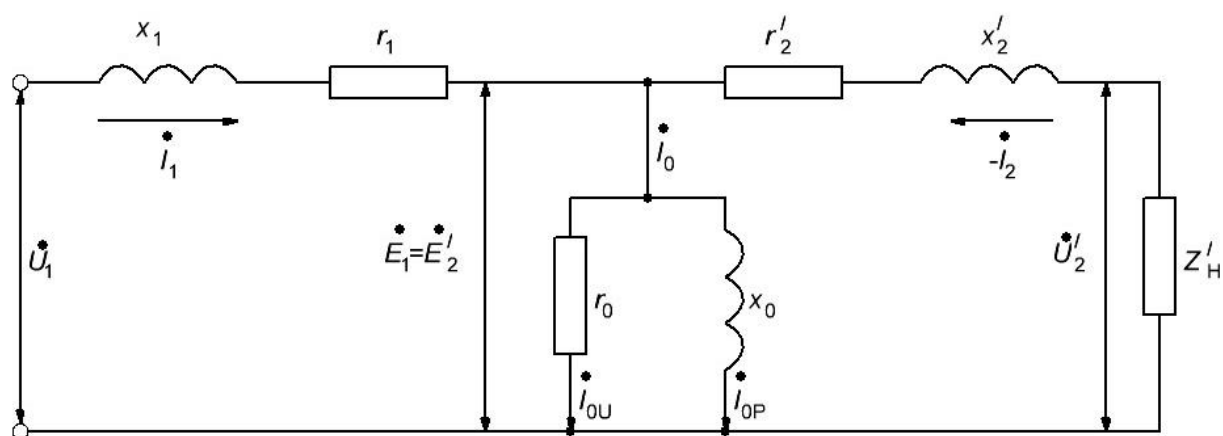


Рис. 2.6. Т-образная схема замещения трансформатора

где  $r_1$  - активное сопротивление первичной обмотки,  $x_1$  - индуктивное сопротивление первичной обмотки,  $x_2'$  - приведенное значение активного сопротивления вторичной обмотки,  $r_2'$  - приведенное значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки,  $z_n'$  - полное сопротивление нагрузки,  $I_0$  - ток холостого хода,  $r_0$  - активное сопротивление потерь,  $x_0$  - индуктивное сопротивление потерь,  $I_1$  - ток в первичной обмотке трансформатора,  $I_2$  - ток вторичной обмотки трансформатора

Расчетные соотношения параметров для понижающих трехфазных трансформаторов ТДН-16000, ТМГ-1000 и согласующего трехфазного трансформатора ТМПН-100 приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Расчет параметров схемы замещения трансформатора

Рассчитываемый параметр	Формула	№ формулы
Номинальный ток первичной обмотки	$I_{1H} = \frac{S}{m \cdot U_{1\phi}}$	(2.1)
Модуль полного сопротивления короткого замыкания первичной обмотки	$ z_{к.з.}  = \frac{U_{к.з.}}{I_{1H}}$	(2.2)
Активное и индуктивное сопротивление короткого замыкания	$r_{к.з.} = \cos \varphi_{к.з.}  z_{к.з.} ;$	(2.3)
	$x_{к.з.} = \sin \varphi_{к.з.}  z_{к.з.} ;$	(2.4)
	$\cos \varphi_{к.з.} = \frac{P_{к.з.}}{U_{к.з.} \cdot I_{1H}}$	(2.5)

Коэффициент трансформации	$n = \frac{U_2}{U_1}$	(2.6)
Активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки	$r_1 = \frac{r_{к.з.}}{2};$	(2.7)
	$x_1 = \frac{x_{к.з.}}{2}$	(2.8)
Активное и индуктивное сопротивление вторичной обмотки	$r_2 = r_1 \cdot n^2;$	(2.9)
	$x_2 = x_1 \cdot n^2$	(2.10)
Базисные сопротивления первичной и вторичной обмоток	$R_{\sigma 1} = \frac{U_1^2}{P_H};$	(2.11)
	$R_{\sigma 2} = \frac{U_2^2}{P_H}$	(2.12)
Относительные значения сопротивления и индуктивности для каждой обмотки	$R_1^0 = \frac{r_1}{R_{\sigma 1}};$	(2.13)
	$L_1^0 = \frac{x_1}{R_{\sigma 1}};$	(2.14)
	$R_2^0 = \frac{r_2}{R_{\sigma 1}};$	(2.15)
	$L_2^0 = \frac{x_2}{R_{\sigma 1}}$	(2.16)

где  $S$  – полная мощность трансформатора;  $m$  – количество фаз;  $U_{1H}$  – фазное напряжение первичной обмотки,  $U_{к.з.}$  – напряжение короткого замыкания,  $U_1$  – напряжение первичной обмотки;  $U_2$  – напряжение вторичной обмотки.

Расчетные значения параметров трансформаторов представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Расчетные значения параметров трансформаторов

Тип трансформатора Параметры	ТДН 16000 110/6	ТМГ 1000 6/0,4	ТМПН 100 0,4/0,4
Полная мощность, кВА	16000	1000	100
Напряжение на первичной обмотке, В	110000	6000	736
Напряжение на вторичной обмотке, В	6000	416	380
Активное сопротивление первичной обмотки, о.е.	$7,7 \cdot 10^{-6}$	0,015	0,018
Индуктивность первичной обмотки, о.е.	$8,2 \cdot 10^{-5}$	0,045	0,04
Активное сопротивление вторичной обмотки, о.е.	$4 \cdot 10^{-6}$	0,017	0,017
Индуктивность вторичной обмотки, о.е.	$1,64 \cdot 10^{-4}$	0,049	0,042

Расчетные значения параметров для соответствующих трансформаторов при моделировании вводятся в виде окон настройки рис. 2.7. а, б, в соответственно.

В полях настройки заданы:

- схема соединения первичной обмотки (Winding 1 connection (ABC terminals)): Y – звезда; Yn – звезда с нейтралью; Yg – звезда с заземленной нейтралью; Delta (D1) – треугольник первой группы (сдвиг напряжений на 30° эл. в сторону отставания по сравнению с соединением в звезду); Delta (D11) – треугольник одиннадцатой группы (сдвиг напряжений на 30° эл. в сторону опережения по сравнению с соединением в звезду);

- схема соединения вторичной обмотки (Winding 2 connection (abc terminals));

- номинальная полная мощность (ВА) и частота трансформатора (Гц) (Nominal power and frequency [Pn(VA), fn(Hz)]);

- параметры первичной обмотки: линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.) (Winding 1 parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu) ]);

- параметры вторичной обмотки: линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.) (Winding 2 parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), L2(pu) ]);

- сопротивление цепи намагничивания (о.е.) (Magnetization resistance Rm(pu));

- индуктивность цепи намагничивания (о.е.) (Magnetization inductance Lm(pu)).

a)

Parameters  
Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ]  
[ 16000e3 , 50 ]  
Winding 1 (ABC) connection : Delta (D1)  
Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]  
[ 110000 , 7.7e-6 , 8.2e-5 ]  
Winding 2 (abc) connection : Yg  
Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]  
[ 6000 , 4e-6 , 1.64e-5 ]  
 Saturable core  
Magnetization resistance Rm (pu)  
200  
Magnetization reactance Lm (pu)  
200  
Measurements None

б)

Parameters  
Nominal power and frequency [ Pn(VA) , fn(Hz) ]  
[ 1000e3 , 50 ]  
Winding 1 (ABC) connection : Delta (D1)  
Winding parameters [ V1 Ph-Ph(Vrms) , R1(pu) , L1(pu) ]  
[ 6000 , 0.015 , 0.045 ]  
Winding 2 (abc) connection : Delta (D1)  
Winding parameters [ V2 Ph-Ph(Vrms) , R2(pu) , L2(pu) ]  
[ 416 , 0.017 , 0.049 ]  
 Saturable core  
Magnetization resistance Rm (pu)  
200  
Magnetization reactance Lm (pu)  
200  
Measurements None

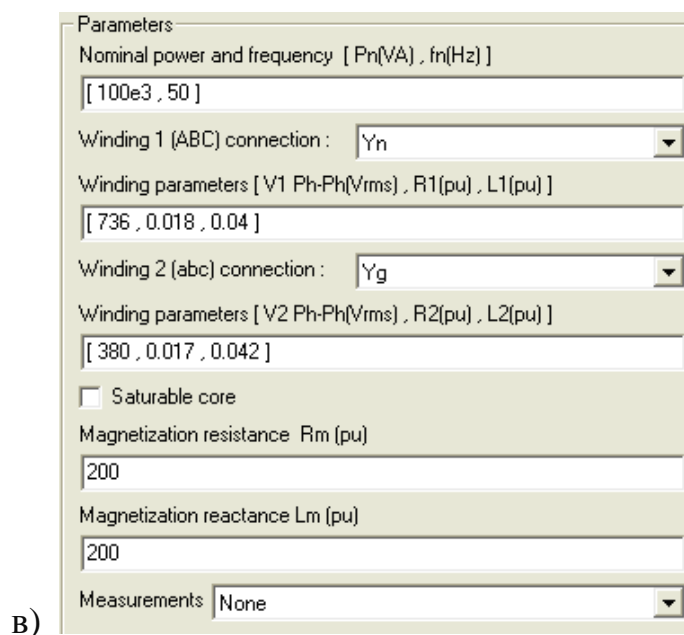


Рис. 2.7. Окна настройки параметров трехфазного трансформаторов  
 а - понижающего трансформатора 110/6, б - понижающего трансформатора  
 6/0,4, в - согласующего трансформатора 0,4/0,4

Окно настройки параметров неуправляемого выпрямителя (Universal Bridge) показано на рис. 2.8, параметров инвертора (Rectifler) представлено на рис. 2.9 для электропривода подъема крана. В полях настройки заданы:

- число плеч моста (Number of bridge arms);
- сопротивление демпфирующей цепи (Ом) (Snubber resistance  $R_s$  (Ohms));
- емкость демпфирующей цепи (Ф) (Snubber capacitance  $C_s$  (F));
- вид полупроводниковых приборов моста (Power Electronic device);
- динамическое сопротивление диодов в открытом состоянии (Ом) ( $R_{on}$  (Ohms));
- индуктивность диода в открытом состоянии (Гн) ( $L_{on}$  (H));
- начальное напряжение на диоде в открытом состоянии (В) (Forward voltage (V));
- пороговое напряжение на транзисторе и диоде в открытом состоянии (В) (Forward voltage [Device  $V_f$ (V), Diode  $V_{fd}$ (V)]);
- Время спада и время затягивания выключения (с) ( $T_f$ (s),  $T_t$ (s)).

Parameters

Number of bridge arms: 3

Port configuration ABC as input terminals

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms)  
1e5

Snubber capacitance  $C_s$  (F)  
01e-03

Power Electronic device Diodes

$R_{on}$  (Ohms)  
1

$L_{on}$  (H)  
0

Forward voltage  $V_f$  (V)  
0

Measurements None

Рис. 2.8. Окно настройки параметров неуправляемого выпрямителя (Universal Bridge)

Parameters

Number of bridge arms: 3

Port configuration ABC as output terminals

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms)  
1e5

Snubber capacitance  $C_s$  (F)  
inf

Power Electronic device IGBT / Diodes

$R_{on}$  (Ohms)  
1e-4

Forward voltages [ Device  $V_f$ (V) , Diode  $V_{fd}$ (V)]  
[ 0 0 ]

[  $T_f$  (s) ,  $T_t$  (s) ]  
[ 1e-6 , 2e-6 ]

Measurements None

Рис. 2.9. Окно настройки параметров инвертора (Universal Bridge)

Окно настройки параметров асинхронного двигателя (Induction motor) представлено на рис. 2.10. В полях настройки заданы:

- тип ротора (Rotor type): Squirrel-Cage – короткозамкнутый ротор; Wound – фазный ротор;
- система координат (Reference frame): Rotor – неподвижная относительно ротора; Stationary – неподвижная относительно статора; Synchronous – вращающаяся вместе с полем;
- номинальная мощность (ВА), действующее линейное напряжение (В), номинальная частота (Гц) (Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]);
- активное сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн) статора (Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Lls(H) ]);
- активное сопротивление (Ом) и индуктивность (Гн) ротора (Rotor resistance and inductance [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]);
- взаимная индуктивность (Гн) (Mutual inductance Lm (H));
- момент инерции ( $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ), коэффициент трения ( $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ), число пар полюсов (Inertia, friction factor, pole pairs [ J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p() ]).

Parameters

Rotor type: Squirrel-cage

Reference frame: Rotor

Nom. power, L-L volt. and freq. [ Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz) ]:  
[ 5000, 380, 50 ]

Stator [ Rs(ohm) Lls(H) ]:  
[ 0.4002 0.01033 ]

Rotor [ Rr'(ohm) Llr'(H) ]:  
[ 0.2180 0.01045 ]

Mutual inductance Lm (H):  
0.2022

Inertia, friction factor and pairs of poles [ J(kg.m<sup>2</sup>) F(N.m.s) p() ]:  
[ 0.06 0 1 ]

Initial conditions (read the details in the description above)  
[ 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 ]

Рис. 2.10. Окно настройки параметров асинхронного двигателя  
(Induction motor)

При моделировании динамических процессов в электроприводе были получены осциллограммы следующих параметров: токов статора ( $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ ); скорости вращения вала двигателя ( $\omega(t)$ ); момента, создаваемого двигателем ( $m(t)$ ).

Исследование спектрального состава [27] реализуется с помощью блока Powergui. При нажатии на вкладку FFT Analysis открывается окно для проведения спектрального анализа. В правой части окна находятся поля, с помощью которых анализируется исследуемый сигнал.

В верхнем поле выбирается переменная, имя которой с помощью блока Scope занесено в рабочее пространство. В поле Input из открывающегося списка выбирается конкретный анализируемый сигнал. В поле Fundamental frequency (Hz) задается основная частота исследуемого сигнала.

В поле Max frequency (Hz) задается максимальная частота спектра. В поле Base value задается масштаб по оси ординат. В верхней части поля со спектральным разложением высвечивается амплитуда основной гармоники и коэффициент гармоник (THD – Total Harmonic Distorsion) исследуемого сигнала.

Для частотных электроприводов крановых механизмов применяется закон управления автономным инвертором напряжения, построенный на принципе прямого векторного управления. Система прямого векторного управления построена в соответствии [28].

Осциллограммы параметров электропривода передвижения крана представлены на рис. 2.11; электропривода подъема – на рис. 2.12 и электропривода передвижения тали – на рис. 2.13.



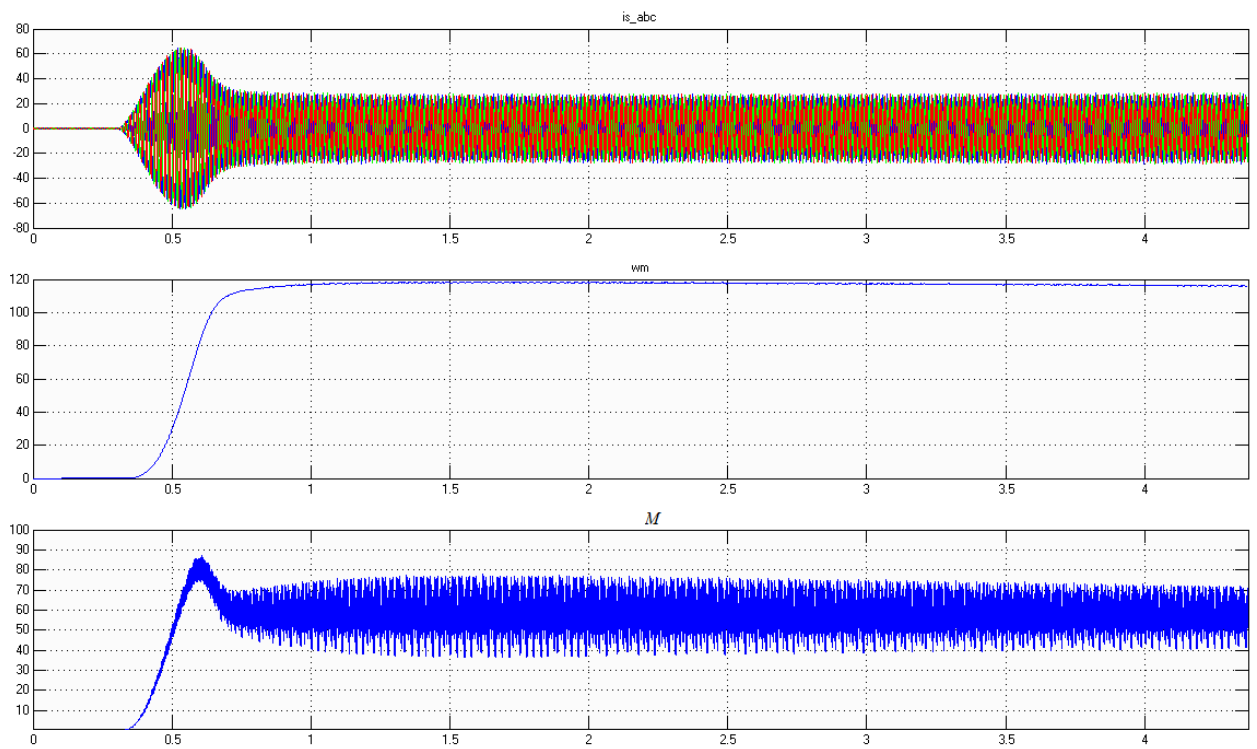


Рис. 2.11. Переходные процессы в электроприводе передвижения крана

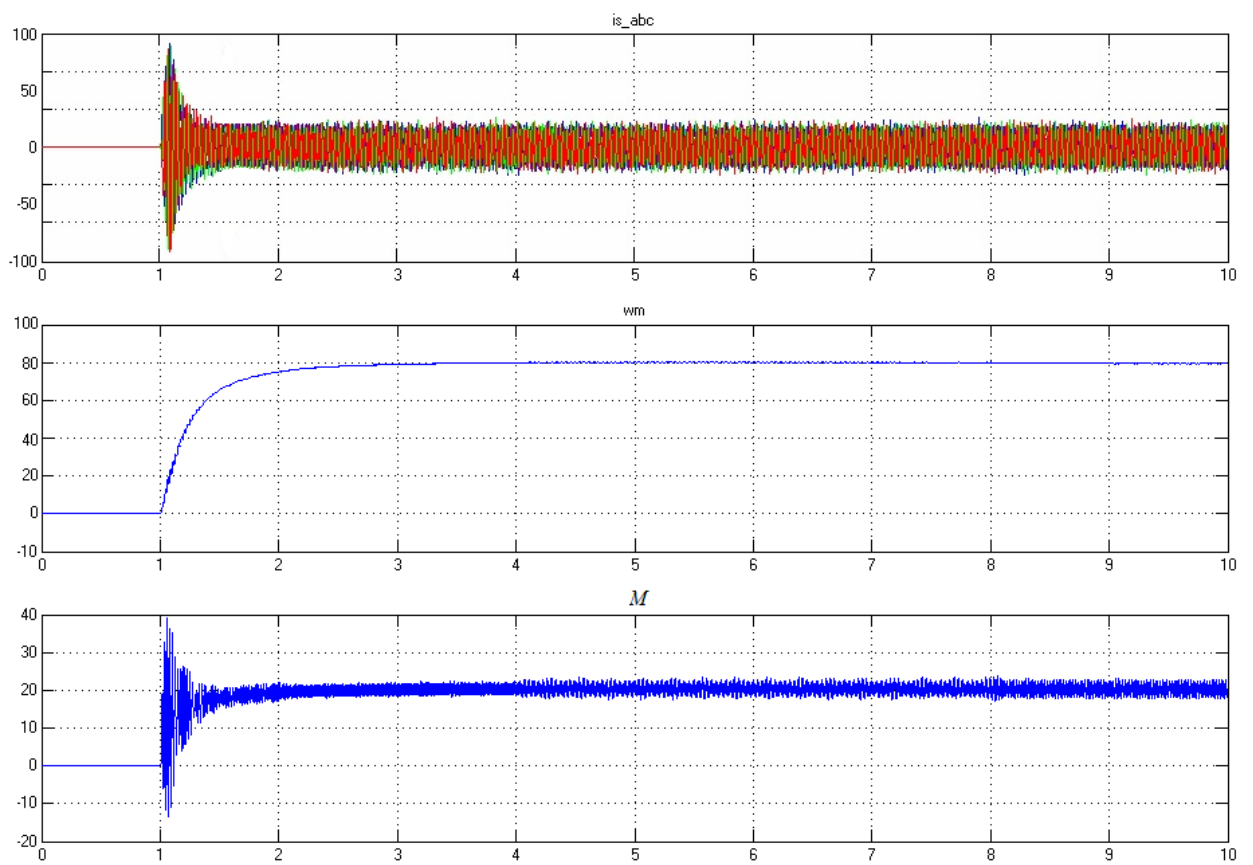


Рис. 2.12. Переходные процессы в электроприводе подъема

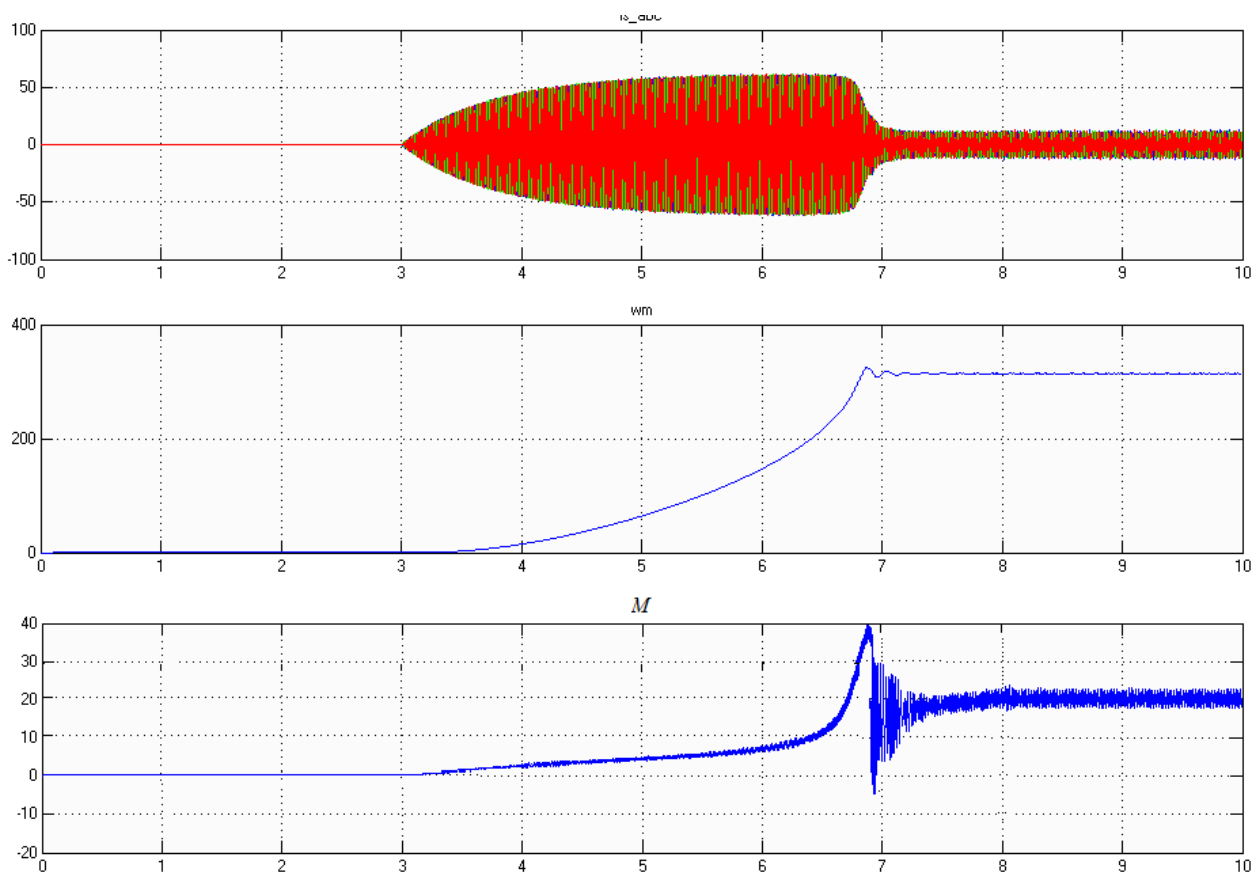


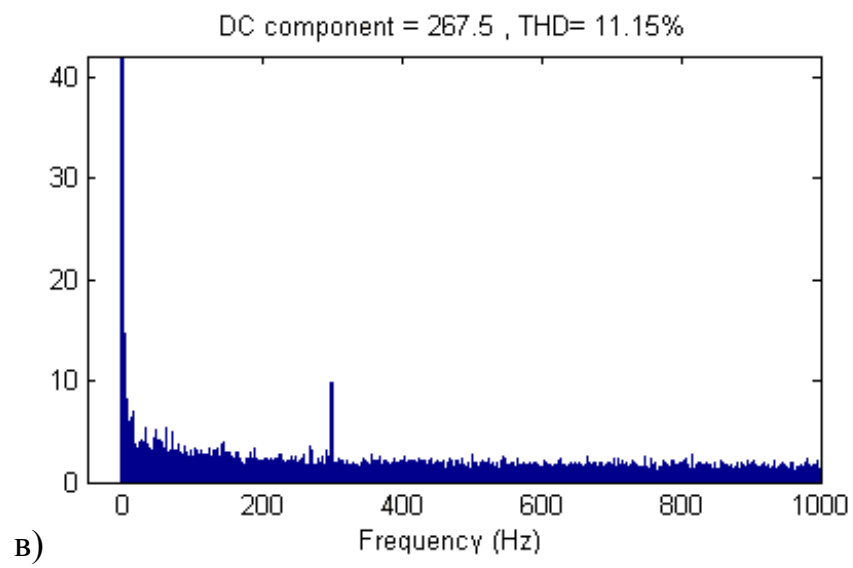
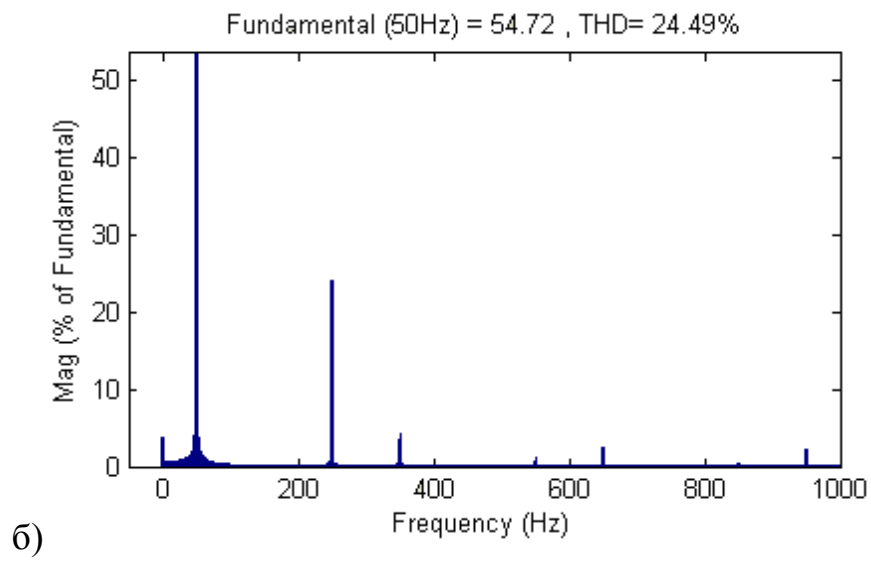
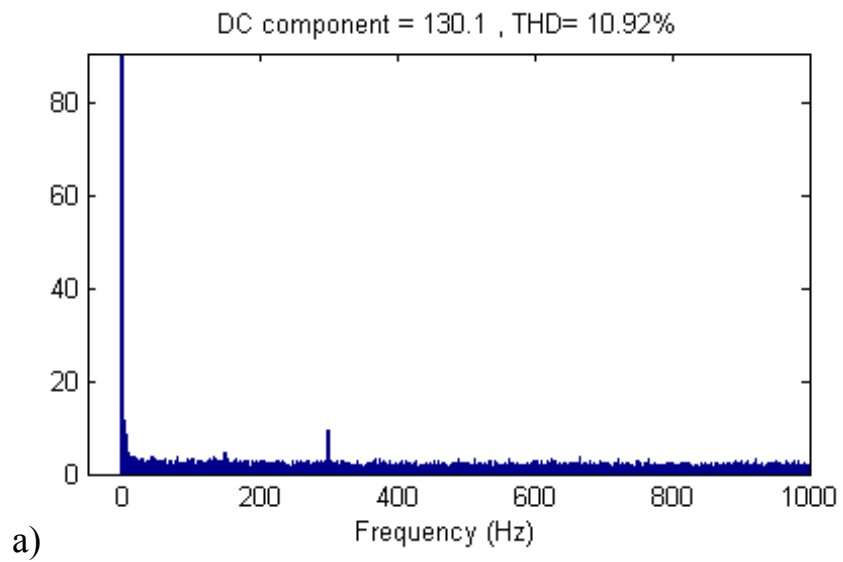
Рис. 2.13. Переходные процессы в электроприводе передвижения тали

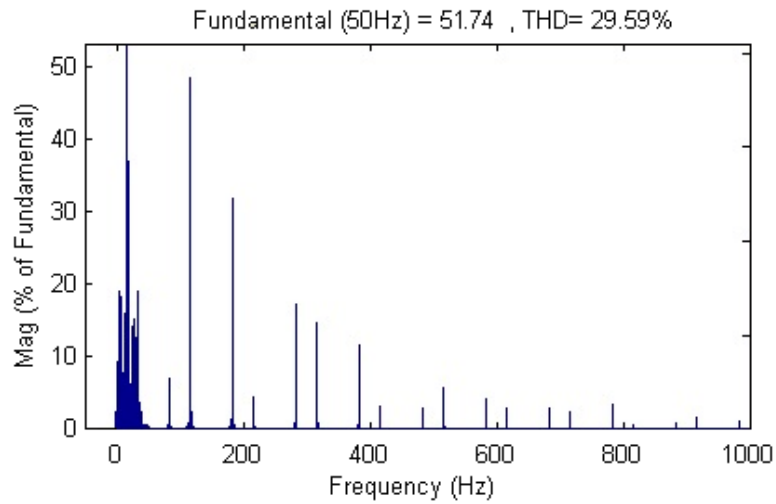
В соответствии обобщенной тахограммы движения (см. рис. 1.1) происходит наложение различных движений (пуск, разгон, установившееся и т.д.) крановых двигателей в соответствии рис. 2.11 – 2.13. Этим объясняется различие в уровне генерируемых гармоник тока в цеховую систему электроснабжения [29].

Исследование формы кривой и гармонического состава тока и напряжения [30] производится на следующих участках электрической цепи при различных частотах с учетом динамических процессов в крановых электроприводах в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд и от 150 до 200 секунд:

- между понижающим трансформатором 6/0,4 (Three-Phase Breaker) и согласующим трансформатором 0,4/0,4 (Three-Phase Breaker) (рис. 2.14 а, б и 2.15 а, б);

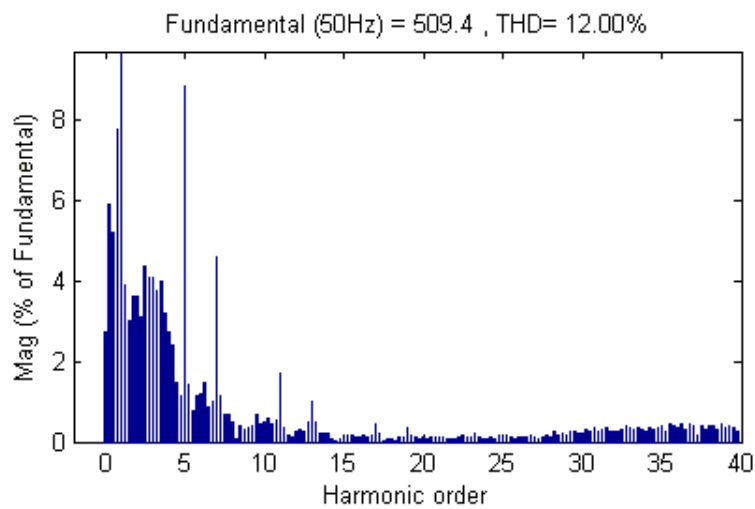
- между согласующим трансформатором (Three-Phase Breaker) и выпрямителем (Universal Bridge) (рис. 2.14 в, г и 2.15 в, г).



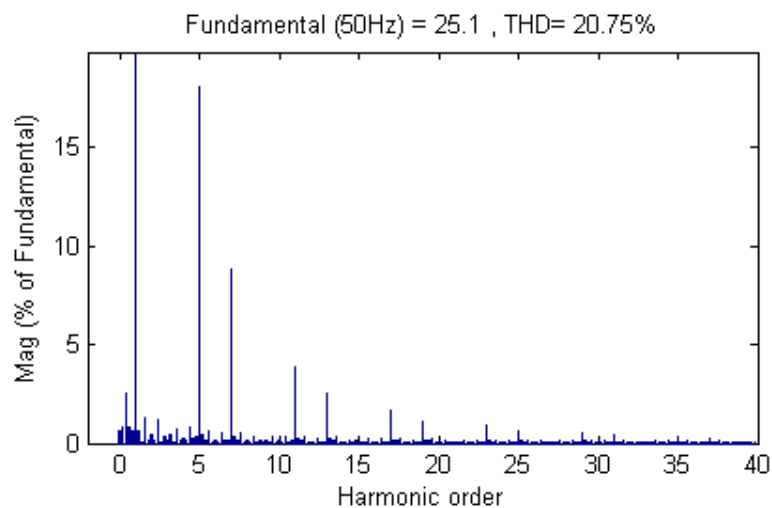


г)

Рис 2.14. Гармонический состав тока и напряжения после понижающего и согласующего трансформаторов для отрезка времени от 50 до 100 секунд где а, б - гармонический состав напряжения и тока соответственно после понижающего трансформатора, в, г - гармонический состав напряжения и тока соответственно после согласующего трансформатора.



а)



б)

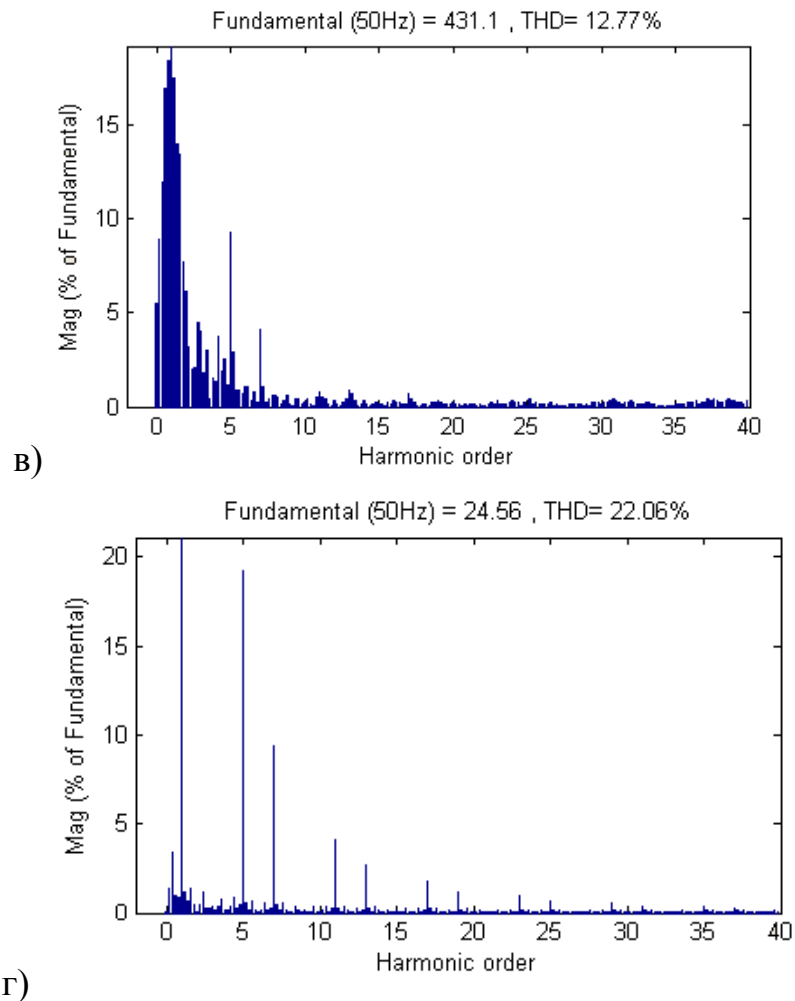
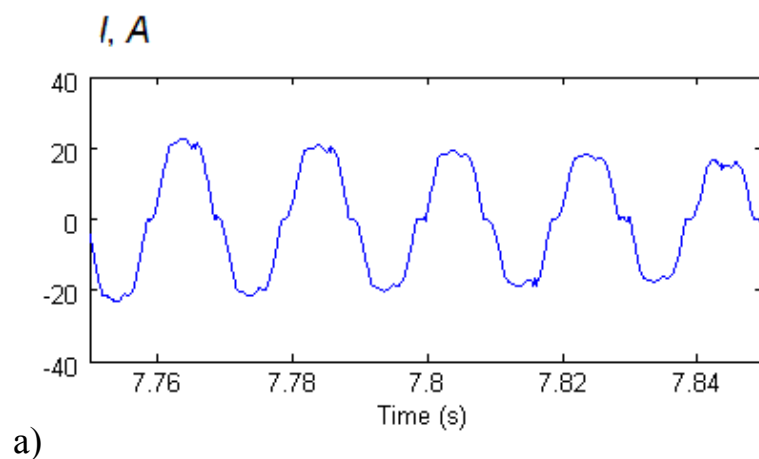


Рис 2.15. Гармонический состав тока и напряжения после понижающего и согласующего трансформаторов для отрезка времени от 150 до 200 секунд где а, б - гармонический состав напряжения и тока соответственно после понижающего трансформатора, в, г - гармонический состав напряжения и тока соответственно после согласующего трансформатора.

Осциллограмма кривой потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора ТМГ-1000 6/0,4 представлена на рис. 2.16 а, б.



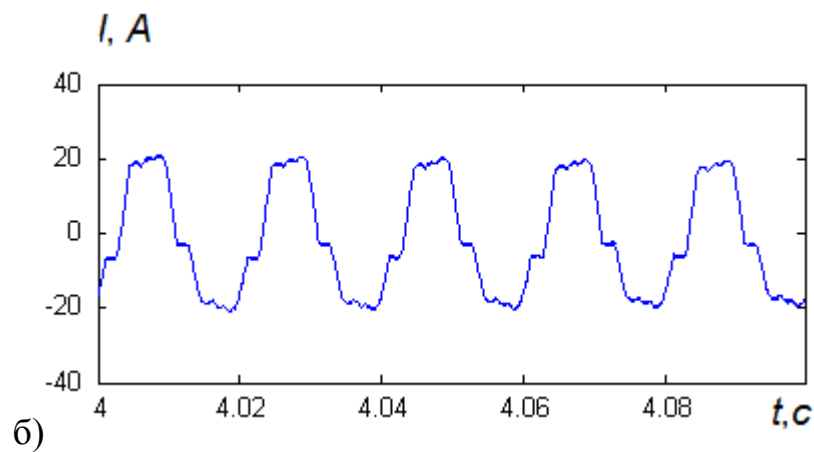
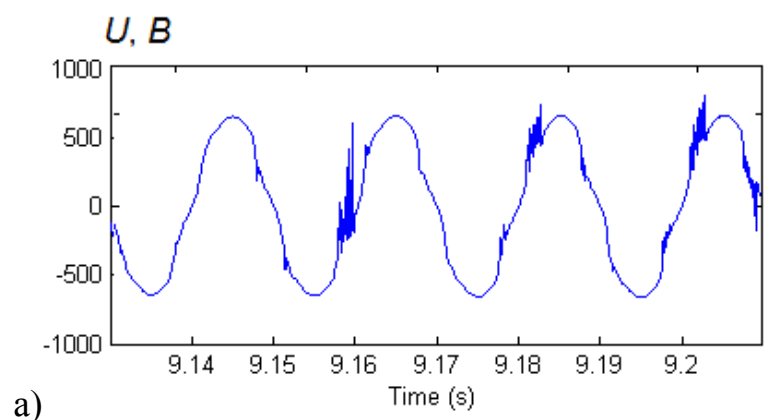


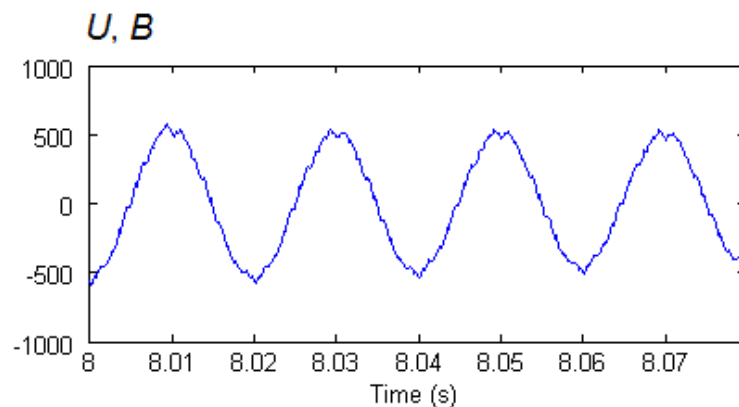
Рис. 2.16. Осциллограмма кривой потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора

а) для отрезка времени от 50 до 100 секунд; б) для отрезка времени от 150 до 200 секунд в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов.

Осциллограмма фазного напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора ТМГ-1000 6/0,4 представлена на рис. 2.17:



а)



б)

Рис. 2.17. Осциллограмма фазного напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора

а) для отрезка времени от 50 до 100 секунд; б) для отрезка времени от 150 до 200 секунд в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов.

Как следует из результатов имитационного моделирования [31], суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (THD) - величина, во всех точках измерения в моменты времени от 50 до 100 секунд и от 150 до 200 секунд согласно тахограммы работы крановых механизмов (рис. 1.1)  $k_{U1} = 11.15\%$ ,  $k_{U2} = 10.92\%$ ,  $k_{U1} = 12.00\%$ ,  $k_{U2} = 12.77\%$ , не соответствуют параметрам ГОСТ Р 32144 – 2013.

На основании экспериментальных данных и результатов моделирования построена обобщенная тахограмма движения за один технологический цикл крановых механизмов с наложением графиков изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока рис 2.18.

Анализ рис. 2.17 показывает неплохое согласование экспериментальных результатов и имитационного моделирования. Некоторое увеличение экспериментальных значений объясняется погрешностью приборов и влиянием измерительных трансформаторов [32].

Как видно из сравнительного анализа гармоник токов, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока зависит от времени работы крановых электроприводов и в отдельные моменты времени может достигать 30 - 35% от уровня основной гармоники. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока достигает наибольшего значения в периоды пуска или торможения двигателей. Это объясняется отличием частоты питающего напряжения от номинального значения в сторону снижения.

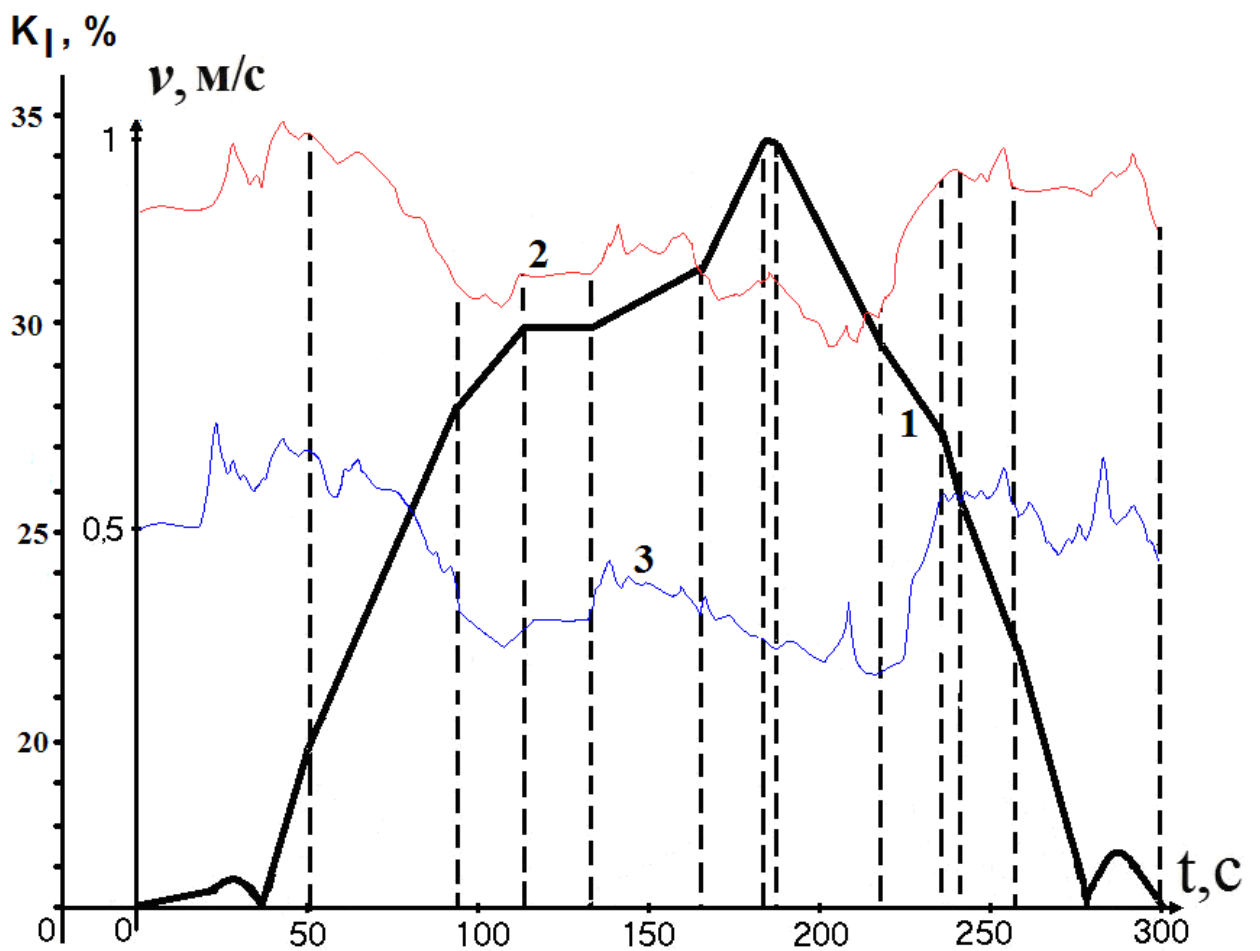


Рис. 2.18. Совмещенная тахограмма изменений скоростей крановых механизмов – 1 и диаграммы изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока: 2 – результат эксперимента, 3 – результат моделирования.

Из рис. 2.18 следует, что применение фильтрокомпенсирующих устройств, построенных на пассивных элементах в этом случае нецелесообразно.



## 2.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ЦЕХОВОЙ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Для подтверждения достоверности результатов экспериментов и имитационного моделирования показателей ЭМС в цеховой системе электроснабжения произведен дополнительный аналитический расчет. С этой целью составлена схема замещения [33], которая строится на основании системы электроснабжения предприятия (см. рис. 2.2). Расчет параметров схемы замещения произведен по расчетным соотношениям, представленным в таблице 2.8.

Таблица 2.8. Расчетные соотношения параметров схемы замещения

Рассчитываемый параметр	Формула	№ формулы
Погонное активное сопротивление воздушной линии при нормальной температуре ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), Ом/км	$R_0 = \frac{\rho}{F} = \frac{1000}{\gamma \cdot F}$	(2.17)
Активное сопротивление при нормальной температуре, Ом	$R_0^{20} = R_0 \cdot l$	(2.18)
Погонное индуктивное сопротивление воздушной линии при нормальной температуре, Ом/км	$X_0 = \left( 0,1441g \frac{D_{cp}}{r_{np}} + 0,016 \right)$	(2.19)
Среднегеометрическое расстояние между проводами	$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \text{ см}$	(2.20)

где  $\rho$  – удельное сопротивление (для меди  $\rho = 18,8 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ ; для алюминия  $\rho = 31,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ );  $\gamma$  – удельная проводимость (для меди  $\gamma = 53 \text{ м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$ ; для алюминия  $\gamma = 31,7 \text{ м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$ );  $F$  – сечение провода,  $\text{мм}^2$ ,  $l$  – длина линии, км,  $r_{np}$  – радиус провода, см;  $D_{12}$ ,  $D_{23}$ ,  $D_{31}$  – расстояния между соответствующими фазными проводами линии, см.

Усредненные среднегеометрические расстояния между фазными проводами воздушной линии приняты в соответствии таблицы [34].

Активное сопротивление трансформатора для одной фазы определяется на основании паспортных данных:

$$R_{\text{тр}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{НОМ}}^2} \text{ Ом}, \quad (2.23)$$

где  $\Delta P_{\text{кз}}$  – потери активной мощности в режиме короткого замыкания, кВт;  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное напряжение на основном выводе, кВ;  $S_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Реактивное (индуктивное) сопротивление трансформатора представляет сумму индуктивного сопротивления рассеяния первичной обмотки и приведенного к ней индуктивного сопротивления вторичной обмотки и рассчитывается по формуле:

$$X_{\text{T}} = \frac{u_{\text{р}} \cdot U_{\text{НОМ}}^2 \cdot 10}{S_{\text{НОМ}}} \text{ Ом}, \quad (2.24)$$

где  $u_{\text{р}} = \sqrt{u_{\text{кз}}^2 + u_{\text{а}}^2}$  – падение напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора в %;  $u_{\text{кз}}$  – напряжение короткого замыкания, %;  $u_{\text{а}} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н}} \cdot R_{\text{T}} \cdot 10}{S_{\text{н}}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{н}}} 100 \%$  – падение напряжения на активном сопротивлении трансформатора, %.

В современных крупных трансформаторах  $X_{\text{T}} \gg R_{\text{T}}$ , поэтому падение напряжения на активном сопротивлении мало и им можно пренебречь. Тогда  $u_{\text{кз}} = u_{\text{р}}$  и в формулу (2.19) вместо  $u_{\text{р}}$  подставляют  $u_{\text{кз}}$ .

Параметры понижающих и согласующих трансформаторов приведены в таблице 2.9 []:

Таблица 2.9 Параметры понижающих и согласующих трансформаторов

Тип	Номинальная мощность, кВ	Номинальное высшее/низшее напряжение, кВ	Потери холостого хода, кВт	Потери короткого замыкания, кВт	Напряжение короткого замыкания, %	Схема и группа соединения обмоток
ТДН-16000	16000	110/6	21	90	10,5	Y/Δ
ТМГ-1000	1000	6/0,4	1,55	10,2	5,5	Δ/Y <sub>н</sub>
ТМПН-100	100	0,736/0,4	0,29	1,28	5,5	Y/Y <sub>н</sub>

На рис 2.19 приведена схема замещения схемы электроснабжения мостового крана, с результатами расчета активных и реактивных сопротивлений.

Суммарный коэффициент несинусоидальности по напряжению в точке измерения И1 определялся по формуле [35]:

$$K_U = \frac{S_{np}}{S_{кз}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sin \varphi}{\pi \cdot \left( \frac{S_{np}}{S_{кз}} + x_{np} \right)} - \frac{9}{\pi^2}}, \quad (2.25)$$

где  $x_{np}$  – реактивное сопротивление преобразователя частоты,  $x_{i\delta} = \frac{U_k \cdot S_{i\delta}}{S_{\delta\delta} \cdot 100}$ ,  $S_{np}$  – полная суммарная мощность преобразователей частоты крана ( $S_{np} = 20$  кВА),  $S_{mp} = 100$  кВА – полная мощность согласующего трансформатора,  $U_k$  – напряжение короткого замыкания согласующего трансформатора ( $U_k = 5,5$  %),  $\sin \varphi$  – принимается в соответствии коэффициента мощности  $K_M$  (табл.2.13),  $S_{кз}$  – мощность короткого замыкания в точке измерения И1 ( $S_{кз} = 4000$  кВА).

В таблице. 2.10 приведены результаты измерений суммарного коэффициента несинусоидальности по току и напряжению, реактивная мощность, измеренные в реальной системе мостового крана при различных режимах работы двигателей подъема, передвижения крана и передвижения тали и произведено сравнение с результатами моделирования, аналитическим расчетом [36]. Результаты измерений представлены через каждые пятьдесят секунд в пределах обобщенной тахограммы движения. Результаты непрерывных измерений представлены в виде осциллограмм.

В таблице. 2.10 приняты следующие обозначения величин:  $U_n$  – линейное напряжение на входе преобразователя частоты,  $I_a(1)$  – ток первой гармоники фазы А,  $P$  – потребляемая активная мощность,  $Q$  – потребляемая реактивная мощность,  $K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на низкой стороне трансформатора,  $K_I$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока на низкой стороне трансформатора,  $K_M$  – коэффициент мощности.

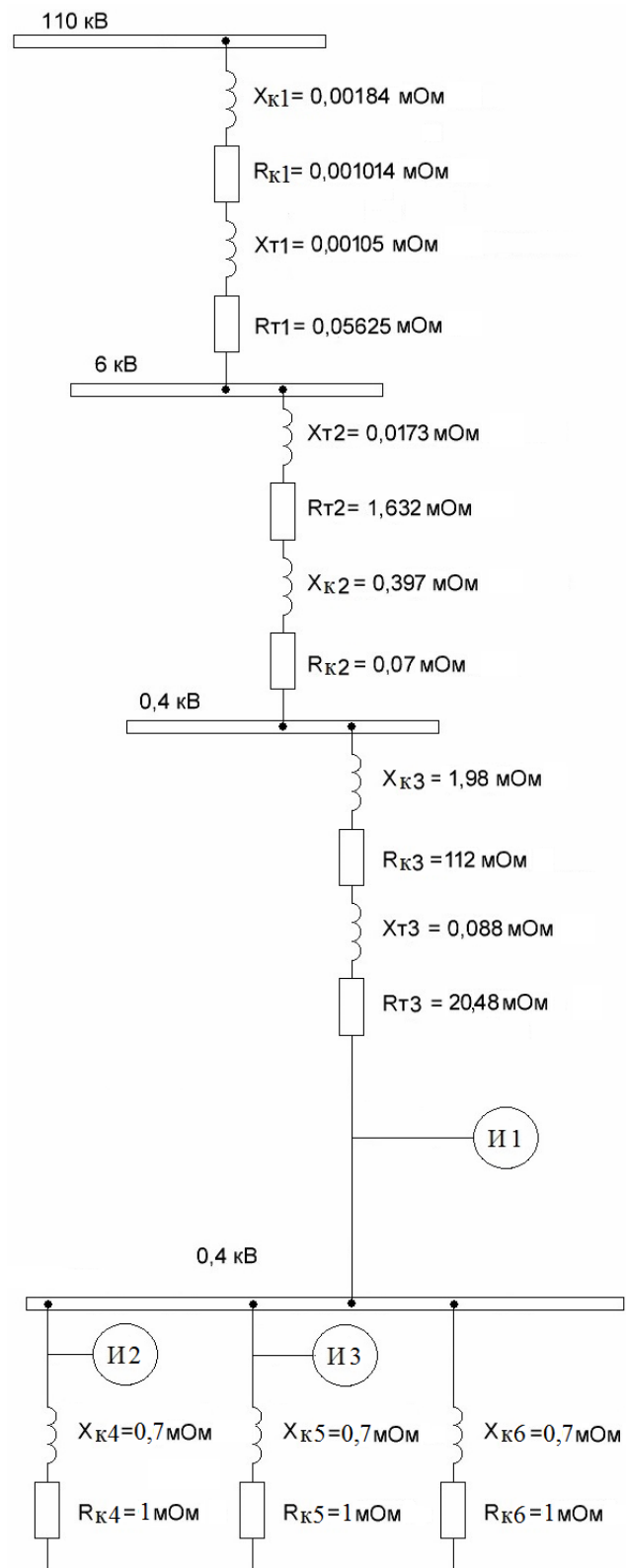


Рис. 2.19. Схема замещения цеховой системы электроснабжения электроприемников мостового крана

Индуктивное сопротивление со стороны 110 кВ незначительное.

Таблица 2.10. Сводная таблица результатов эксперимента, моделирования и аналитического расчета

t, с (согласно тахограмме движения)	Измерения и моделирование								Расчет
	I, А	S, кВА	P, кВт	Q, квар	I(1), А	$K_M$	$K_u$ , %	$K_I$ , %	$K_u$ , %
50	<u>3,95</u>	<u>2,6</u>	<u>1,869</u>	<u>1,304</u>	<u>3,86</u>	<u>0,698</u>	<u>8,77</u>	<u>34,7</u>	6,3
	4,121	2,712	2,305	1,42	4,01	0,62	10,62	27,74	
100	<u>19,078</u>	<u>12,554</u>	<u>11,55</u>	<u>4,92</u>	<u>18,17</u>	<u>0,43</u>	<u>8,83</u>	<u>32,02</u>	6,71
	19,211	12,644	11,885	4,31	18,71	0,36	10,69	23,3	
150	<u>25,947</u>	<u>17,077</u>	<u>14,857</u>	<u>8,42</u>	<u>24,67</u>	<u>0,566</u>	<u>8,93</u>	<u>32,59</u>	6,54
	26,36	17,350	15,286	8,24	25,43	0,53	10,8	27,3	
200	<u>29,696</u>	<u>19,545</u>	<u>17,786</u>	<u>8,103</u>	<u>28,83</u>	<u>0,456</u>	<u>8,73</u>	<u>30,7</u>	6,72
	30,79	20,26	18,64	7,94	29,67	0,42	10,5	27,7	
250	<u>9,231</u>	<u>6,075</u>	<u>5,285</u>	<u>2,995</u>	<u>8,72</u>	<u>0,567</u>	<u>8,82</u>	<u>34,74</u>	6,53
	9,657	6,356	5,529	3,13	9,41	0,56	10,6	23,0	

Примечание. 1. В числителе приводятся значения параметров, полученные путем измерения, в знаменателе – моделированием, с учетом того что двигатель перемещения крана работает а номинальной частоте, а двигатель передвижения тали и двигатель подъема при значениях, меньших номинального.

Отличие аналитических значений  $K_u$  от экспериментальных объясняется тем, что в расчетах не учитываются активные сопротивления элементов системы электроснабжения.

Так как суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения превышают нормируемые величины, и это означает, что влияние их на элементы сети может оказаться значительным, то необходимо использовать фильтрокомпенсирующие устройства [37,38]. Из предшествующего анализа в главе 1 следует, что наиболее эффективна компенсация, с помощью активных фильтров гармоник.

## **Выводы:**

1. Экспериментальные исследования качества электроэнергии в цеховой системе электроснабжения крановых механизмов с помощью сертифицированных приборов (Энергомонитор 3.3Т) в соответствии утвержденного регламента и стандарта показали наличие высших гармоник тока и напряжения, уровень которых, при определенных режимах работы может превышать допустимые значения, так например в точке измерения И1 суммарный коэффициент несинусоидальности по напряжению достигает 11,15 %.

2. Имитационная модель цеховой системы электроснабжения, построенная с учетом крановых электроприводов и другой нагрузки, в пакете Matlab Simulink, позволяет получать показатели электромагнитной совместимости и значения энергетических величин при любых динамических процессах в крановых электроприводах. При этом сравнительный анализ экспериментальных значений ЭМС и результатов имитационного моделирования показывает хорошую сходимость.

3. Результаты экспериментов и имитационного моделирования показателей ЭМС позволяют наглядно представить изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения в виде графиков на обобщенной тахограмме движения.

4. Для снижения влияния высших гармоник тока и напряжения в цеховых системах электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками (крановыми электроприводами) целесообразно использовать активные фильтры гармоник, реагирующие на изменение уровня высших гармоник при динамических процессах крановых электроприводов.

### 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

#### 3.1. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ

Существующие промышленные активные фильтры практически не имеют различий по структуре силовой части, но принцип построения систем управления (СУ) значительно различается.

Рассмотрим существующие СУ параллельными активными фильтрами гармоник (АФГ).

##### 1. Система управления АФГ на базе релейного регулятора тока (рис.3.1).

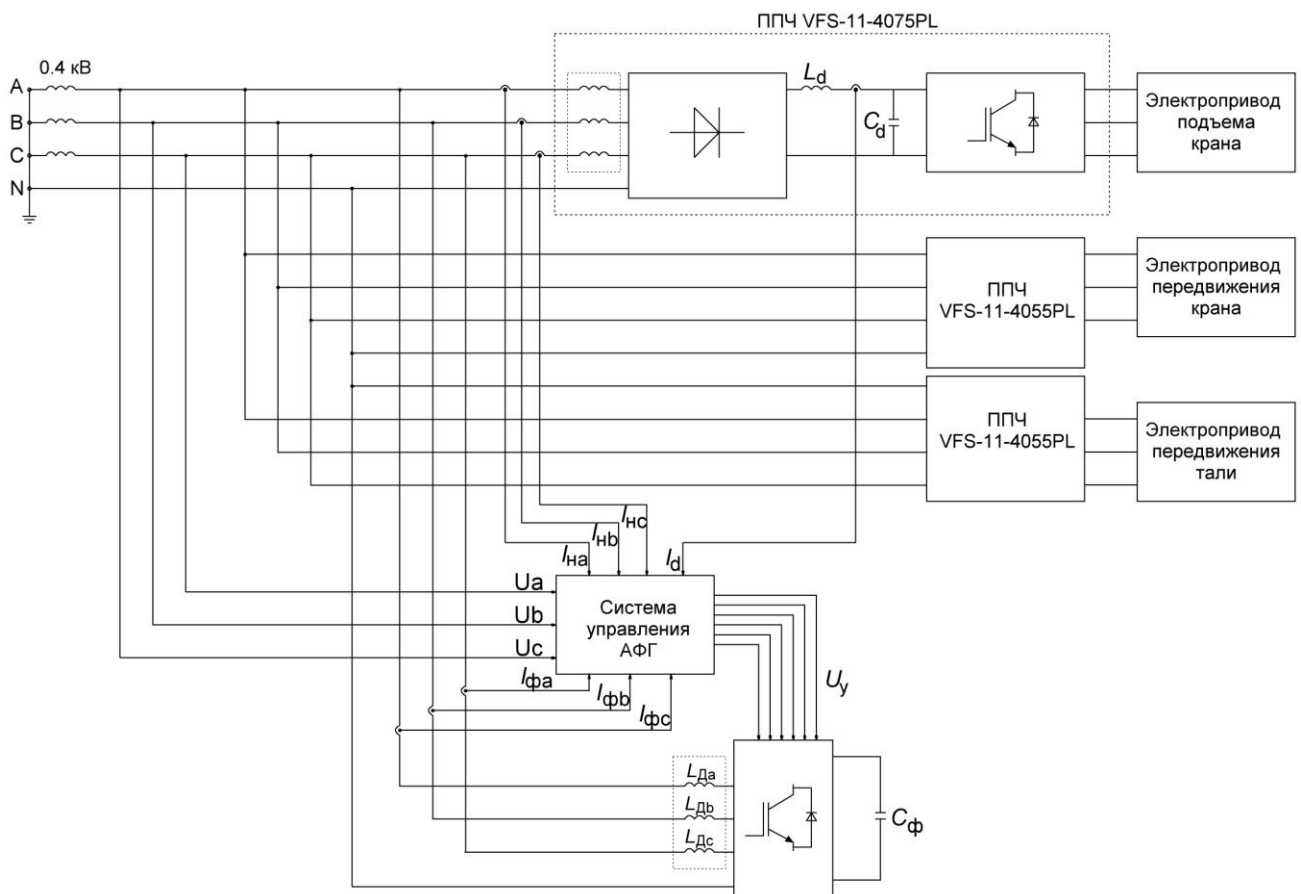


Рис. 3.1. Схема подключения АФГ с релейным регулятором к системе электроснабжения электроприемников мостового крана

Принцип работы такой системы управления сводится к компенсации разницы между мгновенными значениями реального и «идеального» токов АФГ [39].

Реальный ток, потребляемый из сети, определяется на основе баланса мощностей, передаваемых через звено постоянного тока в нагрузку (рис.3.1)

$$P_{пост} = I_n \cdot U_{конд}, \quad (3.1)$$

где  $I_n$  - ток, потребляемый нагрузкой,  $U_{конд}$  - напряжение на обкладках конденсатора  $C_d$ .

Принимая мощность, потребляемую нагрузкой за полную мощность:

$$S = 3U_\phi \cdot I_\phi, \quad (3.2)$$

где  $U_\phi$  и  $I_\phi$  соответственно действующие значения фазного напряжения сети и тока, потребляемого преобразователем.

Таким образом, значение идеального фазного тока, потребляемого из сети, примет вид:

$$i = \frac{I_d}{k_{cx}}, \quad (3.3)$$

где  $k_{cx}$  - коэффициент схемы неуправляемого выпрямителя, а  $I_d$  - ток в звене постоянного тока ППЧ.

Мгновенные значения «идеальных» токов равны:

$$i_a^*(t) = \frac{I_d}{k_{cx}} \cdot \sin(\omega t + \varphi); \quad (3.4)$$

$$i_b^*(t) = \frac{I_d}{k_{cx}} \cdot \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ);$$

$$i_c^*(t) = \frac{I_d}{k_{cx}} \cdot \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ),$$

где  $\varphi$  - задаваемый угол сдвига между напряжением сети и потребляемым «идеальным» током.

Сравнение мгновенных значений реального и «идеального» тока выглядит следующим образом:

$$\Delta i_a(t) = i_a^*(t) - i_{ан}(t); \quad (3.5)$$

$$\Delta i_b(t) = i_b^*(t) - i_{бн}(t);$$

$$\Delta i_c(t) = i_c^*(t) - i_{сн}(t).$$

Работа регулятора строится следующим образом [40,41]:

- Значение разницы токов поступает на блок релейного регулятора тока вместе с сигналами обратных связей по току АФГ (рис.3.2).



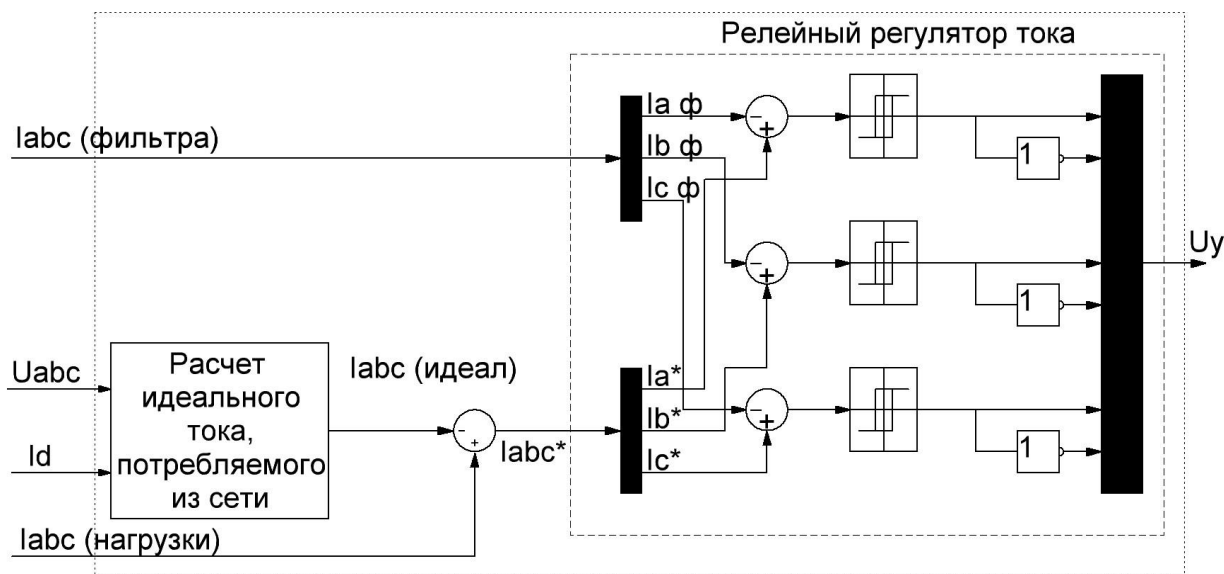


Рис. 3.2. Функциональная схема СУ АФГ с релейным регулятором тока

- В ходе работы происходит постоянное сравнение разницы между мгновенными значениями реального и «идеального» токов нагрузки преобразователя с мгновенным значением тока АФГ.
- В результате сравнения на выходе регулятора формируются сигналы управления АФГ, так что мгновенное значение текущего тока АФГ было ближе всего к значению разницы между мгновенными значениями реального и «идеального» токов нагрузки преобразователя.
- Эти сигналы формируют на выходе мгновенные значения тока АФГ, компенсирующие несинусоидальность тока нагрузки.

Реально же формирование тока фильтра реализуется путем накопления либо отдачи энергии на накопительном конденсаторе, за счет инвертора напряжения.

При этом, для адекватной работы системы необходимо подключение датчиков напряжения и токов на каждую фазу со стороны нагрузки и на каждую фазу со стороны фильтра, как показано на рис. 3.1. Так же следует отметить, что для системы с тремя электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой необходима установка АФГ отдельно для каждого электроприемника.

2. СУ АФГ, построенная по принципу преобразования координат [42,43].

Схема подключения силового АФГ с СУ построенной по принципу преобразования координат к системе электроснабжения электроприемников мостового крана приведена на рис 3.3.

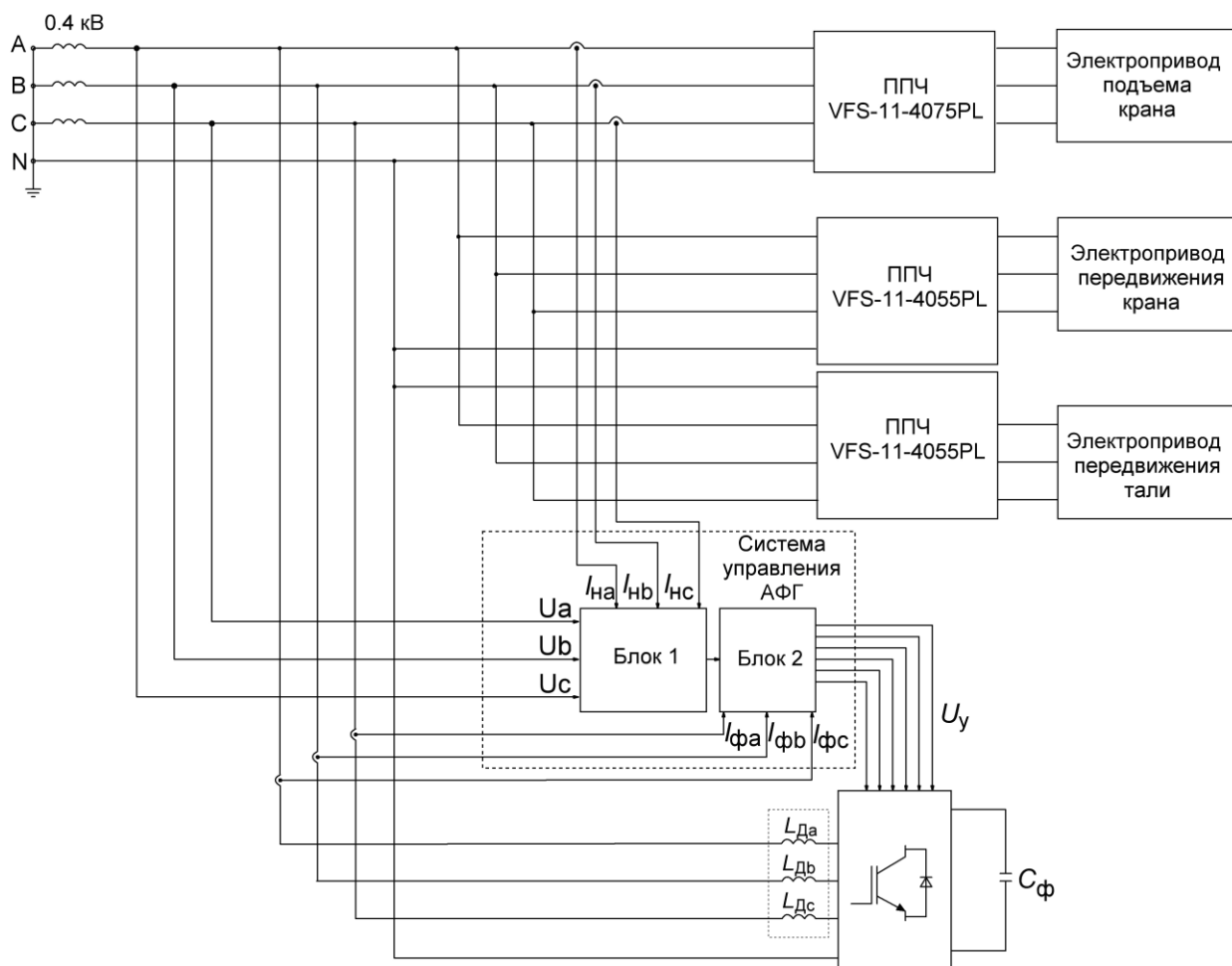


Рис. 3.3. Схема подключения АФГ с СУ работающей по принципу преобразования координат к системе электроснабжения электроприемников мостового крана

В структурной схеме такой системы управления силового активного фильтра можно выделить два основных блока, на вход которых поступают внешние сигналы от датчиков, контролируемых параметров и заданных значений. Сигналы от датчиков тока нагрузки (сети)  $i_{сети}$  преобразуются из трехфазной системы координат  $abc$  в двухфазную  $dq$ , которая должна быть синхронизирована с частотой и фазой напряжения сети.

Преобразование координат [44,45,46] реализуется согласно выражения 3.6:

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_x \\ i_y \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Для этого в систему управления входит устройство синхронизации, обеспечивающее генерацию опорных единичных синусоидальных сигналов, синхронизированных по частоте и фазе с напряжением сети. Блок преобразования координат  $abc/dq$ , на вход которого поступают сигналы от датчиков тока трёх фаз преобразователя, контролируемых в реакторах сглаживающих фильтров  $L_\phi$ , вычисляет значения токов в  $dq$ -координатах с использованием единичного сигнала устройства синхронизации.

Далее сигнал тока в  $dq$ -координатах проходит через фильтр низких частот, где выделяется первая гармоника, которая впоследствии вычитается из общего сигнала. После чего в результате обратного преобразования координат  $dq/abc$  получаем сигнал искажения, который поступает на вход драйвера.

Необходимо отметить, что аппаратная реализация разработанной дискретной математической модели в цифровых системах управления требует повышения рабочей частоты микроконтроллера для обеспечения точности управления.

Таким образом, алгоритм работы системы управления выглядит следующим образом [47, 48]:

- 1) в начале работы производится измерение мгновенного значения тока нагрузки  $I_{nt}$  в момент произвольный момент времени  $t$ . Полученные данные от измеряющих датчиков передаются в блок обработки данных;
- 2) на втором этапе происходит преобразование трёхфазной системы координат  $a, b, c$  в систему координат  $d, q$ , используя (3.4);
- 3) на следующем шаге происходит вычисление мгновенных значений сигнала искажения в  $d, q$  координатах, представляющего собой разность между идеальной синусоидой и током нагрузки;

4) на основании полученного сигнала искажения формируется управляющий ШИМ сигнал;

5) далее в силовой части активного фильтра путем переключений вентилях по заданному ШИМ сигналу формируется ток фильтра  $i_{\phi}$ , который представляет собой «зеркальное» отображение искажающего сигнала;

б) на завершающем этапе происходит генерация полученного сигнала в сеть с задержкой времени  $\Delta t$ , обусловленная временем, затраченным на производимые микроконтроллером вычисления тока фильтра и работу ключей. В результате сложения тока сети (в момент времени  $t + \Delta t$ ) с током фильтра полученным в результате измерений в момент времени  $t$ , происходит подавление высших гармоник с небольшой погрешностью. Эта погрешность сводится к минимуму с увеличением скоростью обработки данных. Далее система повторяет цикл заново.

Структурная схема системы управления АФГ, основанной на преобразовании координат приведена на рис. 3.4:

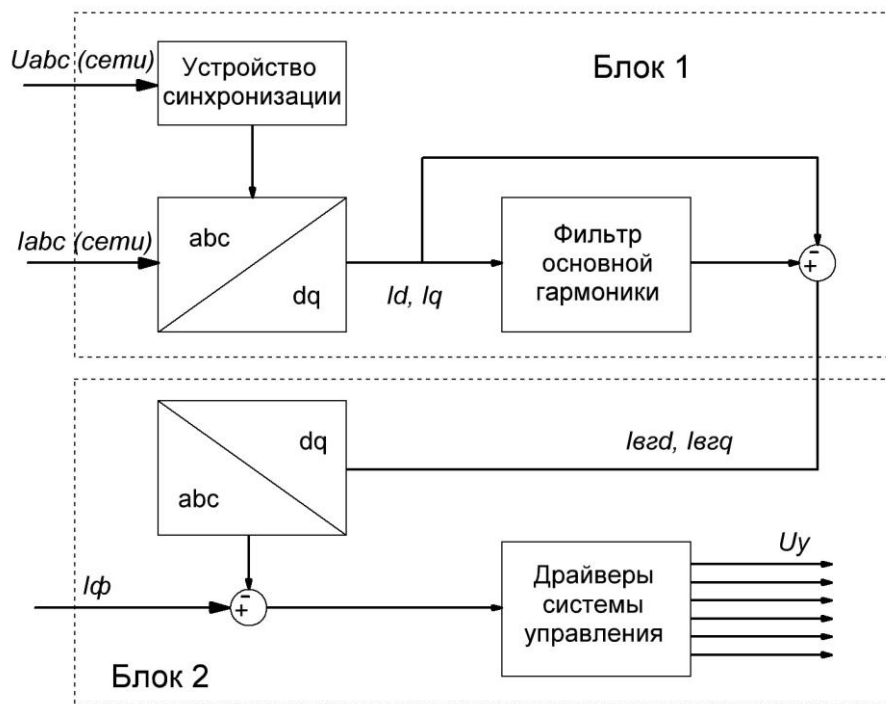


Рис. 3.4. Структурная схема системы управления АФГ, основанной на преобразовании координат

Таким образом, для того чтобы обеспечить компенсацию высших гармонических составляющих, генерируемых нелинейными электроприемниками крана, необходимо установить по три датчика напряжения и тока в каждую фазу на общей секции шин и три датчика тока для определения тока фильтра.

3. Метод, основанный на обобщенной теории активной и реактивной мощности (мгновенной мощности) [49, 50].

К основным функциям системы управления относятся измерение фазных напряжений сети ( $V_a, V_b, V_c$ ) и фазных токов ( $i_{LPFa}, i_{LPFb}, i_{LPFc}$ ), а также расчет токов задания по значениям активной и реактивной мощности (рис. 3.5).

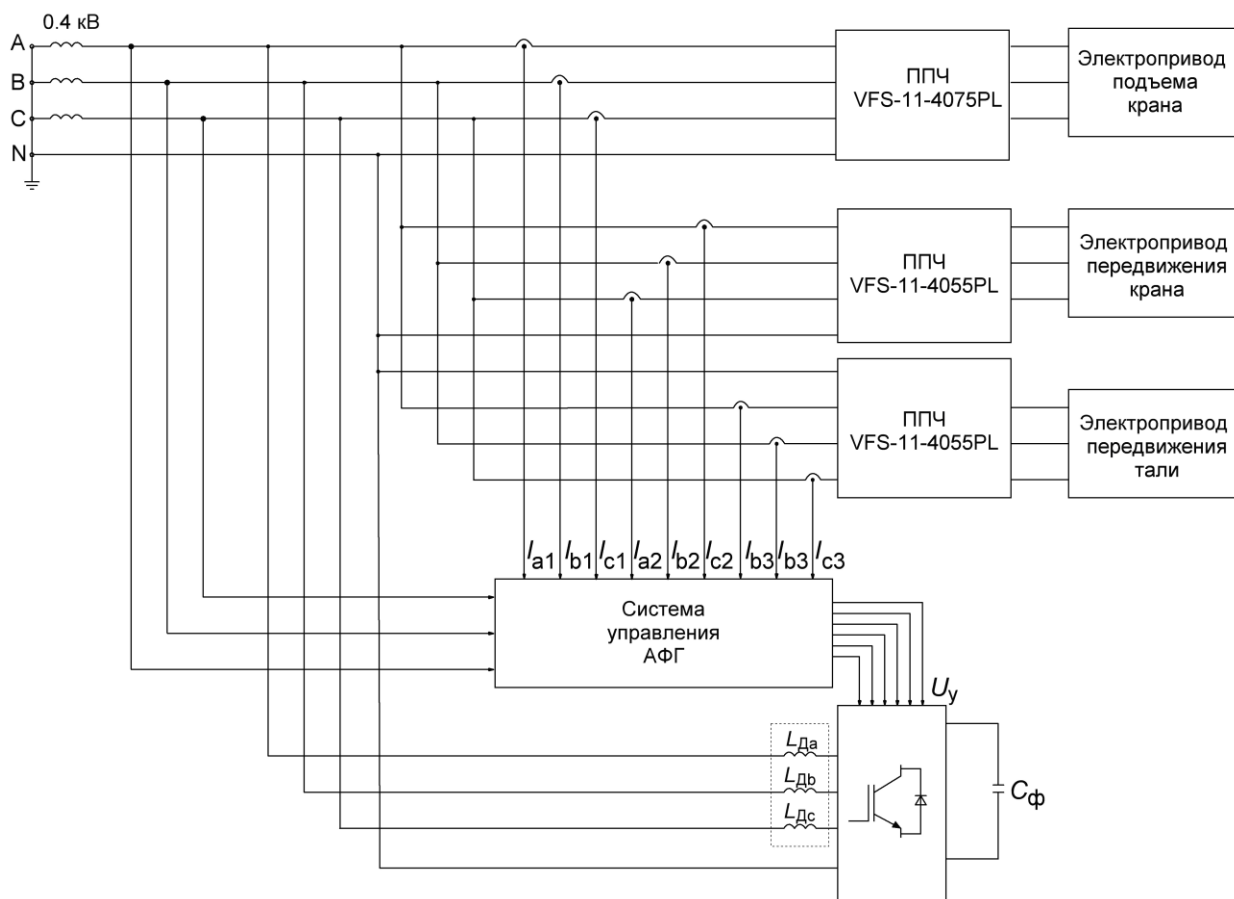


Рис.3.5. Схема подключения активного фильтра с СУ, построенной на теории мгновенной мощности к цеховой системе электроснабжения мостового крана

Мгновенные значения мощности рассчитываются в два этапа: 1 – приведение измеренных значений к неподвижной системе координат

( $\alpha=\beta=0$ ); 2 – расчет самих значений мгновенных мощностей, согласно выражения 3.7:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{DC} \\ q_{DC} \\ p_{0DC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{AC} \\ q_{AC} \\ p_{0AC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

где  $p$  – активная составляющая мощности,  $q$  – реактивная составляющая мощности,  $p_0$  – мощность нулевой последовательности.

Среднее значение активной мгновенной мощности  $p_{DC}$  равно утроенному значению активной мощности в каждой из фаз, аналогично и для мгновенной реактивной мощности  $q_{DC}$ . Переменные составляющие обеих мгновенных мощностей  $p_{AC}$  и  $q_{AC}$  обусловлены только гармониками (так как нагрузка симметрична). Так как система электроснабжения в целом дает постоянную составляющую активной мощности, а переменная составляющая должна генерироваться фильтром, то сигнал мгновенной активной мощности подвергается фильтрации с целью разделения ее двух компонентов и вычисления значений задания мощностей  $p^*$  и  $q^*$ . Так как переменные составляющие вводятся в сигналы задания преобразователя непосредственно, то не возникает фазового сдвига. Ток задания в системе координат  $\alpha - \beta$  имеет вид:

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Фазные токи в свою очередь определяются выражением 3.9:

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Высшие гармонические составляющие, генерируемые самим АФГ, вносят искажения в напряжение сети. Поэтому токи, рассчитанные по выражению 3.6, не могут обеспечить полной компенсации гармоник. Для того чтобы добиться лучшей компенсации, необходимо получить фазовый

сдвиг и частоту напряжения прямой последовательности без использования прямого измерения. Это реализуется с помощью контура ФАПЧ (phase-locked loop), формирующего сигналы, синхронизированные с фазными составляющими напряжения прямой последовательности, а также определяющего основную гармонику нулевой последовательности. Это обеспечивает определение амплитуды. Идеальные синусоидальные фазные напряжения используются для синхронизации токов фильтра и расчета мгновенных мощностей. Структурная схема управления [51,52] представлена на рис. 3.6. Требуемая активная мощность инвертора  $p^*$  получается из суммы двух составляющих – переменной составляющей действительной части активной мощности  $p_{AC}$  и выходного сигнала регулятора напряжения звена постоянного тока  $p_{cap}$  (мощность, которую должен потреблять инвертор для поддержания уровня напряжения на конденсаторе).

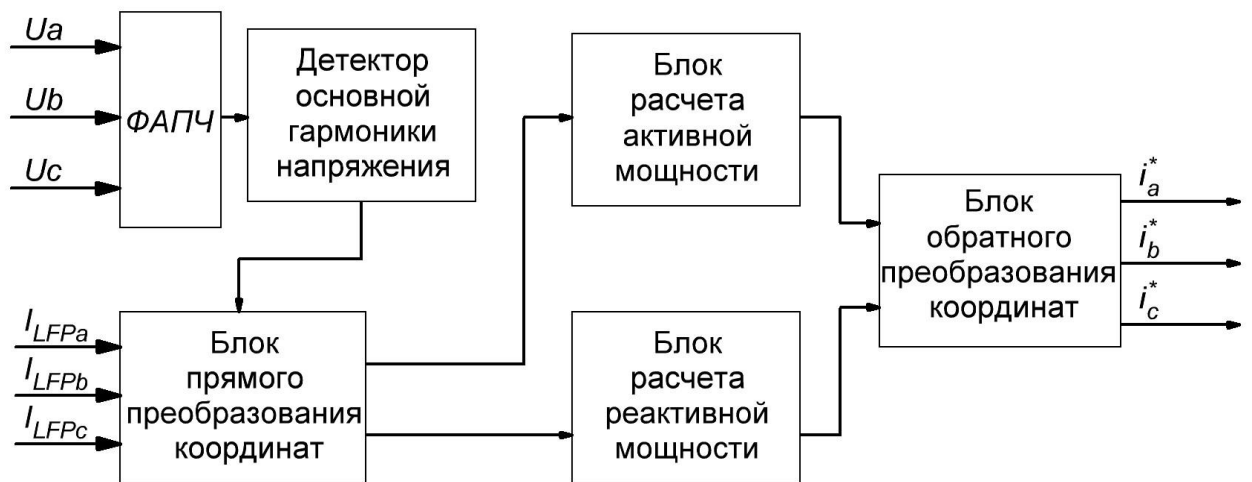


Рис. 3.6. Элемент структурной схемы блока определения промежуточных величин, СУ на основе теории мгновенной мощности

Компенсация реактивной составляющей мощности получается путем сложения средних значений  $q_{DC}$  и  $q_{AC}$ . Затем оцифрованные значения фазных токов инвертора сравниваются с токами задания с помощью компараторов с гистерезисом. Их выходные сигналы и есть сигналы управления ключами инвертора.

4. Система управления АФГ на базе нечеткой логики (метод фаззи-регулирования [53]).

На уровень высших гармоник тока генерируемого в сеть нелинейными электроприемниками, подключенными к общей шине цеховой системы электроснабжения, оказывают влияние множество факторов: токовые всплески, которые могут в несколько раз превышать действующее значение тока при коммутации вентилей АИН преобразователей частоты; различные нестационарные режимы работы нелинейных электроприемников; - отклонение, провалы напряжения и т.д.

Использование в СУ АФГ фаззи-регулятора позволяет учесть большое число выше перечисленных факторов и компенсировать неполноту и неточность исходных данных.

На рис. 3.7 показана схема подключения АФГ с СУ, построенной на базе нечеткой логики, к цеховой системе электроснабжения, характеристикой.

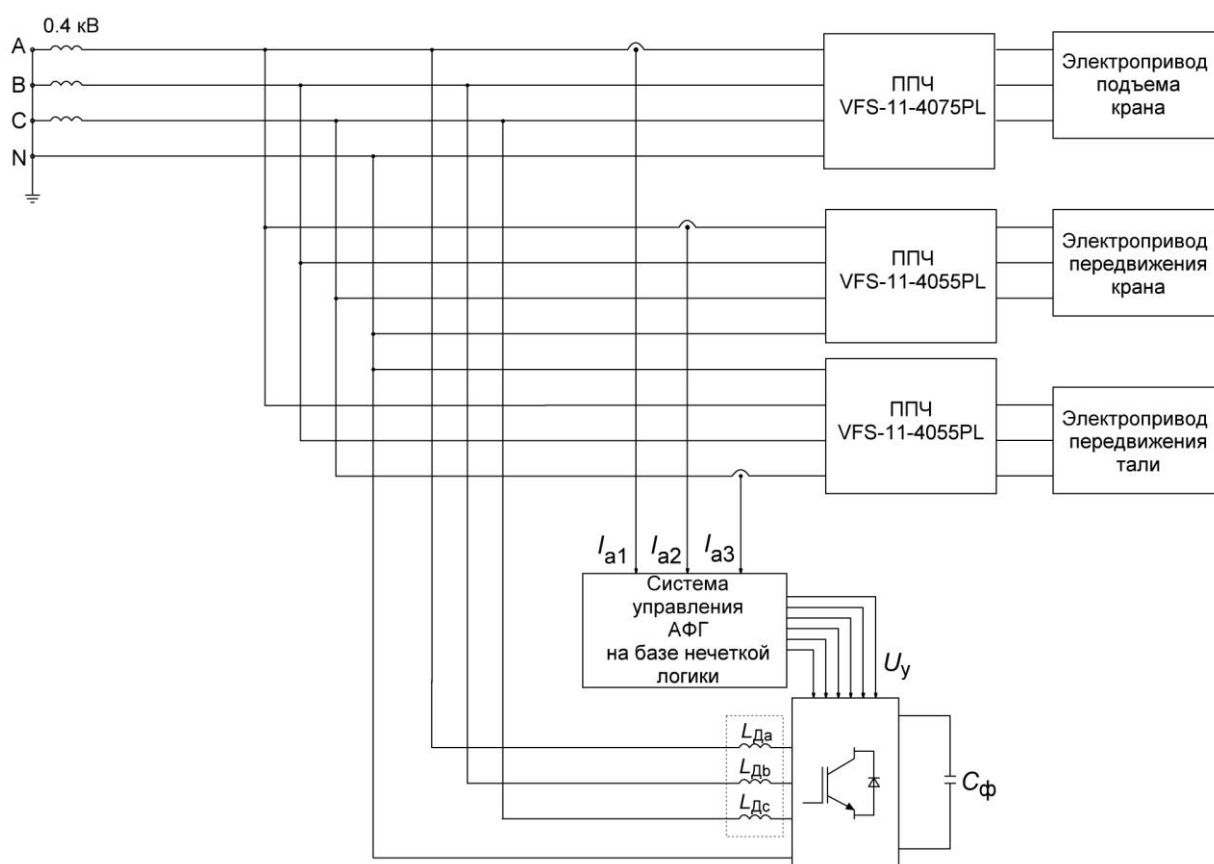


Рис.3.7. Схема подключения активного фильтра с СУ на базе нечеткой логики к цеховой системе электроснабжения мостового крана



### 3.2. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Для работы АФГ в условиях, отягощенных наличием информации о нелинейных электроприемниках в основном качественного характера, хорошо подходят методы нечеткой логики (fuzzy logic) [54,55]. Кроме того, СУ на базе нечеткой логики не требуют знания полной математической модели исследуемой системы, практически не поддаются действию параметрических и структурных возмущений и способны функционировать в широком диапазоне режимов работы системы.

Основным элементом СУ на базе нечеткой логики является фаззи-регулятор. Работа регулятора с нечеткой логикой включает в себя три последовательно выполняющихся этапа: фазификацию (размытие или fuzzification); нечеткий логический вывод (FIS – fuzzy inference system); дефазификацию (defuzzification). Блок-схема нечеткого регулятора приведена на рис. 3.6.

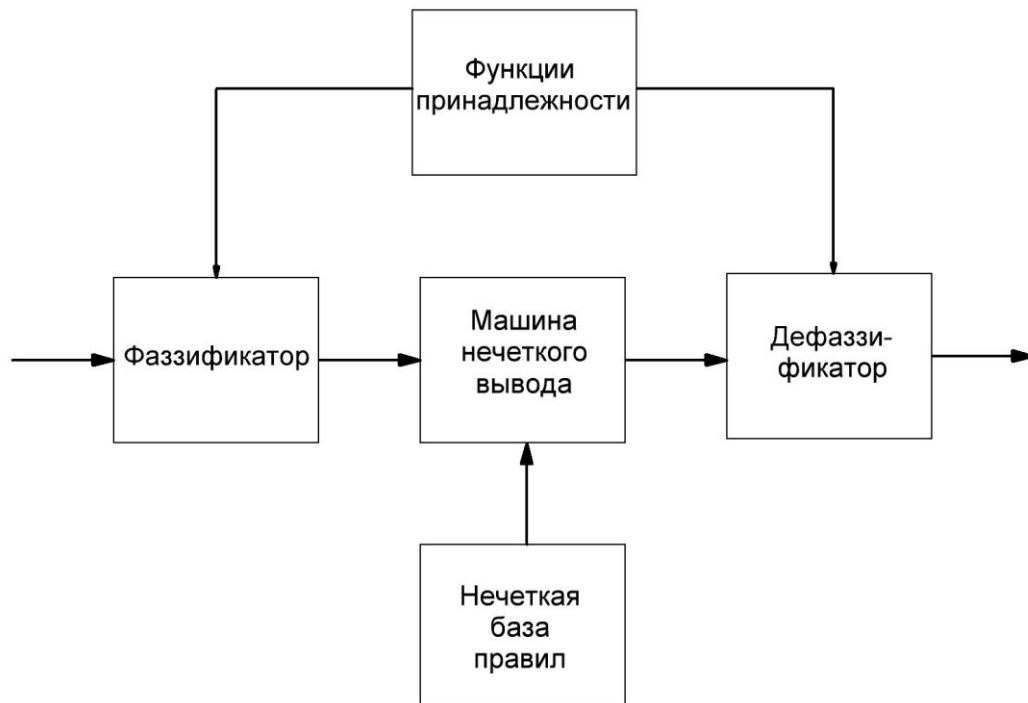


Рис. 3.8. Блок схема фаззи-регулятора на базе нечеткой логики

В основе понятия нечеткой логики лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством,

могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью. В общем случае под нечеткой моделью фаззи-регулятора понимается информационно-логическая модель, построенная на основе теории нечетких множеств и нечеткой логики (нечеткий вывод). При этом нечеткое моделирование может быть представлено выполнением следующих этапов (рис.3.7)[56,57,58,59,60]:

1. Фазификация (приведение к нечеткости). Здесь происходит преобразование четких данных (входных) в нечеткие множества. Т.е. для заданного четкого значения  $x_0$  называется нечеткое значение  $\tilde{x}^0$  с функцией принадлежности (ФП):

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x = x^0 \\ 0, & x \neq x^0. \end{cases} \quad (3.10)$$

2. Агрегирование подусловий в нечетких правилах продукции осуществляется с помощью парных нечетких операций:

- логическая конъюнкция  $T(A \wedge B) = \min\{T(A), T(B)\}$ ;
- логическая дизъюнкция  $T(A \vee B) = \max\{T(A), T(B)\}$ ;
- нечеткая импликация  $T(A \supset B) = \min\{T(A), T(B)\}$ .

3. Активизация подзаключений в нечетких правилах продукции осуществляется согласно 3.11.

$$\mu'(y) = \min[c_i, \mu(y)], \quad (3.11)$$

где  $\mu(y)$  - функция принадлежности терма, который является значением выходной переменной, на заданном универсуме  $Y$ ,  $c_i$  - степень истинности каждого из правил, входящих в рассматриваемую базу правил системы нечеткого вывода.

4. Аккумуляция заключений нечетких правил продукции. Этот процесс осуществляется для объединения нечетких множеств, соответствующих термам подзаключений, относящихся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным, определяются согласно выражения 3.12.

$$\mu_c = \max\{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X . \quad (3.12)$$

5. Дефазификация (приведение к четкости). Применяется для преобразования нечеткого множества к четкому значению  $y^*$ . Применяются следующие методы дефазификации:

- Центр тяжести (*Center-of-Gravity*):

$$y^* = \frac{\min \int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx}; \quad (3.13)$$

где  $x$  - переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной  $\omega$ ;  $\mu(x)$  - функция принадлежности нечеткого множества, соответствующая выходной переменной  $\omega$  после этапа аккумуляции,  $\min$ ,  $\max$  - начало и конец интервала соответственно носителя нечеткого множества рассматриваемой выходной переменной  $\omega$ .

- Первый максимум (*First-of-Maxima*):

$$y^* = \min \left\{ y \mid \mu(y) = \max_{\omega} \mu(\omega) \right\} \quad (3.14)$$

- Средний максимум (*Middle-of-Maxima*):

$$y^* = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j, y_j \in \left\{ y \mid \mu(y) = \max_{\omega} \mu(\omega) \right\} \quad (3.15)$$

где  $N$  – количество с максимальным значением функции принадлежности;

- Высотная дефазификация (*Height Defuzzification*):

$$y^* = \frac{\sum y_i \mu(y_i)}{\sum \mu(y_i)}; \quad (3.16)$$

т.е. производится расчет центра тяжести только для элементов заданного  $\alpha$ -среза  $[B]^\alpha$ .

- Центр тяжести для одноточечных множеств:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n x \cdot \mu(x)}{\sum_{i=1}^n \mu(x)}, \quad (3.17)$$

где  $n$  - число одноточечных множеств, каждое из которых характеризует единственное рассматриваемой входной лингвистической переменной.

- Центр площади:

$$\int_{\min}^U \mu(x) dx = \int_U^{\max} \mu(x) dx, \quad (3.18)$$

где  $U$  определяется согласно выражения 3.16.

Также стоит отметить, что для каждого правила  $R_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ , вычисляется уровень истинности правила [61,62] (рис. 3.9).

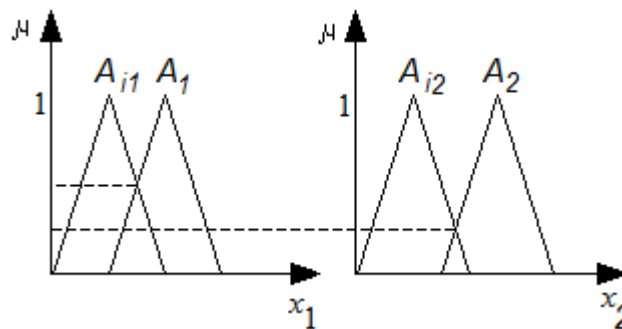


Рис. 3.9. Уровень истинности правила

Под уровнем истинности  $i$ -го правила, понимается вещественное число  $\alpha_i$ , характеризующее степень соответствие входа системы  $A_1, A_2, \dots, A_n$  нечетким множествам  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$  в предпосылке  $i$ -го правила:

$$\alpha_i = \min_{j=1}^n [\max_{x_j} (A_j(x_j) \wedge A_{ij}(x_j))] \quad (3.19)$$

Для системы с несколькими входными переменными лингвистические правила нечеткого вывода примут вид:

$R_1$ : если  $x_1$  есть  $A_{11}$  и  $x_n$  есть  $A_{1n}$ , то  $y$  есть  $B_1$ ;

$R_2$ : если  $x_1$  есть  $A_{21}$  и  $x_n$  есть  $A_{2n}$ , то  $y$  есть  $B_2$ ;

...

$R_m$ : если  $x_1$  есть  $A_{m1}$  и  $x_n$  есть  $A_{mn}$ , то  $y$  есть  $B_m$ .

где  $x_j, j=\overline{1,n}$  - входные лингвистические переменные,  $y$  - выходная лингвистическая переменная;  $A_{ij}$  и  $B_i$  - нечеткие множества. Логическая связка «и» интерпретируется как  $t$ -норма нечетких множеств. В связи с этим применяется механизм логического вывода, характерной чертой которого является использование уровней истинности предпосылок правил (firing levels).

где  $X_i$  - множество определения переменной  $x_i, j=\overline{1,n}$ .

При выборе типа управляющего устройства – контроллера, стоит отметить что выбирается контроллер, в основе которого лежат механизмы нечеткого логического вывода вида «если...то...», т.е. контроллерами на базе нечеткой логики (*Fuzzy Logic Controller, FLC*). В 1975 году был представлен тип контроллера названный «контроллером Мадмани» [63,64,65,66,67], разработанный Мадмани и Ассилианом. Суть его работы состоит в определении изменений управляющих воздействий  $\Delta u[t]=u[t]-u[t-1]$  в зависимости от ошибки  $e[t]$  и ее изменения в текущий момент времени  $\Delta e[t]=e[t]-e[t-1]$ . Тогда закон управления может быть представлен в следующем виде:

$$\Delta u[t]=f(e[t], \Delta e[t]). \quad (3.20)$$

Тогда управляющее воздействие для момента времени  $t$  будет определяться по формуле:

$$u[t]=\Delta u[t]+u[t-1] \quad (3.21)$$

Для определения функции принадлежности в заключениях и предпосылках правил используются безразмерные нормализованные нечеткие множества [68].

С учетом свойств работы системы в динамике и повторно-кратковременных режимов работы кранового электропривода был выбран механизм нечеткого вывода – алгоритм Мамдани (так как он при агрегировании подусловий в нечетких правилах продукции для нахождения истинности условий использует парные операции, те правила, степень истинности которых отлична от нуля, считаются активными). Так же при

использовании алгоритма Мамдани для сокращения времени вывода учитываются только активные правила нечетких продукций. Метод активизации принимается MIN, рассчитываемый по формуле 3.20 [27]:

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}, \quad (3.22)$$

где  $\mu(y)$  - функция принадлежности терма, который является некоторым значением выходной переменной  $\omega_j$ , заданной на универсуме  $Y$ . Для аккумуляции правил используем метод MAX, который чаще всего применяется в схеме нечеткого вывода методом Мамдани [27]. Для механизма дефаззификации используется метод центра тяжести (Center of Gravity) [27].

Для определения терм входных и выходных величин фаззи-регулятора, приняты следующие обозначения каждой лингвистической переменной: «**(L1)** - ток потребления двигателя подъема крана», «**(L2)** - ток потребления двигателя передвижения тали», «**(L3)** - ток потребления двигателя передвижения крана». Выходная переменная нечеткого регулятора – это лингвистический терм «**(L4)** - ток искажения, для формирования сигнала управления АФГ».

Для формирования функций принадлежности был произведен их расчет на основании статистических данных [69], полученных в результате экспериментов (см. таблицы 2.2 – 2.5). Входная величина в блок фаззификации - вектор токов задания для каждого электродвигателя крановых механизмов. Токи задания определяются путем вычитания из потребляемого тока  $i_{Pi}$  тока первой гармоники  $i_{1mi}$  по формуле 3.23:

$$i_{зad i} = i_{Pi} - i_{1mi} \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_{1i}). \quad (3.23)$$

Результаты расчетов для двигателя механизма подъема представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Расчетные значения токов для построения функций принадлежности тока потребления двигателем подъема

№ п.п	Ток потребляемый двигателем подъема $i_{Pi}$ , А	Мгновенное значение тока первой гармоники $i_{1mi}$ , А	Ток задания $i_{задi}$ , А
1	0,5626	0,332	0,2306
2	0,8827	0,52	0,3621
3	1,6	0,9438	0,6562
4	2,8615	1,6874	1,1741
5	4,2486	2,505	1,74332
6	6,7355	4,05548	2,68002
7	10,1745	6,12612	4,04838
8	14,858	8,94608	5,91192
9	18,829	11,33704	7,49196
10	20,331	12,92148	7,40952
11	20,34	12,9272	7,4128
12	20,295	12,8986	7,3964
13	20,259	12,87572	7,38328
14	20,259	12,87572	7,38328
15	19,125	12,87	6,255
16	19,057	12,82424	6,23276
17	19,0825	12,8414	6,2411
18	19,023	12,80136	6,22164
19	19,091	12,84712	6,24388
20	18,989	12,77848	6,21052

По полученным и преобразованным статистическим данным (таблица 3.1) формируется эмпирическая таблица (таблица 3.2). Все значения, которые принимает переменная **L1** развиты на 12 интервалов, шириной в 1.5 А. такое количество интервалов выбирается исходя из попадания экспериментальных данных в каждый из интервалов, а также для получения большего количества точек, для построения функций принадлежности. В каждой из строк, соответствующих принимаемым лингвистическим термам, содержится количество попаданий переменной **L1** в один из интервалов тока. Так образуется матрица  $v_{ij}$ , где  $i = \overline{1,4}$ ,  $j = \overline{1,12}$ .

В последней строке приведен вектор  $v_{\Sigma}$ , содержащий элементы, определяемые согласно 3.24:

$$v_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^4 v_{ij} ; \quad (3.24)$$

В векторе  $v_{\Sigma}$  выбирается максимальный элемент  $v_{\Sigma \max} = \max_j v_{\Sigma j}$ .

Таблица 3.2 Эмпирическая таблица статистических данных в зависимости от различных интервалов значений переменной **L1**

Количество значений переменной <b>L1</b> в соответствующем интервале	Интервал тока, А	Лингвистический терм				Вектор $v_{\Sigma}$
		Очень маленький	Достаточно маленький	Достаточно большой	Очень большой	
	0, 1.5	7	0	0	0	7
	1.5, 3	4	0	0	0	4
	3, 4.5	2	1	0	0	3
	4.5, 6	0	16	0	0	16
	6, 7.5	0	12	0	0	12
	7.5, 9	0	2	0	0	2
	9, 10.5	0	1	12	0	13
	10.5, 12	0	0	14	0	14
	12, 13.5	0	0	21	0	21
	13.5, 15	0	0	17	0	17
	15, 17.5	0	0	11	7	18
	17.5, 19	0	0	0	10	10

Преобразуем элементы таблицы 3.2  $v_{ij}$  согласно выражения 3.25.

$$v_{ij} = \frac{v_{ij} \cdot v_{\Sigma \max}}{v_{\Sigma}} \quad (3.25)$$

Для элементов  $v_{\Sigma j}=0$  рассчитано линейное приближение:

$$v_{ij} = \frac{v_{ij-1} + v_{ij+1}}{2}; i = \overline{1,4}, j = \overline{1,12} \quad (3.26)$$

Преобразованная эмпирическая таблица для переменной **L1** согласно выражений 3.25 и 3.26 примет вид (таблица 3.3).

Значения функций принадлежности определяются согласно выражения 3.25.

$$\mu_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_{i \max}} \quad (3.27)$$



Полученные значения функции принадлежности **L1** для каждой термы приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 Преобразованная эмпирическая таблица функций принадлежности для переменной **L1**

Промежуточные значения переменной <b>L1</b>	Интервал тока, А	Лингвистический терм			
		Очень маленький	Достаточно маленький	Достаточно большой	Очень большой
	0, 1.5	21	0	0	0
	1.5, 3	21	0	0	0
	3, 4.5	14	7	0	0
	4.5, 6	0	21	0	0
	6, 7.5	0	21	0	0
	7.5, 9	0	21	0	0
	9,10.5	0	1,62	19,38	0
	10.5, 12	0	0	21	0
	12, 13.5	0	0	21	0
	13.5, 15	0	0	21	0
	15, 17.5	0	0	12,83	8,16
	17.5, 19	0	0	0	21
Максимальный элемент в строке $V_{i\max}$		21	21	21	21

Таблица 3.4 Эмпирическая таблица значений функции принадлежности для переменной **L1**

Значения функции принадлежности переменной <b>L1</b>	Интервал тока, А	Лингвистический терм			
		Очень маленький	Достаточно маленький	Достаточно большой	Очень большой
	0, 1.5	1	0	0	0
	1.5, 3	1	0	0	0
	3, 4.5	0,67	0,33	0	0
	4.5, 6	0	1	0	0
	6, 7.5	0	1	0	0
	7.5, 9	0	1	0	0
	9,10.5	0	0,077	0,92	0
	10.5, 12	0	0	1	0
	12, 13.5	0	0	1	0
	13.5, 15	0	0	1	0
	15, 17.5	0	0	0,67	0,38
	17.5, 19	0	0	0	1

График функции принадлежности значений лингвистической переменной **L1**, представлен на рис. 3.10. Как следует из графика целесообразно использовать ФП в виде трапеций.

Аналогично определены области значений для оставшихся лингвистических переменных и построены их графики (рис.3.11, 3.12).

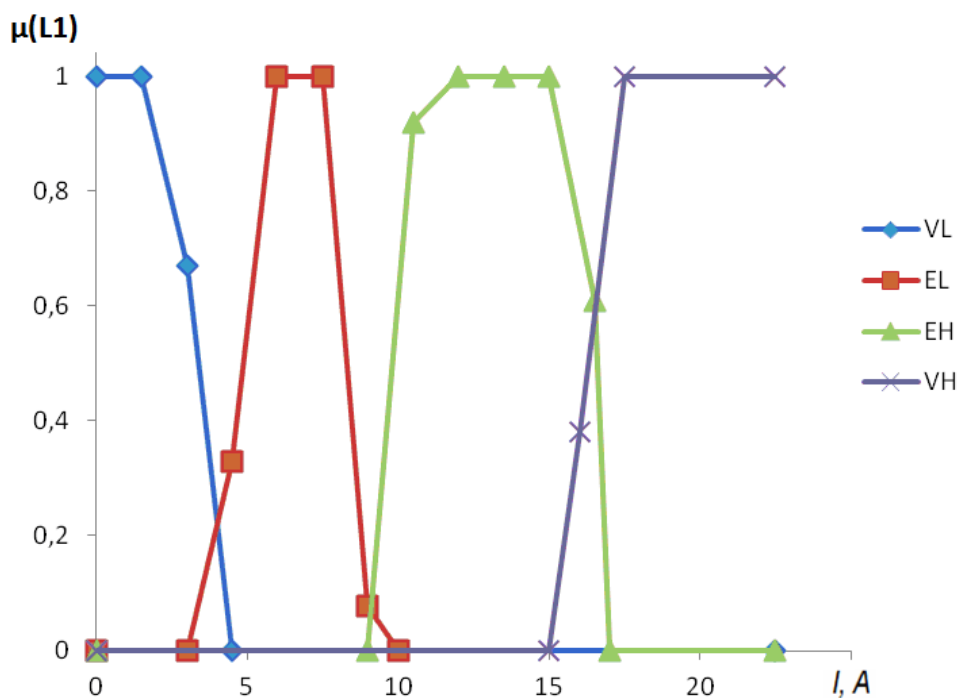


Рис. 3.10. График ФП значений лингвистической переменной **L1**

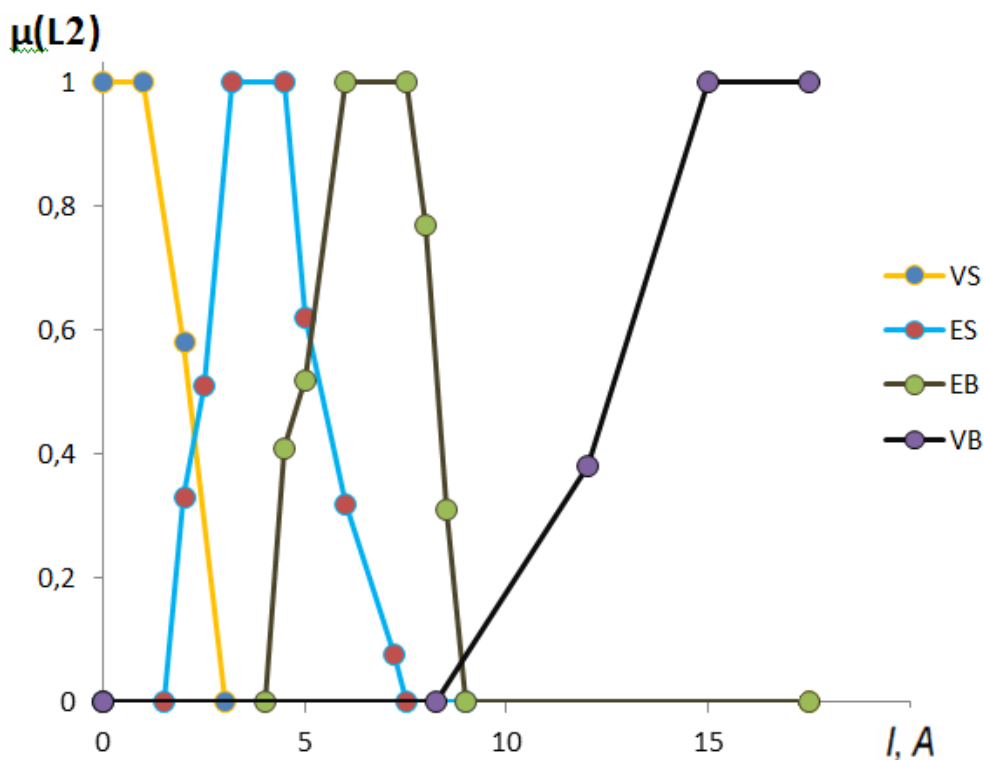


Рис. 3.11. График ФП значений лингвистической переменной **L2**

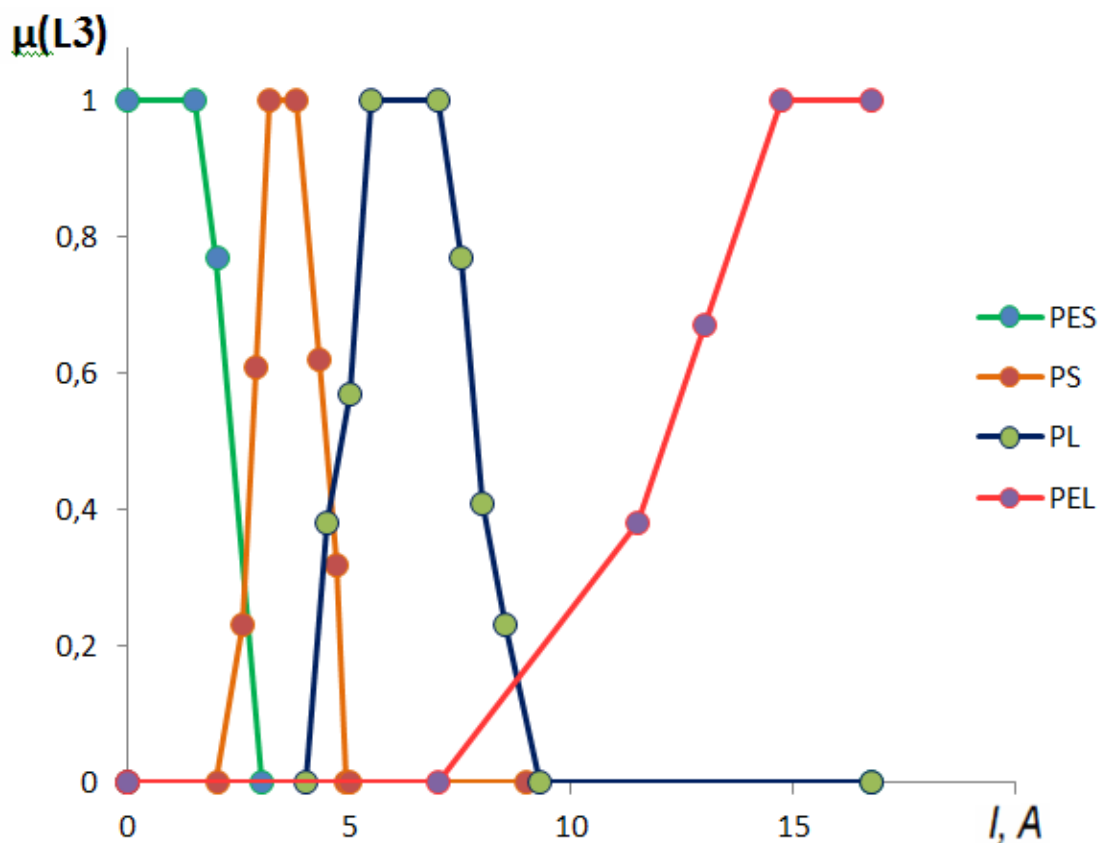


Рис. 3.12. График ФП значений лингвистической переменной L3

Для построения системы нечеткого вывода фаззи-регулятора СУ АФГ применена программа Fuzzy Logic Toolbox, входящая в пакет Matlab Simulink. Графики функций принадлежности лингвистических переменных сглажены и представлены в виде трапеций.

### 3.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Процесс разработки системы нечеткого вывода в среде Matlab Simulink в пакете Fuzzy Logic Toolbox [70,71,72] состоит из выполнения следующей последовательности действий:

- вызывается редактор системы нечеткого вывода FIS;
- в разрабатываемую систему добавляется три переменных (L1, L2, L3);
- вводятся имена переменных;
- вводится имя системы нечеткого вывода (SUAF);
- определение терм и их функций принадлежности (таблицы 3.5 – 3,8 и рис. 3.13 – 3.16)
- определение правил нечеткого вывода для разработанной системы;
- получение поверхности нечеткого вывода;
- получение результата нечеткого вывода для конкретных значений входных переменных

Для системы нечеткого вывода, на основании расчета, приведенного в п. 3.2 входное пространство разбивается на трапециевидные термы. Область значений лингвистической переменной **L1** будет находится в пределах [0; 22.5] А, в частности ее величины отклонения по току представлены четырьмя лингвистическими термами (функциями принадлежности) – таблица 3.5.

Таблица 3.5. Обозначения и диапазон изменения термов переменной **L1**

Символическое обозначение	Англоязычное название	Русскоязычное название	Диапазон изменения терм
VL	Very low	<i>очень маленький</i>	[0; 0; 4]
EL	Easy low	<i>достаточно маленький</i>	[3; 5; 7; 10]
EH	Easy high	<i>достаточно большой</i>	[9; 11; 14; 16]
VH	Very high	<i>очень большой</i>	[15; 22; 22.5]

где [a; b; c; d], координаты a – начала интервала, b – первой вершины, c – второй вершины d – конца интервала (для начальной и конечной терм, координаты первой и последней вершины соответственно равны координатам начала и конца интервалов)

Графики функции принадлежности (термы), для входной переменной – ток потребляемый системой ППЧ-АД, двигателя подъема крана представлены на рис. 3.13:

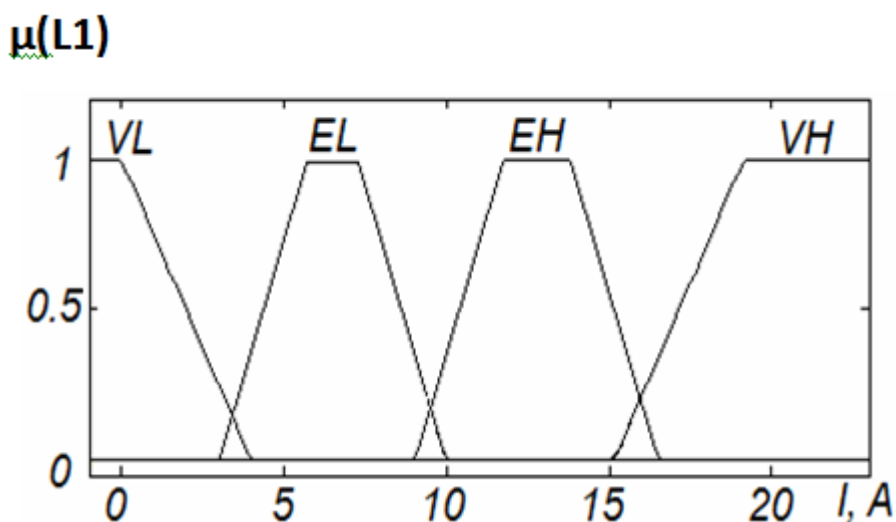


Рис. 3.13. Термы для двигателя подъема крана

Область значений лингвистической переменной **L2** будет находится в интервале [0; 17.5] А, величины отклонения по току представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Обозначения и диапазон изменения термов переменной **L2**

Символическое обозначение	Англоязычное название	Русскоязычное название	Диапазон изменения терм
PES	Positive extremely small	<i>положительно очень маленькое</i>	[0; 0; 3]
PS	Positive small	<i>положительное маленькое</i>	[1; 3; 5; 6]
PL	Positive large	<i>положительное большое</i>	[4; 5; 8; 9]
PEL	Positive extremely large	<i>положительное очень большое</i>	[7; 15; 17.5]

Графики функции принадлежности (термы), для входной переменной – ток потребляемый системой ППЧ-АД, двигателя передвижения крана представлены на рис. 3.14:

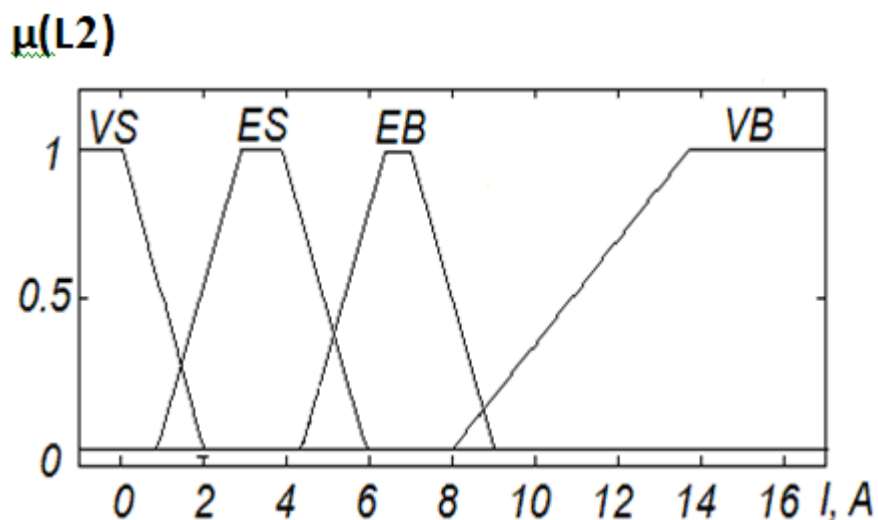


Рис. 3.14. Термы для двигателя передвижения крана

Область значений лингвистической переменной  $L_3$  будет находится в интервале  $[0; 13.75]$  А, величины отклонения по току представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Обозначения и диапазон изменения термов переменной  $L_3$

Символическое обозначение	Англоязычное название	Русскоязычное название	Диапазон изменения терм
VS	Very small	<i>очень маленькое</i>	$[0; 0; 3]$
ES	Easy small	<i>маленькое</i>	$[2; 3,2; 3.8; 5]$
EB	Easy big	<i>большое</i>	$[4; 5.5; 7.5; 9]$
VB	Very big	<i>очень большое</i>	$[7; 14.75; 16.5]$

Графики функции принадлежности (термы), для входной переменной – ток потребляемый системой ППЧ-АД, двигателя передвижения тали представлены на рис. 3.15:

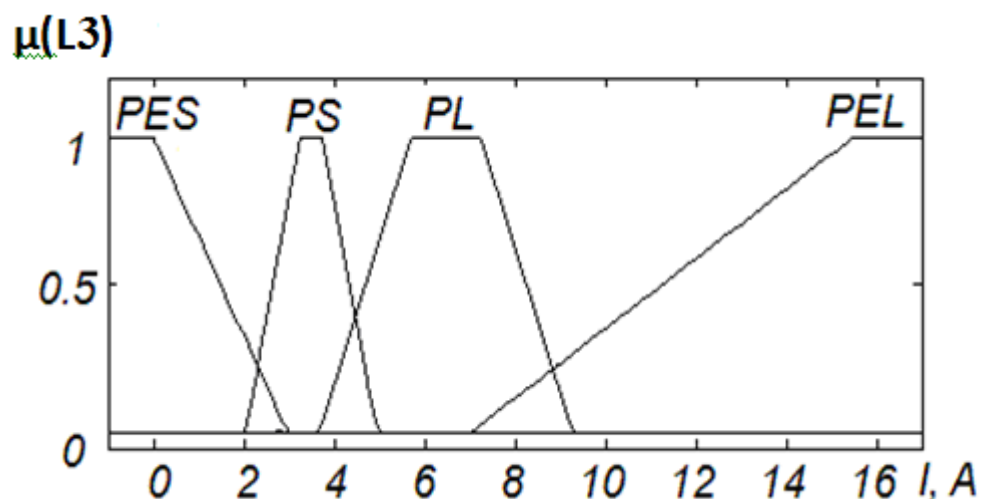


Рис. 3.15. Термы для двигателя передвижения тали

Выходная величина фаззи - регулятора - это сигнал, для формирования задающего напряжения ШИМ управления ключами инвертора АФГ. Диапазон изменения управляющего сигнала, исходя из условий формирования, будет находится в интервале [0; 32,5]. Область значений лингвистической переменной **L4** представлена в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Обозначения и диапазон изменения термов переменной **L4**

Символическое обозначение	Англоязычное название	Русскоязычное название	Диапазон изменения терм
Е	Easy	<i>близкий к нулю</i>	[0; 0; 5]
LM	Low much	<i>достаточно малый положительный</i>	[4; 7; 11; 14]
EM	Easy much	<i>достаточно большой положительный</i>	[10; 13.5; 16.5; 20]
MM	Many much	<i>очень большой положительный</i>	[19.5; 30; 32.5]

Тогда графики функции принадлежности (термы), для выходной переменной – сигнал для формирования задания управления инвертором представлены на рис. 3.16:

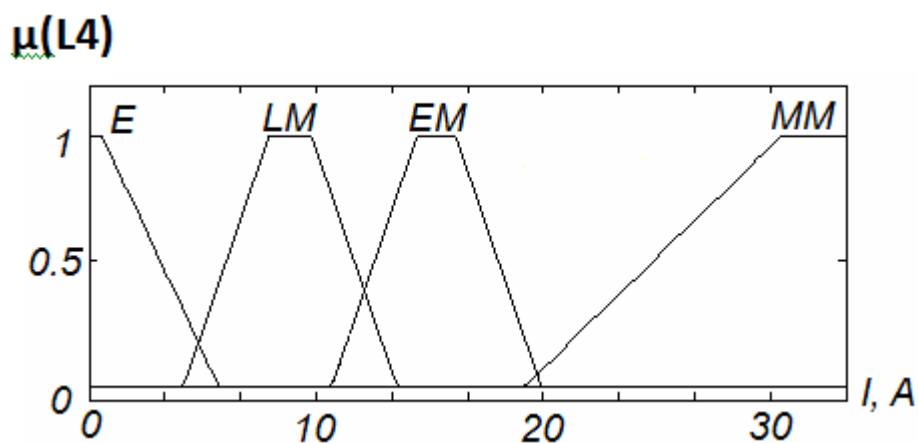


Рис. 3.16. Термы сигнала управления для блока управления инвертором

Формируем базу правил нечеткого вывода, которая включает в себя 65 правил нечеткой продукции. В качестве примера приведем 10 из них:

*Правило 1: ЕСЛИ L1 есть VL И L2 есть VS И L3 есть PES ТО L4 это MM*

*Правило 2: ЕСЛИ L1 есть EL И L2 есть ES И L3 есть PS ТО L4 это EM*

*Правило 3: ЕСЛИ L1 есть EH И L2 есть EB И L3 есть PL ТО L4 это LM*

*Правило 4: ЕСЛИ L1 есть VH И L2 есть VB И L3 есть PEL ТО L4 это E*

*Правило 5: ЕСЛИ L1 есть VL И L2 есть VS И L3 есть PS ТО L4 это MM*

*Правило 6: ЕСЛИ L1 есть EL И L2 есть VS И L3 есть PES ТО L4 это MM*

*Правило 7: ЕСЛИ L1 есть EH И L2 есть VS И L3 есть PES ТО L4 это EM*

*Правило 8: ЕСЛИ L1 есть VL И L2 есть ES И L3 есть PS ТО L4 это EM*

*Правило 9: ЕСЛИ L1 есть EH И L2 есть ES И L3 есть PS ТО L4 это EM*

*Правило 10: ЕСЛИ L1 есть VH И L2 есть ES И L3 есть PS ТО L4 это LM*

Каждое из правил нечеткого вывода может быть объяснено на естественном языке, на пример для следующего правила:

**ЕСЛИ L1 есть VH И L2 есть VS И L3 VL есть PES ТО L4 LM.**

Если L1 - функция принадлежности входной переменной ток двигателя подъема крана «большая положительная» (VH) и L2 - функция принадлежности входной переменной ток двигателя передвижения тали «малая положительная» (VS), и L3 - функция принадлежности входной переменной ток двигателя передвижения крана «положительная очень маленькая» (VL), то L4 - значение сигнала для формирования амплитуды



тока компенсации в систему управления инвертором АФГ «достаточно малая положительная» (LM).

Функционально в пакете Matlab Simulink редактор задания правил нечеткой продукции выглядит следующим образом (рис. 3.17).

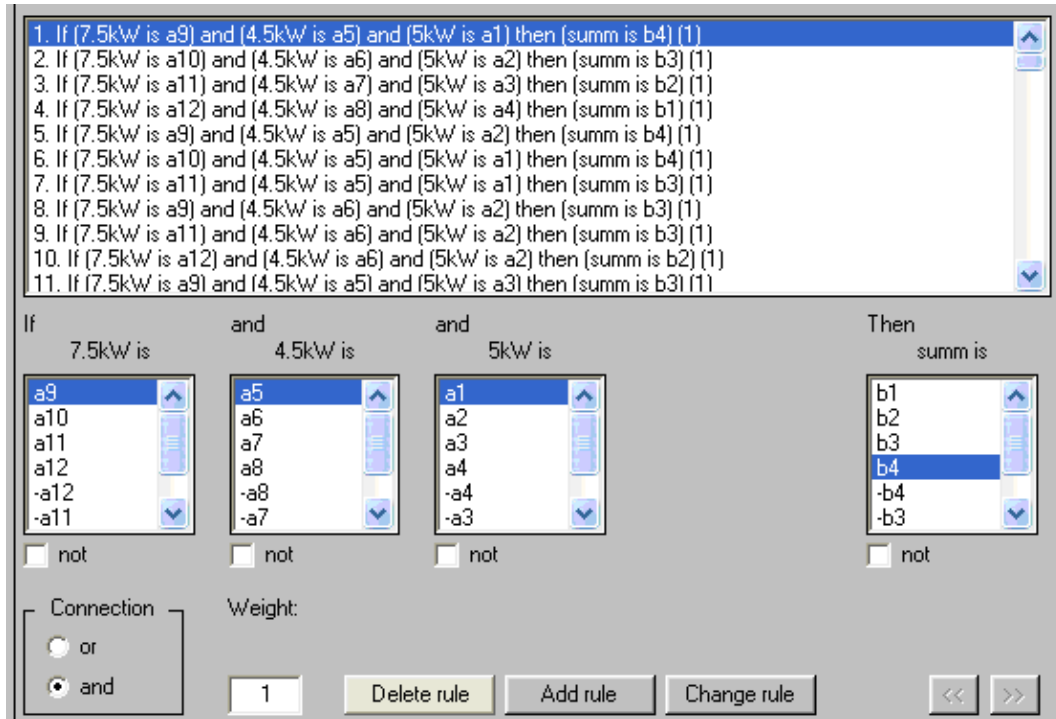


Рис. 3.17. Редактор задания правил нечеткой продукции

Тогда с учетом базы правил нечеткого вывода поверхность нечеткого вывода будет иметь вид (рис. 3.18 – рис. 3.20):

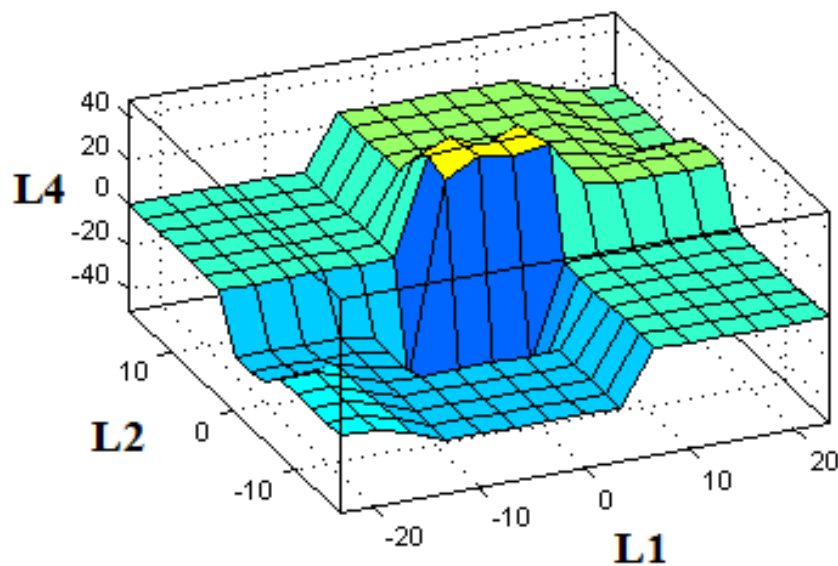


Рис. 3.18 Поверхность нечеткого вывода в системе координат относительно лингвистических переменных L1, L2 и L4

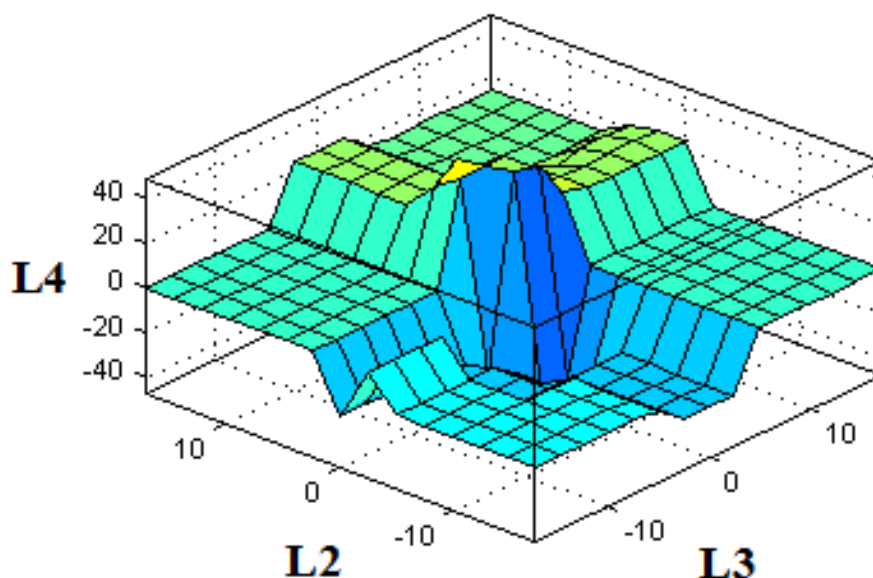


Рис. 3.19 Поверхность нечеткого вывода в системе координат относительно лингвистических переменных **L2**, **L3** и **L4**

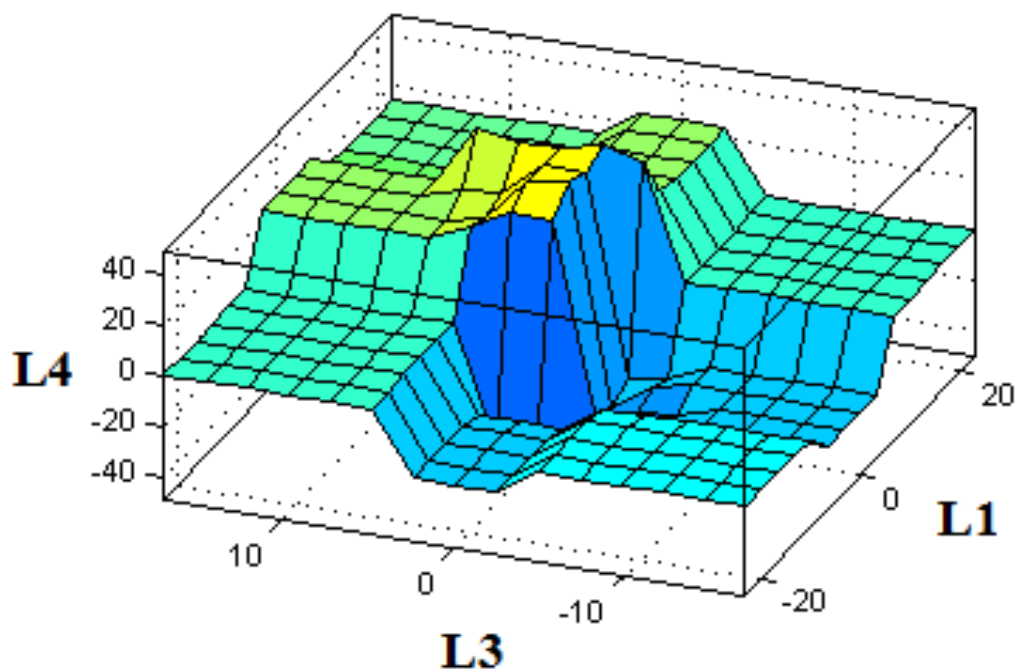


Рис. 3.20 Поверхность нечеткого вывода в системе координат относительно лингвистических переменных **L1**, **L3** и **L4**

Визуально определение критерия истинности каждого правила для каждой входной лингвистической переменной, а также выходная величина регулятора приведены на рис. 3.21.

Как видно из рис. 3.21 при значениях входных переменных  $L1 = 9,42$  А,  $L2 = 15,6$  А, и  $L3 = 14,3$  А, выходная величина регулятора  $L4 = 6,96$  А.

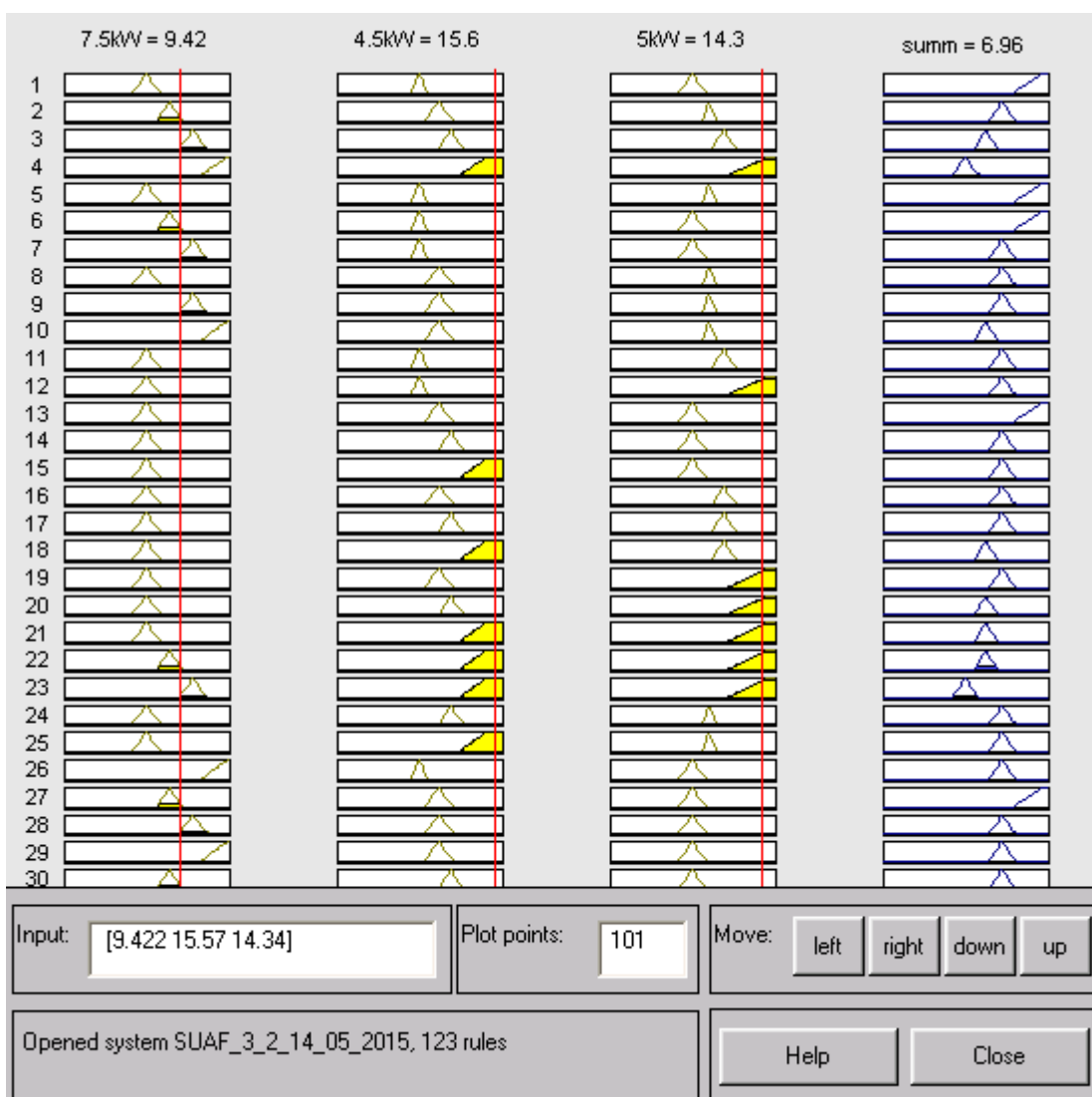


Рис. 3.21. Окно просмотра выбора правил нечеткого регулятора в режиме реального времени

Следует отметить, что предложенная методика построения системы управления АФГ на базе нечеткой логики (фаззи-регулятора), позволяет получать задающие токи на выходе регулятора. Дальнейшее преобразование их в напряжения задания и сравнение с опорным током в системе ШИМ позволяет управлять ключами инвертора АФГ для формирования выходного тока фильтра в соответствие тока искажения.

На основании полученной поверхности нечеткого вывода и базы правил для управления фаззи-регулятором, необходимо произвести моделирование

работы системы с активным фильтром гармоник на базе нечеткой логики, для подтверждения правильности выбора такой системы управления.

**Выводы:**

1. Произведен сравнительный анализ существующих СУ АФГ, на основании которого выявлено, что применение стандартных СУ не позволяет эффективно решать проблему ЭМС при подключении к узлу нагрузки нескольких электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками с различными режимами работы.

2. Обосновано применение АФГ для компенсации высших гармонических составляющих тока напряжения в цеховой системе электроснабжения с подключением электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками с СУ, построенной на базе нечеткой логики как технического решения, для обеспечения нормируемого уровня ЭМС.

3. Обосновано применение фаззи-регулятора в СУ АФГ. При этом сформированы термы вектора входных лингвистических переменных и выходной лингвистической переменной на основании математической статистики экспериментальных данных. Составлена база правил нечеткой продукции для получения выходного тока АФГ.

4. Реализация нечеткого регулятора (фаззи-регулятор) в пакете Fuzzy Logic Toolbox показала работоспособность регулятора, и позволила построить поверхность нечеткого вывода, для областей изменения входных переменных – токи, потребляемые электродвигателями крановых механизмов и выходной переменной – сигнал управления инвертором АФГ для компенсации тока искажения на входе согласующего трансформатора.

## 4. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕХОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ ГАРМОНИК

### 4.1. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ГАРМОНИК

Основным параметром активного фильтра, является емкостной накопительный элемент, который определяет значение генерируемого в сеть компенсационного тока. Для определения и выбора емкостного элемента АФГ необходимо определить полную мощность искажения. Расчет производится в следующей последовательности:

1. Так как цеховая система электроснабжения нелинейных электроприемников мостового крана включает в себя три преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем, для каждого из электроприводов, напряжение на обкладках конденсатора [73] может быть рассчитано по выражению 4.1:

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{\phi}. \quad (4.1)$$

2. Далее необходимо определить мощность искажения АФГ. Для этого были определены составляющие коэффициента мощности согласно выражения 4.2. [74]:

$$\lambda = \cos(\varphi) \cdot \frac{U_{do}}{U_m} = \cos(\varphi_1) \cdot \frac{U_{do}}{1.05 \cdot U_{do}}, \quad (4.2)$$

где  $U_m = 1.05 \cdot U_{do}$  – максимальное фазное напряжение.

3. Мощность в цепи постоянного тока для неуправляемого выпрямителя  $\alpha = 0$  [74], определяется согласно выражения 4.3:

$$P_{do} = U_{do} \cdot I_{do}, \quad (4.3)$$

где  $I_{do}$  – максимальное значение выпрямленного тока.

4. Активная мощность преобразователя определяется согласно выражения 4.6 [74]:

$$P = P_{do} \cdot \cos(\varphi). \quad (4.4)$$

5. Реактивная мощность определяется согласно выражения 4.5 [74]:

$$Q = P_{do} \cdot \sin(\varphi). \quad (4.5)$$

6. Полная мощность преобразователя определяется из выражения 4.6:

$$S = \frac{P}{\lambda}. \quad (4.6)$$

7. Мощность искажения согласно выражения 4.7 равна [74]:

$$T_u = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (4.7)$$

Мощность искажения  $T_u$  компенсируется током АФГ, поэтому энергия, которую отдает конденсатор за интервал  $T/12$  за счет изменения напряжения  $\Delta U_{dc}$  (напряжение на конденсаторе АФГ), где  $T$  – период сетевого напряжения ( $T=1/v$ ,  $v$  – частота сети), должна быть не меньше энергии искажения на этом периоде [75].

Изменение напряжения на конденсаторе  $\Delta U_{dc}$  принимается равным 20% от значения напряжения на конденсаторе  $U_{dc}$ .

8. Следовательно, емкость конденсатора на стороне постоянного тока (выпрямленного) может быть рассчитана по выражению 4.8

$$C = \frac{1}{6} \frac{T_u \cdot T}{\Delta U_{dc} [2U_{dc} + \Delta U_{dc}]}. \quad (4.8)$$

Для выбора АФГ необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} S_{АФГ} \geq T_u; \\ I_{АФГ} \geq I_{иск} \end{cases}; \quad (4.9)$$

– мощность активного фильтра определится по формуле 4.10

$$S_{АФГ} = T_u + Q; \quad (4.10)$$

– ток искажения определяется по выражению 4.11 [76]:

$$I_{иск} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{(1)}^2}, \quad (4.11)$$

где  $I_{max}$  – полный максимальный ток нагрузки,  $I_{(1)}$  – ток первой гармоники.

Результаты расчетов для выбора устанавливаемого активного фильтра, представленные в таблице 4.1:

Таблица 4.1. Расчетные параметры устанавливаемого АФГ

<i>Наименование величины</i>	<i>Значение</i>
Мощность искажения $T_u$ , квар	10,226
Напряжение на конденсаторе $U_{dc}$ , В	514,6
Емкость АФГ $C$ , Ф	$2,89 \cdot 10^{-5}$
Полная мощность АФГ $S_{АФГ}$ , кВА	28,893
Ток искажения $I_{иск}$ , А	87,3

Таким образом, на основании условия (4.8) к установке принимается АФГ MaxSine фирмы Nokian Capacitors [77] рис. 4.1, с техническими характеристиками (таблица 4.2).



Рис. 4.1. Внешний вид АФГ

Как следует из рис.4.1 все элементы активного фильтра размещены в металлическом корпусе специальной конструкции, соответствующей стандартам. Предусмотрена воздушная система охлаждения. Поэтому установка активного фильтра в цеховой системе электроснабжения не представляет особых трудностей.

Таблица 4.2. Технические характеристики АФГ MaxSine 100A-3L

<i>Наименование параметра</i>	<i>Значение</i>
Номинальная полная мощность, кВА	70
Фазный ток, А	100
Частота	50/60 Гц $\pm 2\%$
Гистерезис тока	10% от среднеквадратичного значение номинального тока
Перегрузочная способность	$1,2 \times I_{\text{ср.кв.}}$ (динамич.)
Частота переключения	10 кГц
Время отклика	Менее 1мс, сверхбыстрый режим
Коэффициент СТ	100-3000/1А класс 0,5 треб.
Рассеиваемая мощность	Менее 3% номинальной мощности устройства
Уровень шума	Менее 60 дБ
Температура окружающей среды	$0^{\circ} \div 40^{\circ}\text{C}$
Соответствие стандартам ЭМИ	EN 61000-6-2 / EN 50081-2



## 4.2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕХОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ АФГ

С учетом параметров выбранного АФГ было произведено моделирование работы кранового электропривода с различными СУ. Для сравнения СУ АФГ рассмотрены СУ стандартная, построенной на теории мгновенной мощности и на базе нечеткой логики.

Имитационная модель реальной системы электропривода мостового однобалочного электрического крана с активным фильтром гармоник представлена на рис. 4.2. Модель включает:

- векторную систему регулирования скорости;
- анализатор гармоник (Workspace);
- измерители напряжения и тока (Three Phase V-I Measurements);
- трехфазное устройство включения и выключения переменного тока (Three-Phase Breaker);
- трехфазный источник переменного тока (3-Phase Sources);
- Three-phase Reduce Transformer – понижающие трансформаторы;
- Three-phase Matching Transformer – согласующий трансформатор,
- Active Filter - активный фильтр гармоник;
- полупроводниковые преобразователи частоты, состоящие из выпрямителя с промежуточным звеном постоянного тока (Universal Bridge and Intermediate link DC) и инвертора (Rectifier);
- асинхронных электродвигателей (Induction motor);
- блок Powergui, установлен для исследования спектрального состава напряжений и токов нагрузки в различных точках схемы электроснабжения.

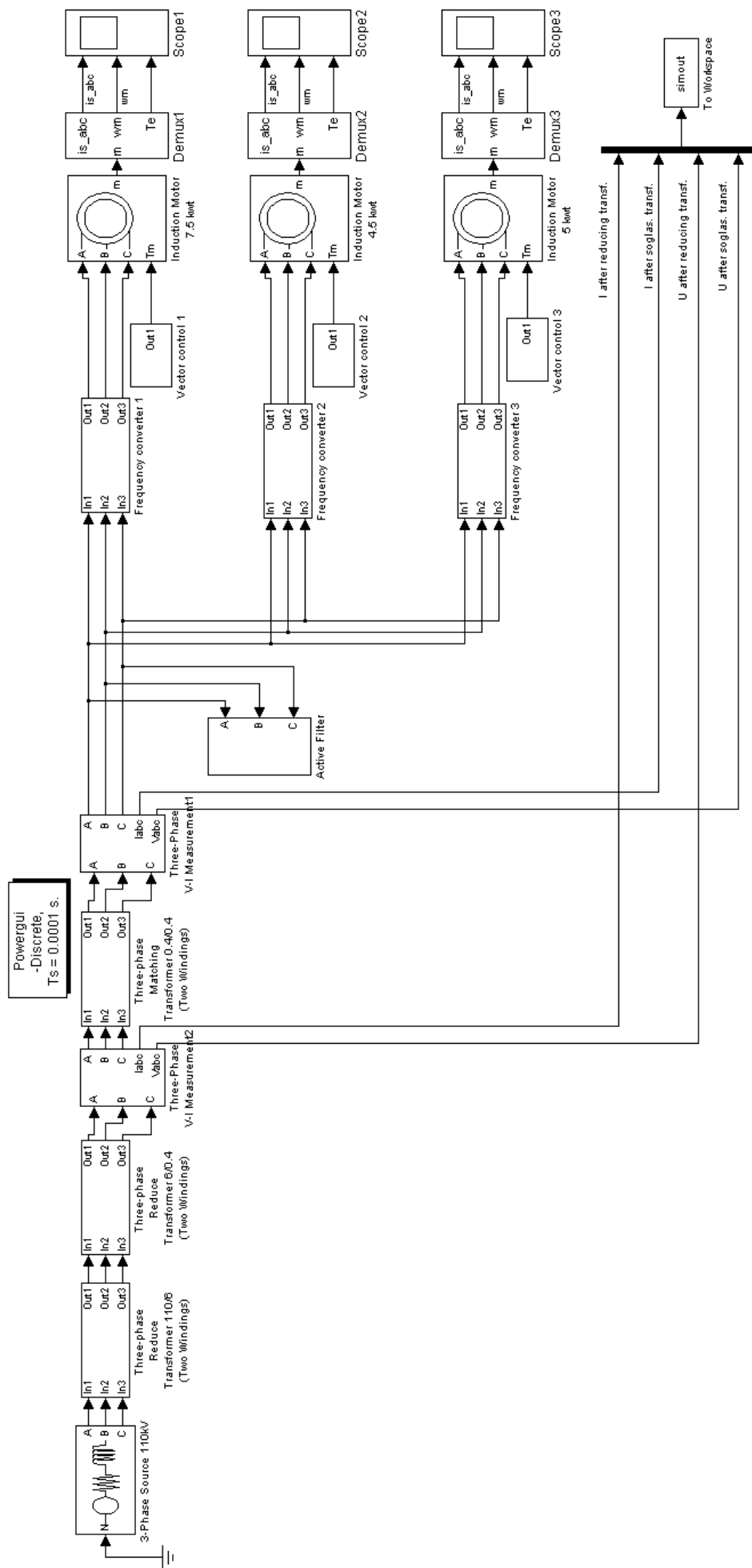


Рис. 4.2. Имитационная модель реальной системы электропривода мостового однобалочного электрического крана с активным фильтром гармоник

Имитационная модель СУ АФГ, построенная по принципу мгновенной мощности, представлена на рис 4.3:

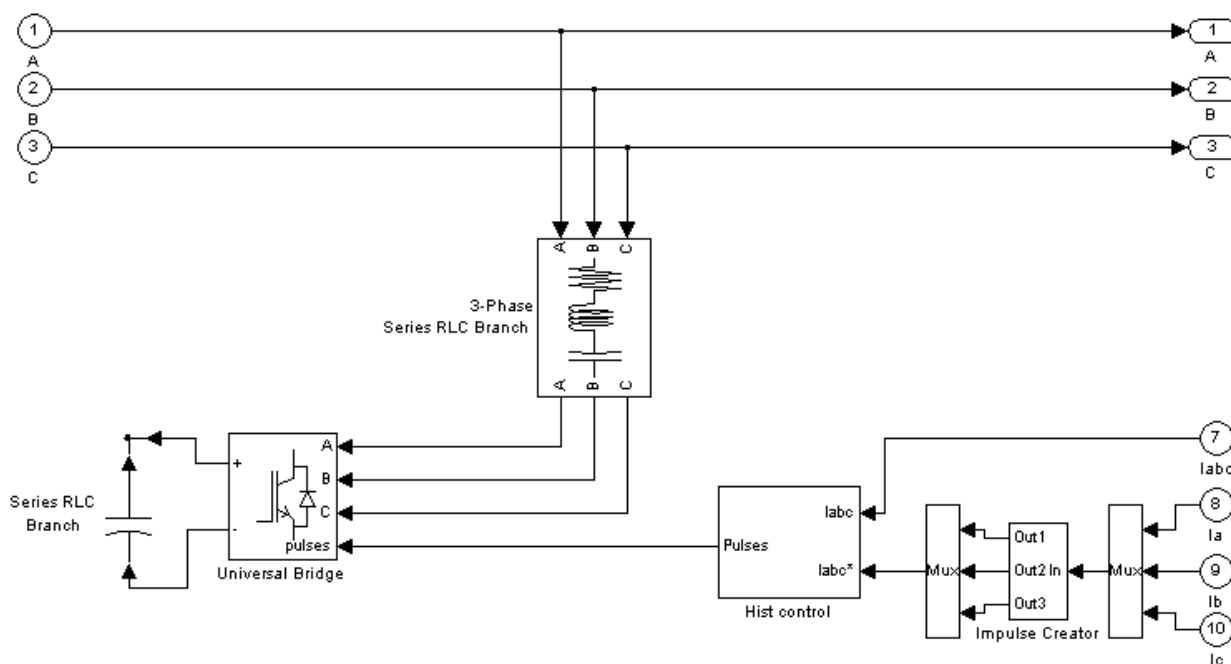


Рис. 4.3. СУ АФГ, построенной с применением теории мгновенной мощности.

В состав СУ АФГ, построенной с применением теории мгновенной мощности, входят следующие элементы:

- инвертор, построенный на IGBT – транзисторах (Universal Bridge) [78];
- емкостной накопитель (Series RLC Branch, где  $C > 0$ );
- индуктивная составляющая на входе инвертора (Series RLC Branch, где  $L > 0$ );
- блок сравнения величин токов (Hist control);
- блок мультиплексора (Mux);
- блок выделения тока компенсации (Impulse creator).

Для построения такой системы управления необходимо подключение трех датчиков тока 8, 9, 10 на каждую фазу общей секции шин (см. рис. 4.3) и одного датчика тока 7 в промежуточном звене постоянного тока. Далее в блоке Impulse Creator (рис. 4.4) происходит выделение текущего значения тока компенсации, путем дискретного преобразования в ряд Фурье значений

каждого тока нагрузки и наложение каждого сигнала на синусоиду для получения общего тока искажения (тока компенсации). Затем происходит сравнение двух входных величин в блоке Hist Control – полученного значения компенсирующего тока фильтра с текущим значением тока на общей секции шин. Далее выделяется необходимая величина тока компенсации (рис. 4.5), являющаяся управляющим воздействием на релейный регулятор, реализующий управление ключами инвертора для компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений (блок Hist Control).

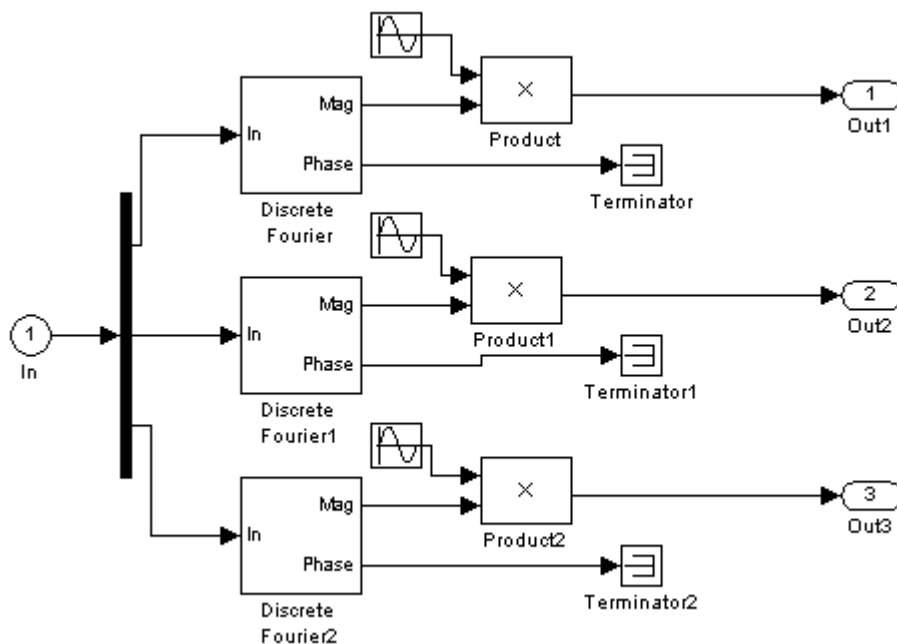


Рис. 4.4. Блок выделения тока компенсации Impulse Creator

Блок Impulse Creator состоит из следующих элементов:

- блок дискретного преобразования тока нагрузки в ряд Фурье (Discrete Fourier)
- источник синусоидального сигнала (Sine wave);
- блок вычисления произведения значений текущих сигналов (Product);
- концевой приемник (Terminator).

Блок Hist Control (рис. 4.4) состоит из следующих элементов:

- блок вычисления суммы текущих значений сигналов (Sum);
- блок, реализующий релейную нелинейность (Relay), включает в себя следующие параметры:

- Switch on point - Порог включения. Значение, при котором происходит включение реле.
- Switch off point - Порог выключения. Значение, при котором происходит выключение реле.
- Output when on - Величина выходного сигнала во включенном состоянии.
- Output when off - Величина выходного сигнала в выключенном состоянии.

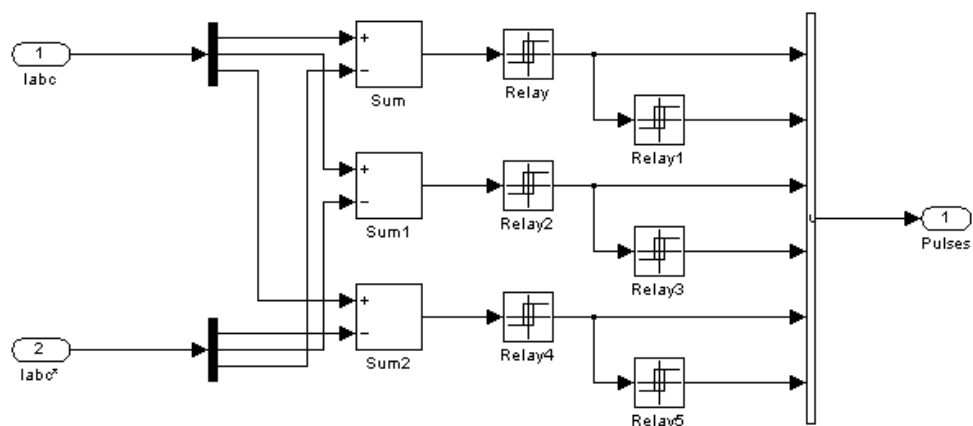
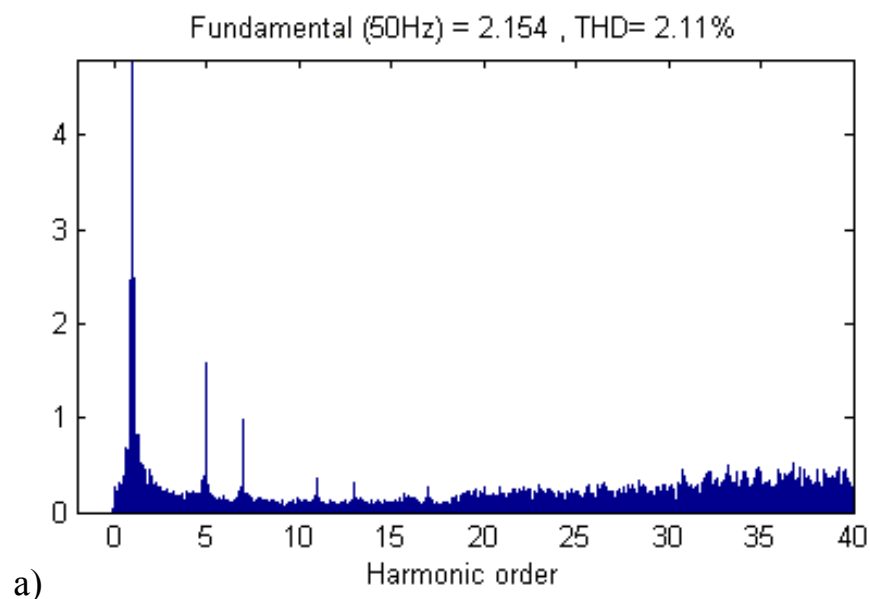


Рис. 4.5. Блок управления инвертором Hist Control

Результаты моделирования в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд, представлены на рис. 4.6 а – г:



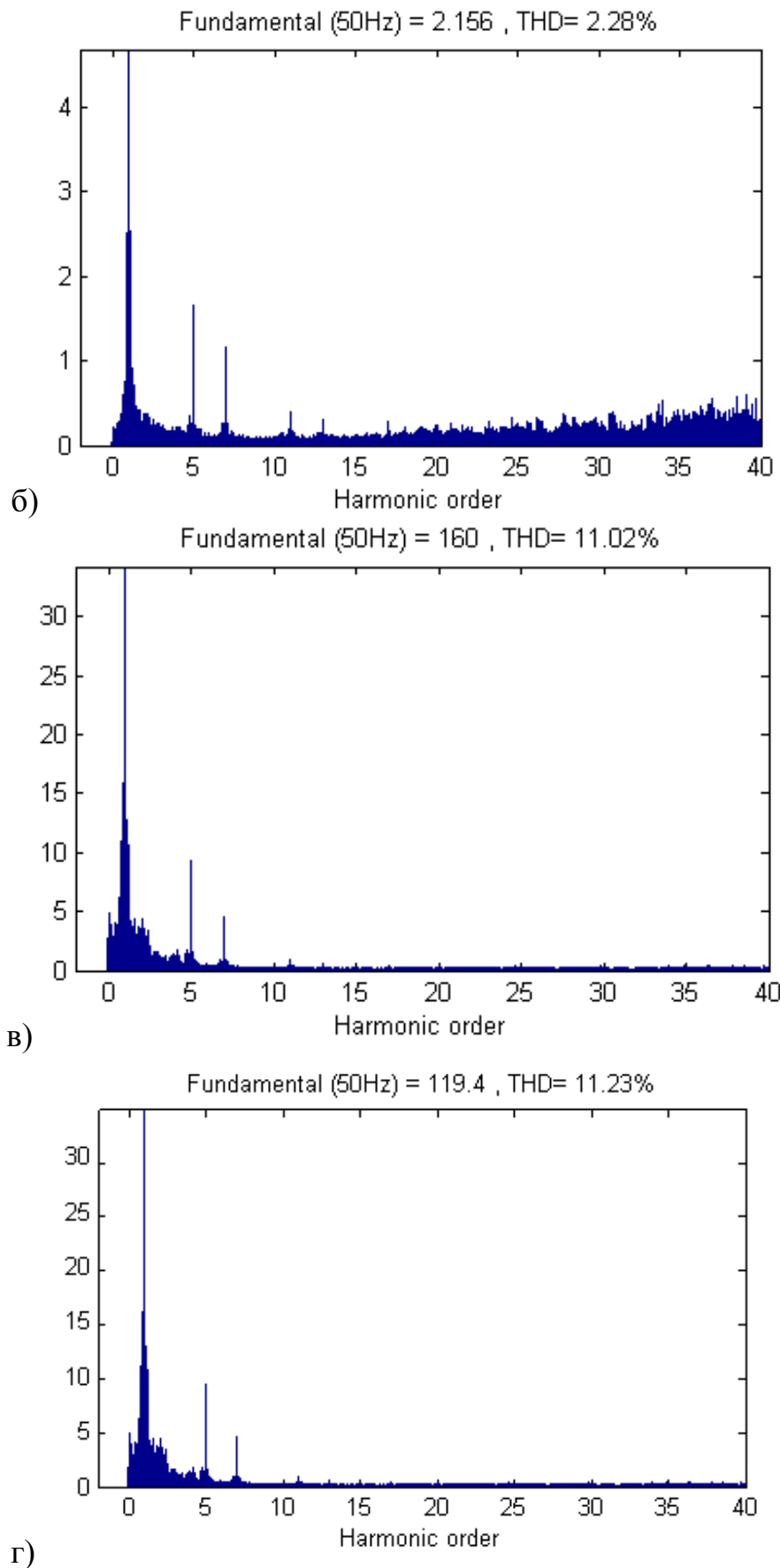
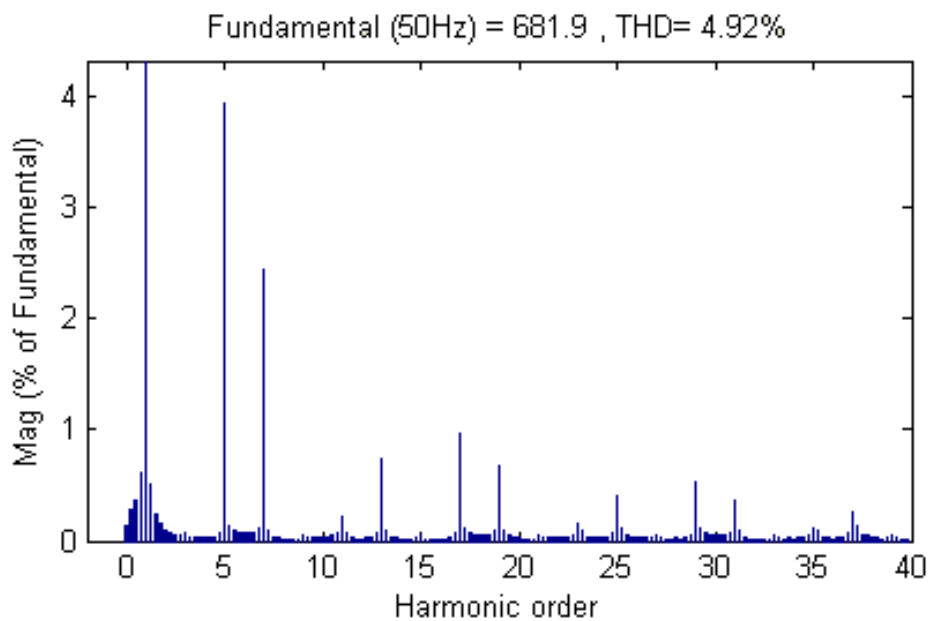


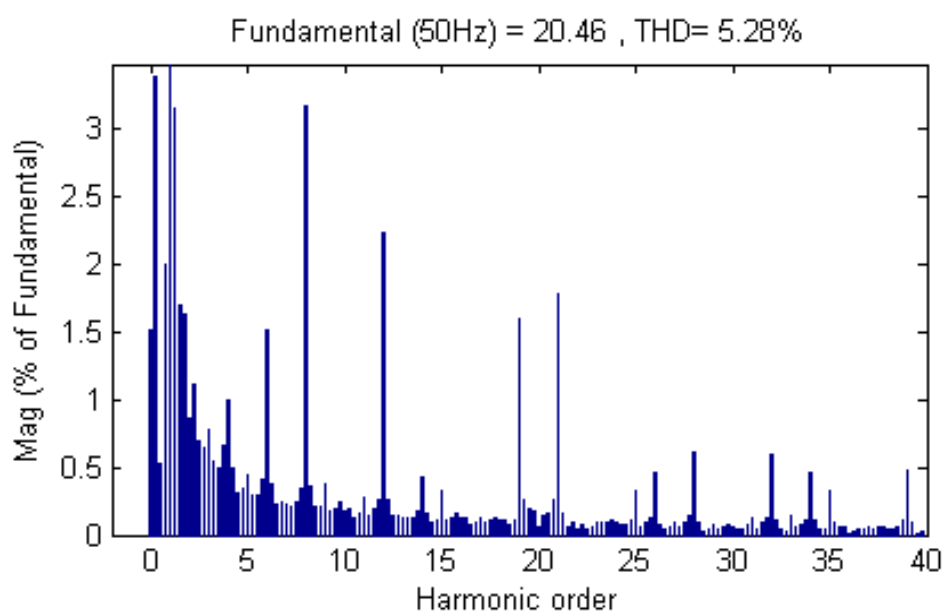
Рис. 4.6. Гармонический состав токов и напряжений при использовании СУ АФГ, построенной с применением теории мгновенной мощности для отрезка времени с 50 до 100 секунд

а, б – гармонические составляющие напряжений соответственно после понижающего трансформатора и после согласующего трансформатора; в, г – гармонические составляющие токов соответственно после понижающего трансформатора и согласующего трансформатора.

Результаты моделирования в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 150 до 200 секунд, представлены на рис. 4.7 а – г:



а)



б)

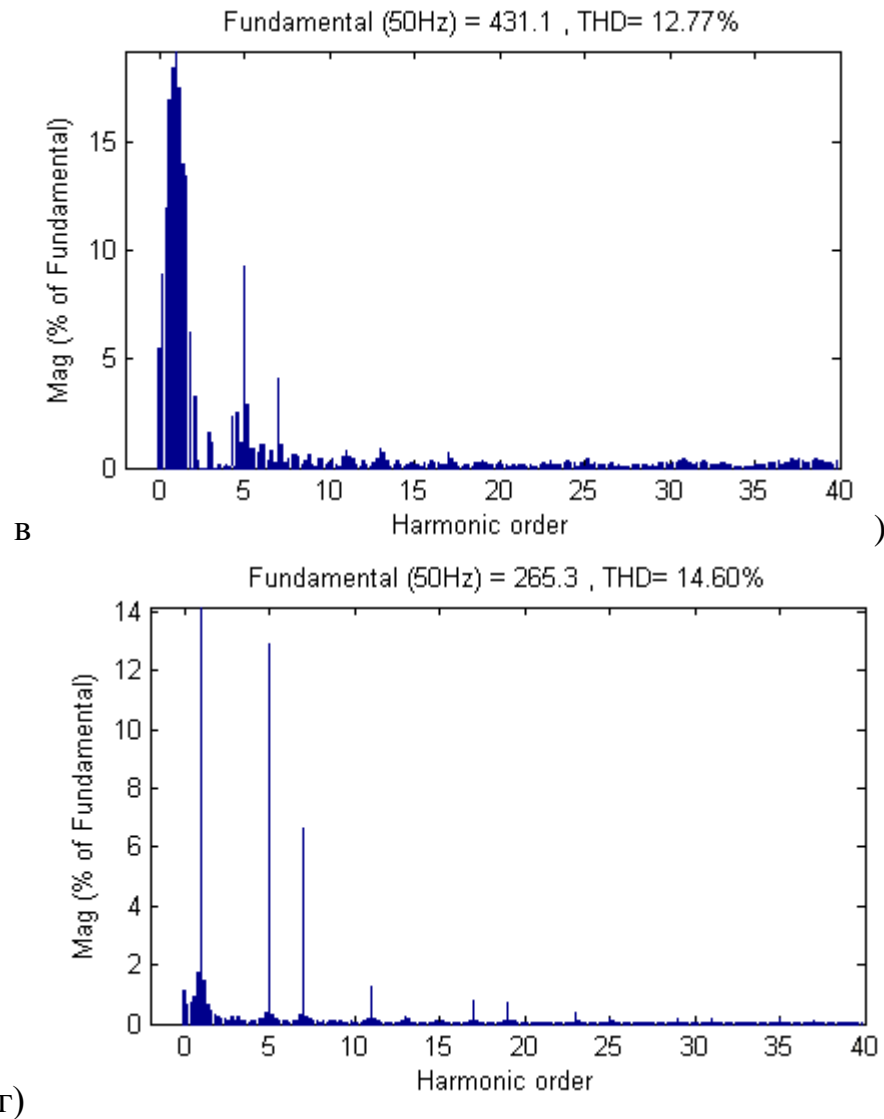


Рис. 4.7. Гармонический состав токов и напряжений при использовании СУ АФГ, построенной с применением теории мгновенной мощности для отрезка времени с 150 до 200 секунд

а, б – гармонические составляющие напряжений соответственно после понижающего трансформатора и после согласующего трансформатора; в, г – гармонические составляющие токов соответственно после понижающего трансформатора и согласующего трансформатора.

Как видно из результатов моделирования, использование стандартной СУ АФГ эффективно для компенсации суммарного коэффициента высших гармонических составляющих напряжения (THD = 2.11 % и THD = 2.28 % в одном случае и THD = 4,92 % и THD = 5.28 % в другом). Однако компенсация высших гармонических составляющих тока недостаточная, так



как THD = 11,02% и THD = 11,23%. На отрезке времени от 50 до 100 секунд и THD = 12,77 % и THD = 14,6 % на отрезке времени от 150 до 200 секунд.

Модель СУ АФГ, построенная на базе нечеткой логики представлена на рис 4.8:

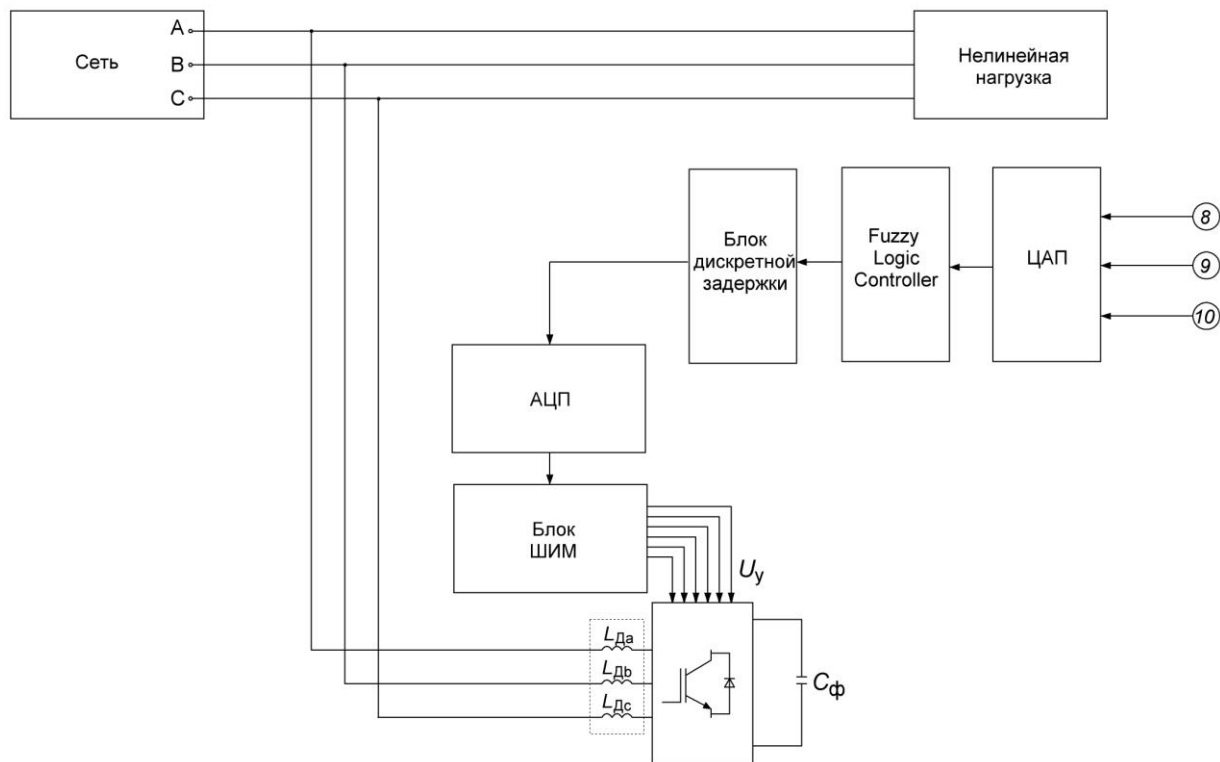


Рис. 4.8. СУ АФГ с системой управления на базе нечеткой логики

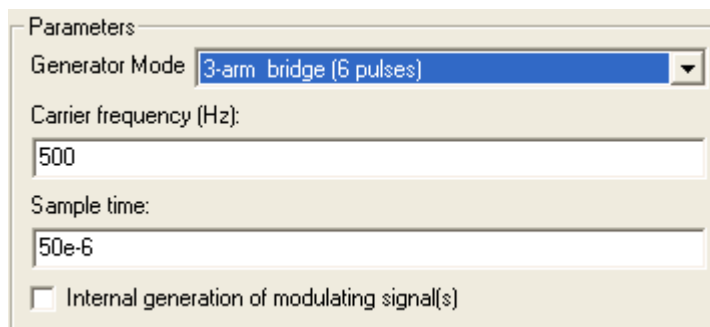
В состав активного фильтра, СУ АФГ с системой управления на базе нечеткой логики входят следующие элементы:

- инвертор, построенный на IGBT – транзисторах (Universal Bridge);
- емкостной накопитель (Series RLC Branch, где  $C > 0$ );
- индуктивная составляющая на входе инвертора (Series RLC Branch, где  $L > 0$ );
- блок единичной дискретной задержки (Unit Delay);
- блок системы управления нечетким регулятором (Fuzzy Logic Controller).

Для построения такой системы управления [83,84,85,86] необходимо подключение трех датчиков тока (8, 9, 10), по одному для каждого из нелинейных электроприемников (рис. 4.8). После проведения всех преобразований в блоке Fuzzy Logic Controller [79,80] на выходе мы

получаем величину тока компенсации. Дальнейшее преобразование и сравнение с опорным током в системе ШИМ позволяет управлять ключами инвертора АФГ [81,82] для формирования выходного тока фильтра в соответствие тока искажения.

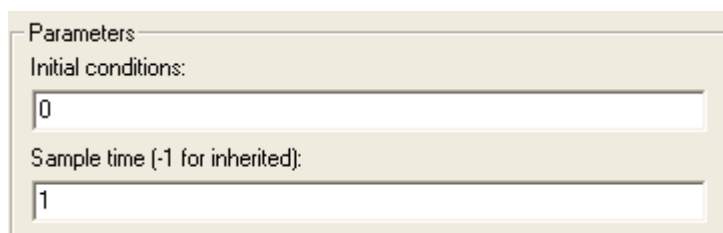
Окно настройки блока ШИМ (PWM Generator) приведено на рис 4.9:



The screenshot shows a 'Parameters' window for a PWM Generator. It includes a dropdown menu for 'Generator Mode' set to '3-arm bridge (6 pulses)', a text input for 'Carrier frequency (Hz)' with the value '500', a text input for 'Sample time' with the value '50e-6', and an unchecked checkbox for 'Internal generation of modulating signal(s)'.

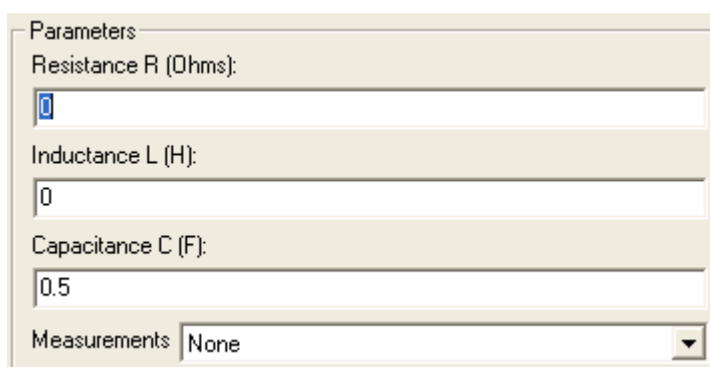
Рис. 4.9. Окно настройки блока ШИМ

Блок единичной дискретной задержки (Unit Delay) рис. 4.10 необходим для реализации фиксированной частоты обновления сигналов на входе в блок ШИМ, который осуществляет управление ключами инвертора, для зарядки и разрядки емкостного накопителя (окно задания его параметров приведено на рис 4.11), для инжектирования тока компенсации в сеть. Таким образом, реализуется управления ключами инвертора для компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений.



The screenshot shows a 'Parameters' window for a Unit Delay block. It includes a text input for 'Initial conditions' with the value '0' and a text input for 'Sample time [-1 for inherited]' with the value '1'.

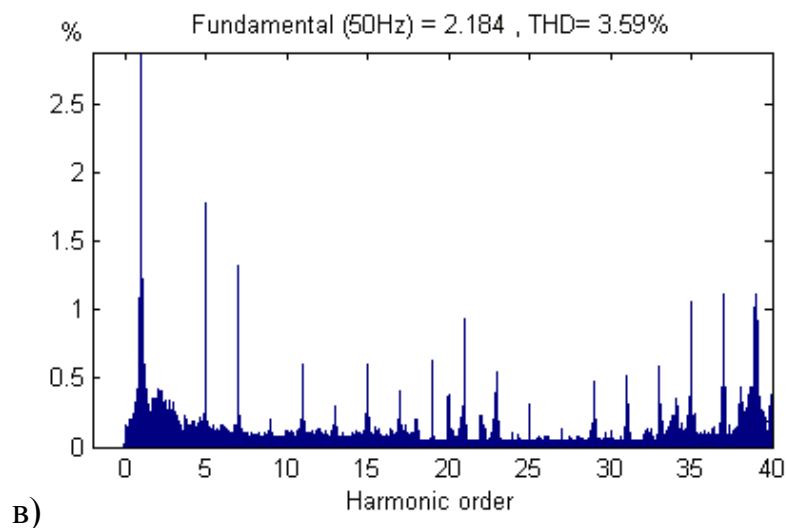
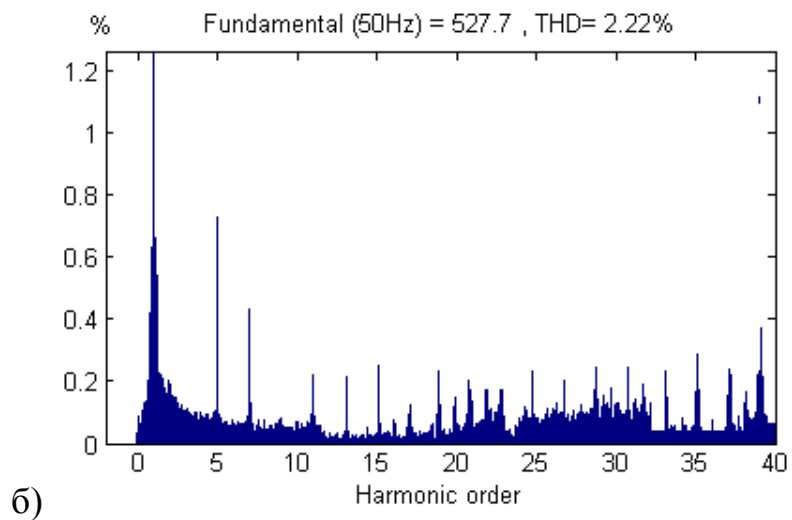
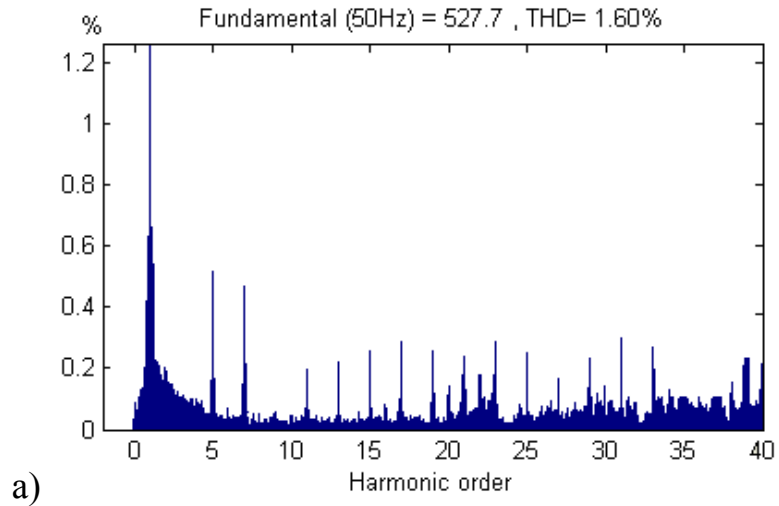
Рис. 4.10. Окно настройки блока дискретной задержки

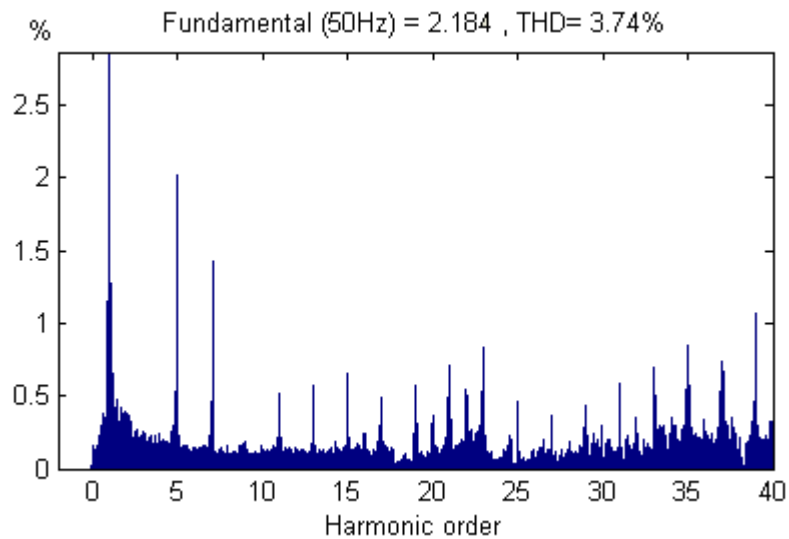


The screenshot shows a 'Parameters' window for a capacitor block. It includes text inputs for 'Resistance R (Ohms)' with the value '0', 'Inductance L (H)' with the value '0', and 'Capacitance C (F)' with the value '0.5'. There is also a dropdown menu for 'Measurements' set to 'None'.

Рис. 4.11. Окно настройки емкостного накопителя

В результате имитационного моделирования с применением АФГ с СУ на базе нечеткой логики я в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд, были получены следующие показатели ЭМС системы (рис. 4.12 а – г):

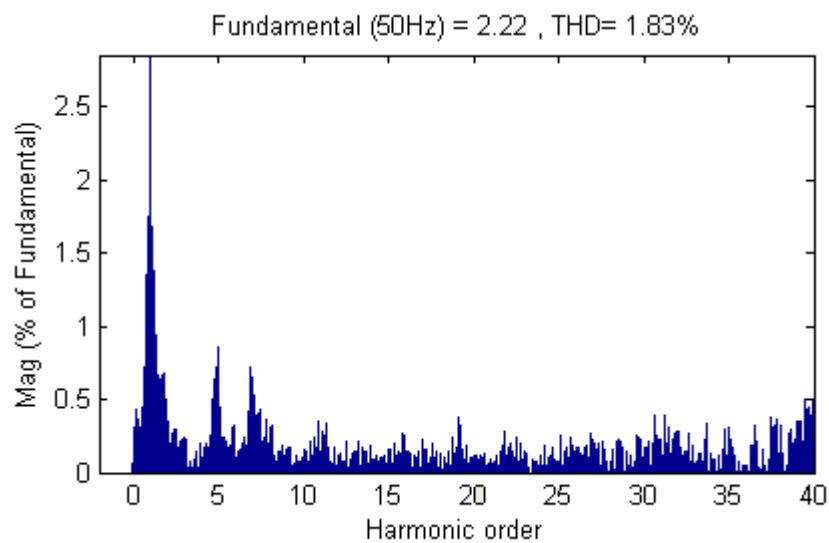




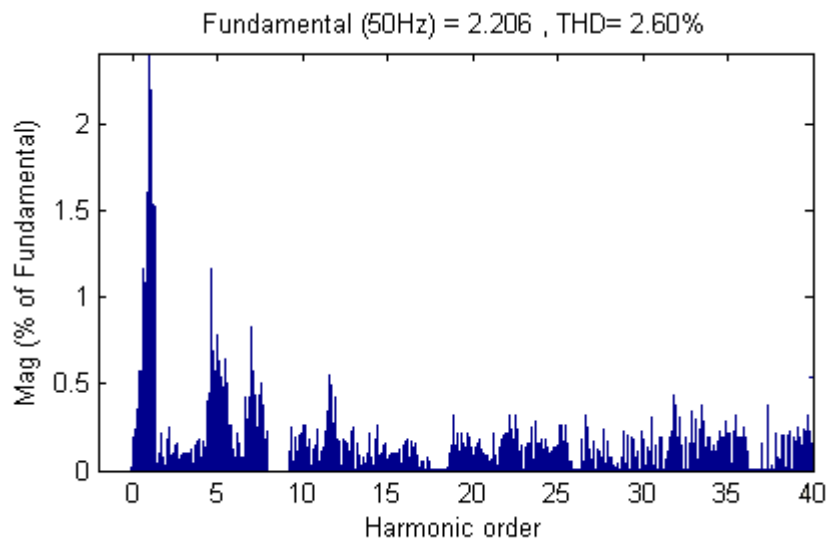
г)

Рис. 4.11. Гармонические состав токов и напряжений при использовании СУ АФГ на базе нечеткой логики для отрезка времени с 50 до 100 секунд  
 а, б – гармонические составляющие напряжений соответственно после понижающего трансформатора и после согласующего трансформатора; в, г – гармонические составляющие токов соответственно после понижающего трансформатора и согласующего трансформатора.

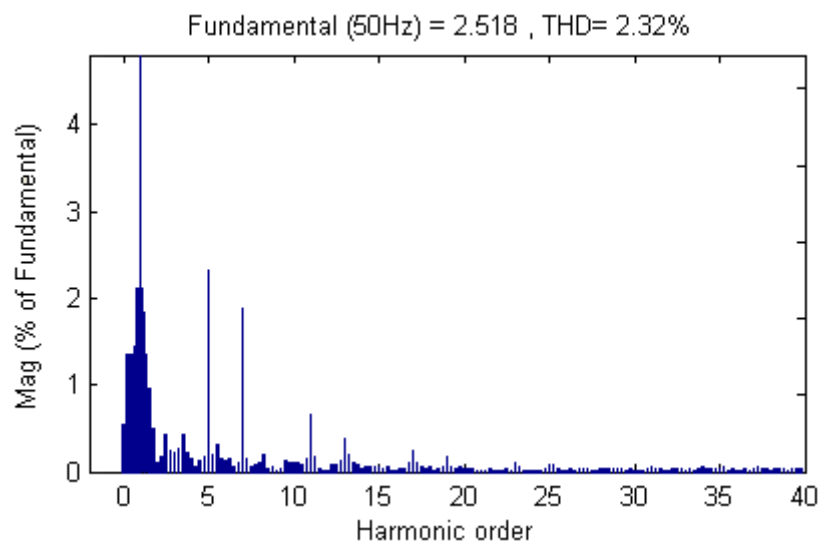
Результаты моделирования в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 150 до 200 секунд, представлены на рис. 4.12 а – г:



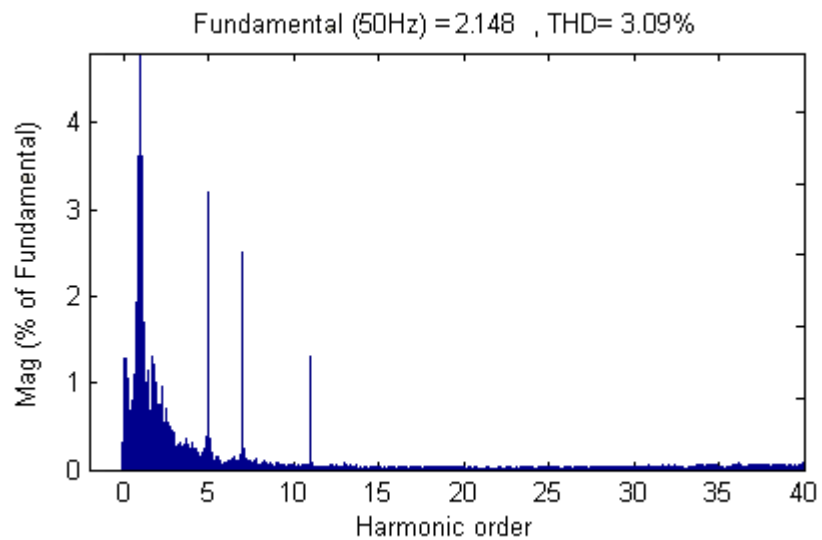
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.12. Гармонический состав токов и напряжений при использовании СУ АФГ на базе нечеткой логики для отрезка времени с 150 до 200 секунд

а, б – гармонические составляющие напряжений соответственно после понижающего трансформатора и после согласующего трансформатора; в, г – гармонические составляющие токов соответственно после понижающего трансформатора и согласующего трансформатора.

Из результатов моделирования видно, что полученные значения коэффициента высших гармонических составляющих напряжения  $\text{THD} = 1.60\%$ ;  $\text{THD} = 1,83\%$  после понижающего трансформатора за период времени согласно обобщенной тахограммы движения от 50 до 100 секунд и от 150 до 200 секунд соответственно и  $\text{THD} = 2.22\%$ ;  $\text{THD} = 2,6\%$  за период времени согласно обобщенной тахограммы движения от 50 до 100 секунд и от 150 до 200 секунд соответственно после согласующего трансформатора соответствуют требованиям, нормируемым по ГОСТ 32144-2013. Компенсация высших гармонических составляющих тока за период времени согласно обобщенной тахограммы движения от 50 до 100 секунд и от 150 до 200 секунд соответственно составляет  $\text{THD} = 3,59\%$ ;  $\text{THD} = 2,32$  после понижающего трансформатора и  $\text{THD} = 3,74\%$ ;  $\text{THD} = 3,09\%$  после согласующего трансформатора. Эти показатели являются хорошими для всей системы и свидетельствуют о том, что применение СУ на базе нечеткой логики позволяет не только эффективно понижать высшие гармонические составляющие напряжения, но и также снижать высшие гармонические составляющие тока, что позволит избежать многих отрицательных факторов, влияющих на работу оборудования, о которых говорилось ранее.

Стоит отметить, что осциллограмма кривой потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора ТМГ-1000 6/0,4 в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд примет вид (рис. 4.13 а) и для отрезка времени с 150 до 200 секунд вид (рис. 4.13 б) примет вид:

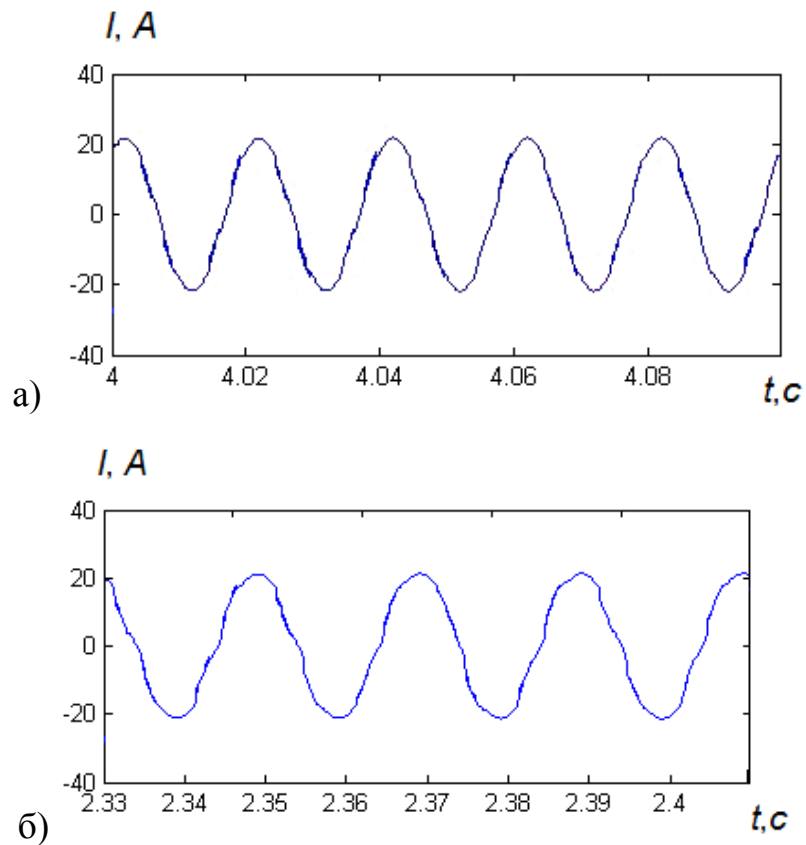
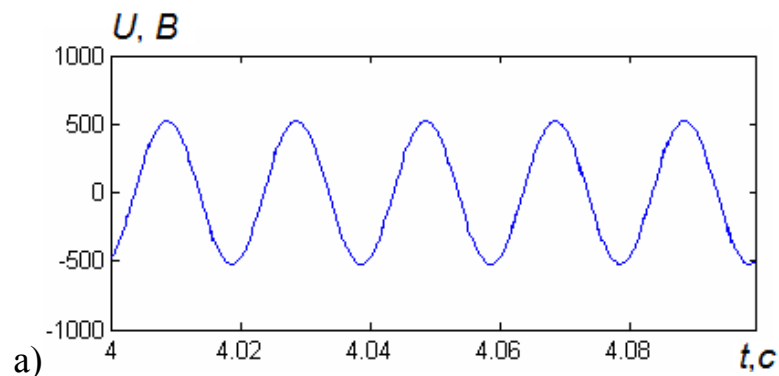


Рис. 4.13. Осциллограмма кривой потребляемого тока на низкой стороне понижающего трансформатора

а) для отрезка времени от 50 до 100 секунд; б) для отрезка времени от 150 до 200 секунд в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов.

Осциллограмма фазного напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора ТМГ-1000 6/0,4 в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд примет вид (рис. 4.14 а) и для отрезка времени с 150 до 200 секунд вид (рис. 4.14 б).



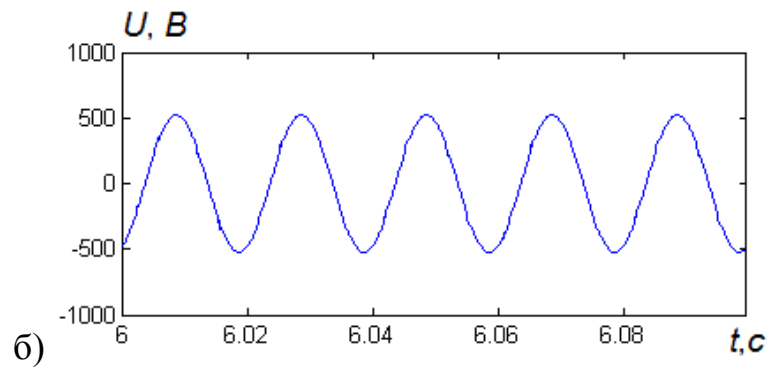


Рис. 4.14. Осциллограмма фазного напряжения на низкой стороне понижающего трансформатора

а) для отрезка времени от 50 до 100 секунд; б) для отрезка времени от 150 до 200 секунд в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов.

Из осциллограмм фазного тока и напряжения видно, что АФГ эффективно компенсирует высшие гармонические составляющие токов и напряжений, при этом сам ток компенсации АФГ для отрезка времени с 50 до 100 секунд и с 150 до 200 секунд согласно тахограммы работы крановых механизмов представлен на рис. 4.15 а и б соответственно.

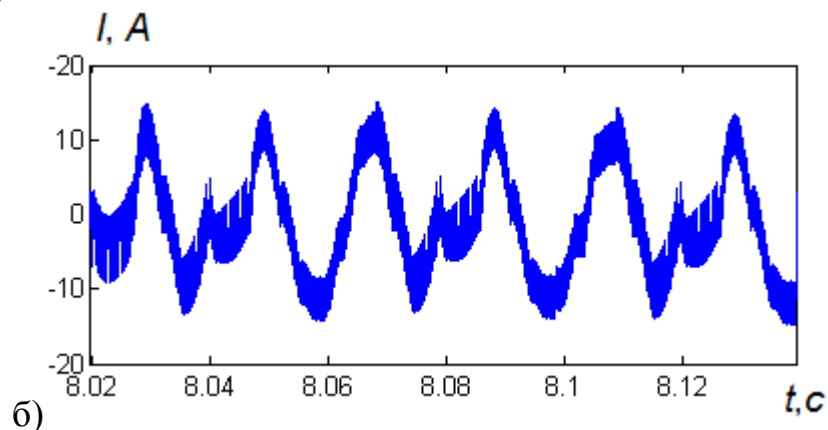
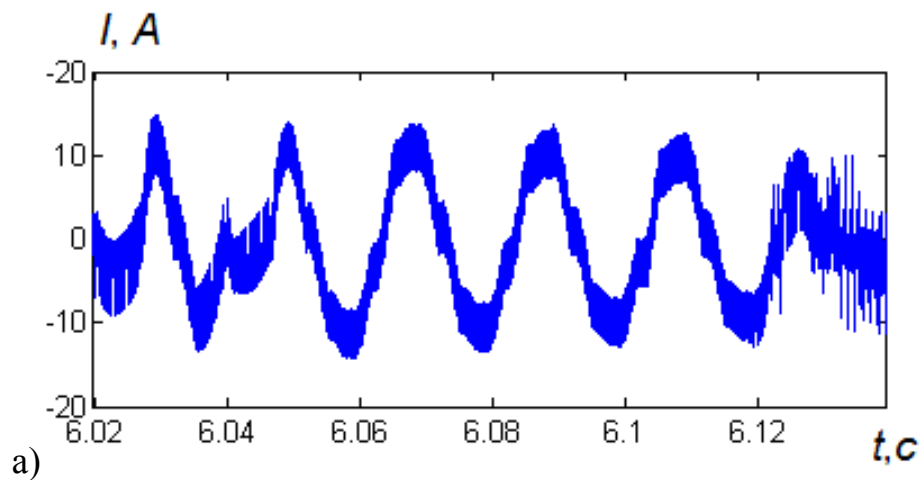


Рис. 4.15. Осциллограмма кривой тока фазы А АФГ



а) для отрезка времени от 50 до 100 секунд; б) для отрезка времени от 150 до 200 секунд в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов.

На основании полученных данных можно провести сравнительный анализ работы системы с применением стандартного АФГ с различными системами управления.

В случае использования АФГ с СУ, построенной на теории мгновенно мощности полученные значения параметров суммарного коэффициент гармонических составляющих тока [78] лучше, чем до установки активного фильтра, но не достаточны, для нормальной работы системы, так как имеют место большие потери мощности.

Применяя систему управления АФГ на базе нечеткой логики, суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (THD) с учетом работы АФГ за цикл работы обобщенной тахограммы движения крановых двигателей снижается до минимума, обеспечивая тем самым ЭМС в системе электроснабжения.

Анализ полученных результатов имитационного моделирования для двух систем управления представлен в таблице 4.4 в соответствии обобщенной тахограммы движения крановых механизмов рис. 1.1 для отрезка времени с 50 до 100 секунд и для отрезка времени с 150 до 200 секунд:

Таблица 4.4 Сравнительный анализ результатов имитационного моделирования системы электроснабжения электроприемников крана

Место измерения суммарного коэффициента гармонических составляющих, соответственно для интервалов времени 50 – 100 секунд и 150-200 секунд	Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока с СУ АФГ с применением теории мгновенной мощности, $K_I, \%$	Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока с СУ АФГ на базе нечеткой логики, $K_I, \%$	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения СУ АФГ с применением теории мгновенной мощности, $K_U, \%$	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения с СУ АФГ на базе нечеткой логики, $K_U, \%$
После понижающего трансформатора ТМГ 1000-6/0,4	11,02	3,59	2,11	1,60
После согласующего трансформатора ТМПН 100 0,4/0,4	11,23	3,74	2,28	2,22
После понижающего трансформатора ТМГ 1000-6/0,4	12,77	2,32	4,92	1,83
После согласующего трансформатора ТМПН 100 0,4/0,4	14,6	3,09	5,28	2,6

Анализ таблицы 4.4 показывает, что более эффективной СУ АФГ, с точки зрения компенсации высших гармоник как напряжения, так и тока является СУ на базе нечеткой логики. Использование подобной системы управления позволит улучшить коэффициент высших гармонических составляющих напряжения в 5 раз, а коэффициент высших гармонических составляющих тока в 6 раз.

Таким образом, применение СУ АФГ с фаззи - регулятором является наиболее эффективным методом решения проблемы ЭМС в цеховой системе электроснабжения с электроприемниками с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

#### 4.3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ СУ АФГ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ РЕАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

Разработка и построение алгоритма системы управления на базе нечеткой логики реализовано с использованием программного обеспечения Visual Studio 2008 и исходный код программы реализован в среде программирования Pascal [87,88,89,90].

В структуре алгоритма использованы следующие основные обозначения и переменные:

- $U_n$  - мгновенное значение тока фазы А для  $n$  – го электроприемника;
- $U_{nold}$  - мгновенное значение тока фазы А для  $n$  – го электроприемника в предыдущий шаг квантования;
- $U_{c\Sigma}$  - абсцисса центра тяжести выходной переменной;
- $U_{вых}$  - выходная величина нечеткого регулятора;
- $min_i, max_i$  – начало и конец интервалов для каждой из выбранных терм лингвистических переменных.

Необходимо отметить, что входными величинами нечеткого регулятора будут мгновенные значения токов фазы А каждого из нелинейных электроприемников мостового крана. Интервалы (координаты каждой из трапециевидных терм) вводятся до начала рабочего цикла программы, реализующей систему управления АФГ на базе нечеткой логики.

Для определения работы каждого из двигателей вводится процедура отслеживания каждого из мгновенных значений фазного тока, т.е. определяется значение переменной  $U_n$  не равное 0. Затем, в случае положительного результата, начинается поиск интервала, в который входит  $U_n$ . Для этого реализована процедура перебора значений входной переменной (4.12) [91].

$$\begin{aligned} U_n &\geq \min[i]; \\ U_n &\leq \max[i], \end{aligned} \quad (4.12)$$

в нашем случае  $i = 1 \dots 4$  (так как в результате расчета, приведенного в п. 3.3, получены по 4 термина для каждой из входных величин).

В механизме управления Мамдани функция принадлежности управляющего воздействия  $\mu_c(U)$  нечеткому терму – множеству «отрицательная» ограничена сверху значением А, определяемым по выражению 4.13:

$$A = \min[\mu_1(U_1^*), \mu_1(U_2^*), \mu_1(U_3^*)] \quad (4.13)$$

Функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому терму – множеству «положительная» ограничена сверху значением В, определяемым по выражению 4.14:

$$B = \min[\mu_2(U_1^*), \mu_2(U_2^*), \mu_2(U_3^*)] \quad (4.14)$$

Для определения конкретного значения управляющего воздействия формируется «результатирующая фигура», ограниченная результирующей функцией принадлежности, и производится поиск центра тяжести результирующей фигуры (так называемой абсциссы). В зависимости от соотношения величин А и В «результатирующая фигура» может принимать две конфигурации: первая -  $A \leq B$  (рис. 4.16.) и рассчитывается по выражению 4.15:

$$U_{Cn} = \frac{U_{1old} / 2 + (U_1^3 - U_{1old}^3) / 6}{U_{1old} - (U_1^2 - U_{1old}^2) / 2}; \quad (4.15)$$

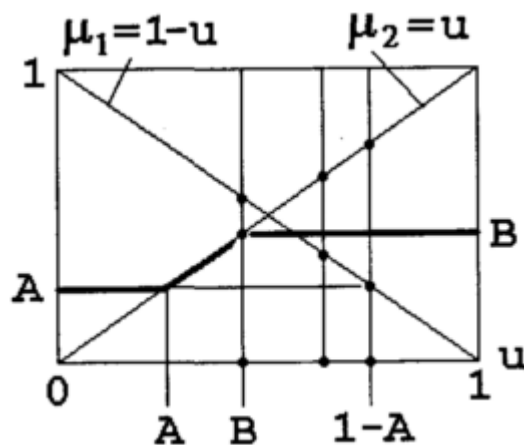


Рис. 4.16 «Результатирующая фигура» при возрастании входной величины  
 вторая -  $A \geq B$  (рис. 4.17.) и рассчитывается по выражению 4.15:

$$U_{Cn} = \frac{(U_1 - U_1^2 + U_{old}^2)/2 + (U_1^2 - U_{old}^2)/6}{U_1 - (U_1^2 - U_{old}^2)/2}; \quad (4.16)$$

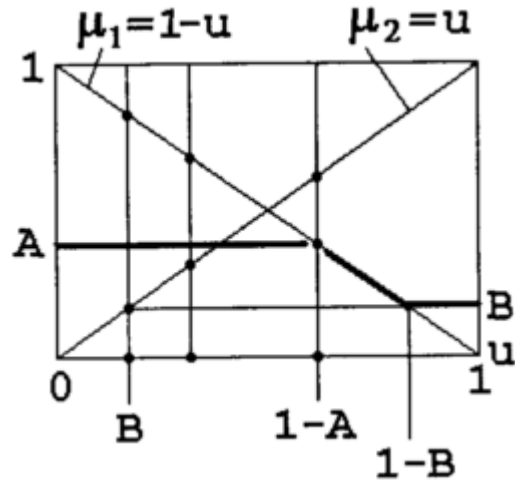


Рис. 4.17. «Результирующая фигура» при уменьшении входной величины

По выходу из цикла значение, полученное на входе регулятора, присваивается переменной  $U_{nold} = U_n$ . Затем проверяется условие  $U_{Cn} > 0$ , в случае выполнения этого условия производится расчет абсциссы центра тяжести выходной переменной  $U_{c\Sigma}$  методом среднего максимума (выражение 4.17):

$$U_{c\Sigma} = \frac{U_{c1} + U_{c2} + U_{c3}}{3} \quad (4.17)$$

Затем начинается определение интервала принадлежности выходной величины, исходя из интервалов входных величин, которые определялись ранее. Причем определение интервала производится методом перебора значений вхождения в искомый интервал. При этом терм, в который входит выходная величина, выбирается из правил нечеткой продукции, приведенных в п. 3.3, что реализовано в алгоритме в виде блоков условий.

После определения номера выходного терма, производится расчет выходного значения нечеткого регулятора – величины тока компенсации. Затем происходит его дальнейшее преобразование и сравнение с опорным током в системе ШИМ для последующего управления ключами инвертора, для компенсации высших гармоник тока и напряжения.

Выходная величина нечеткого регулятора определяется по выражению 4.18:

$$U_{вых} = U_{Cn(\min)} + (U_{Cn(\max)} - U_{Cn(\min)})U_{C\Sigma} \quad (4.18)$$

Результаты работы алгоритма реализованы в виде программного кода в среде программирования Pascal и приведены в приложении 4.

Необходимо отметить, что для опробования программы были введены значения мгновенных токов для электроприемников и заданы соответствующие термы, как показаны в рис. 3.21. Значения входных переменных  $L1 = 9,42$  А,  $L2 = 15,6$  А, и  $L3 = 14,3$  А, выходная величина регулятора, на выходе программы составила  $L4 = 6,99$  А. Окно программы с полученным значением приведено на рис. 4.18.

```
uvedite min2=2
uvedite max2=5
uvedite min3=4
uvedite max3=9
uvedite min4=7
uvedite max4=16.5
Uvedite intervaly dlya vyhodnoi velicniny
uvedite min1=0
uvedite max1=5
uvedite min2=4
uvedite max2=14
uvedite min3=10
uvedite max3=20
uvedite min4=19.5
uvedite max4=32.5
uvedite u1=9.42
uvedite u2=15.6
uvedite u3=14.3
Uc=0.699
n predela= 2.0E+00
n predela= 4.0E+00
n predela= 4.0E+00
n predela Nuc= 2
Tok kompensacii Uk= 6.99
```

Рис. 4.18. Окно программы управления нечетким регулятором

Таким образом, результаты имитационного моделирования системы управления на базе нечеткой логики в среде Matlab и программирования такой системы управления показали хорошую сходимость. Это обосновывает правильность реализации алгоритма управления с применением фаззи – регулятора для контроллера.

Обобщенная блок схема алгоритма для аналитического расчета функций принадлежности входных и выходной лингвистических переменных фаззи-регулятора представлена на рис 4.19.

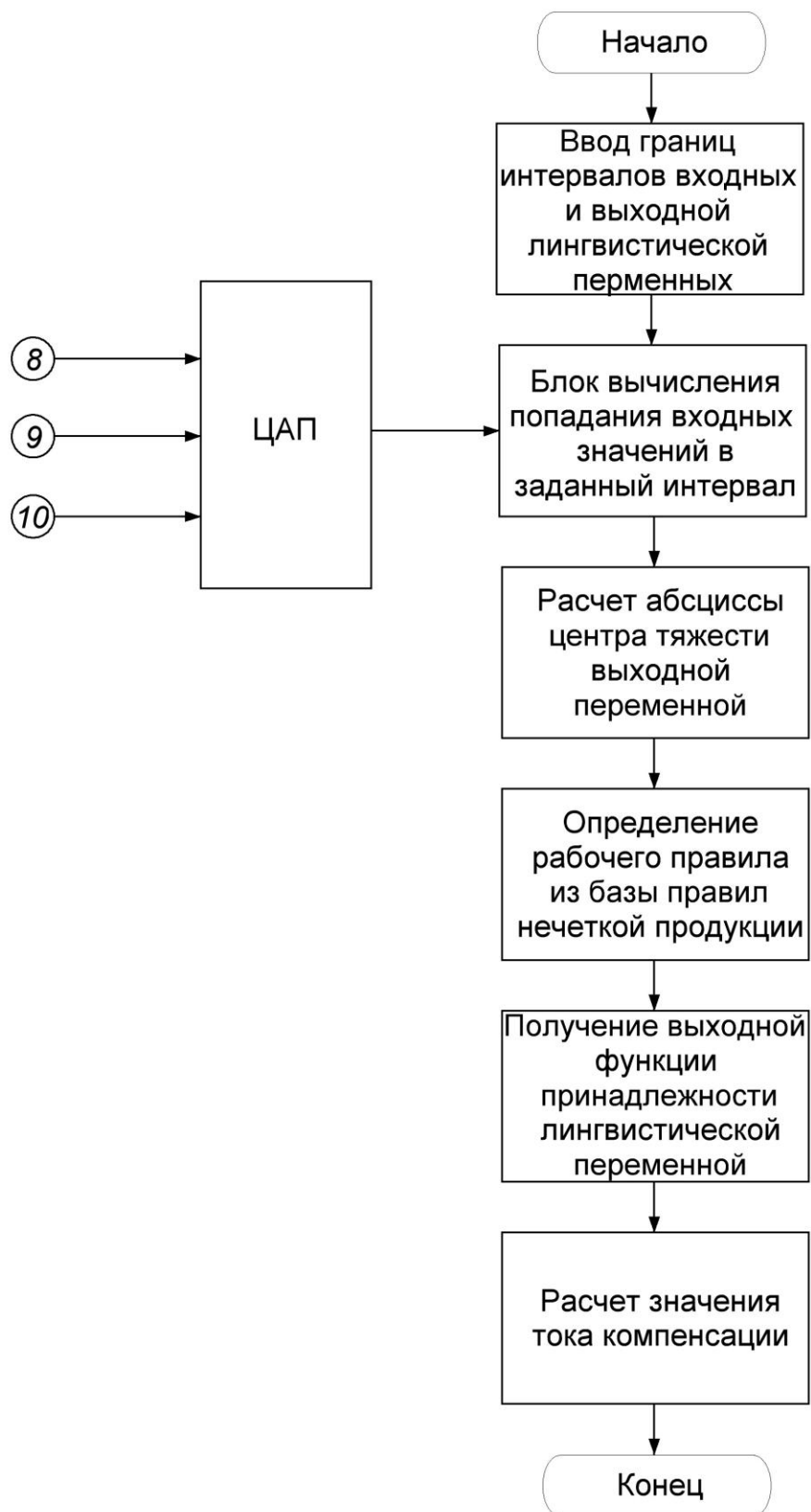
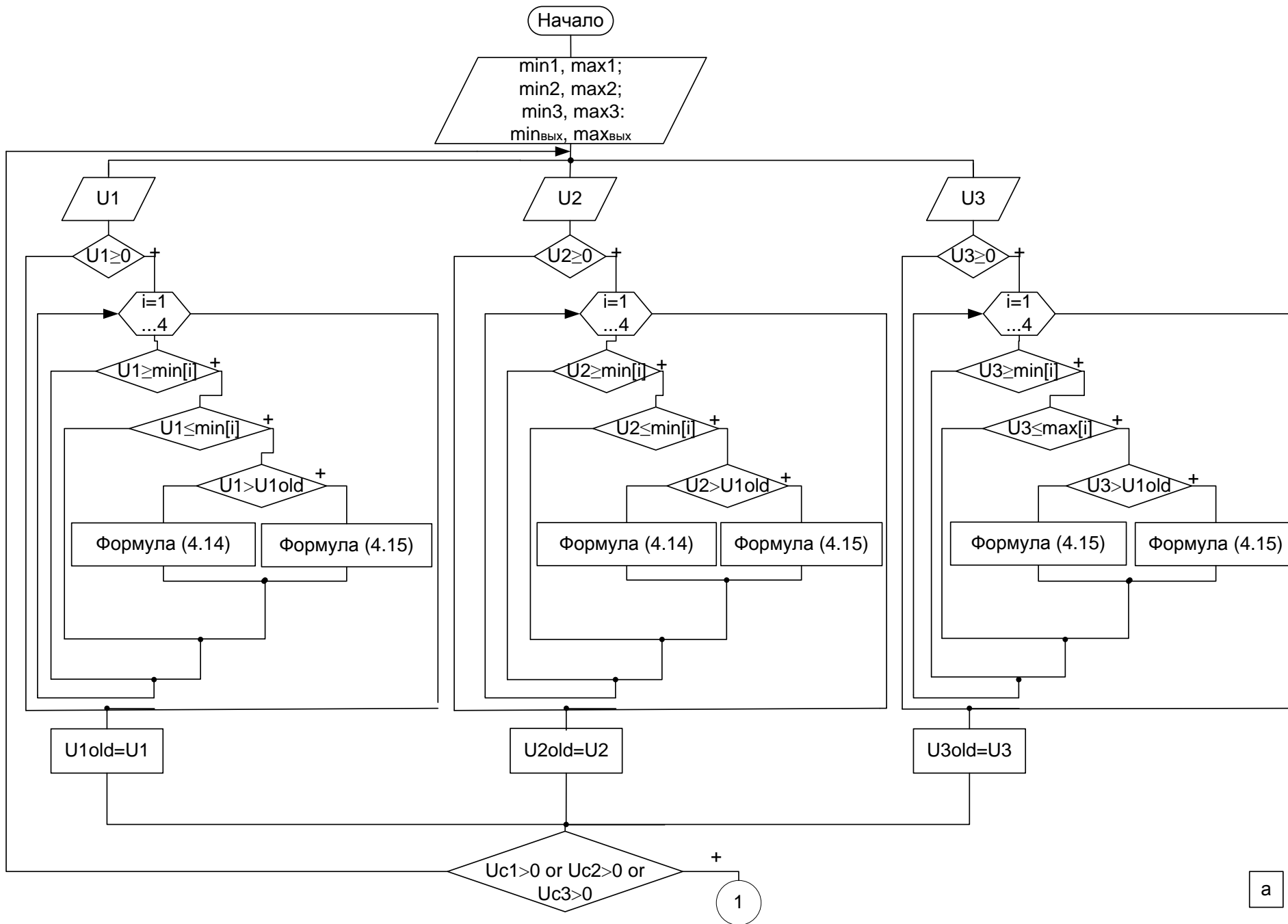


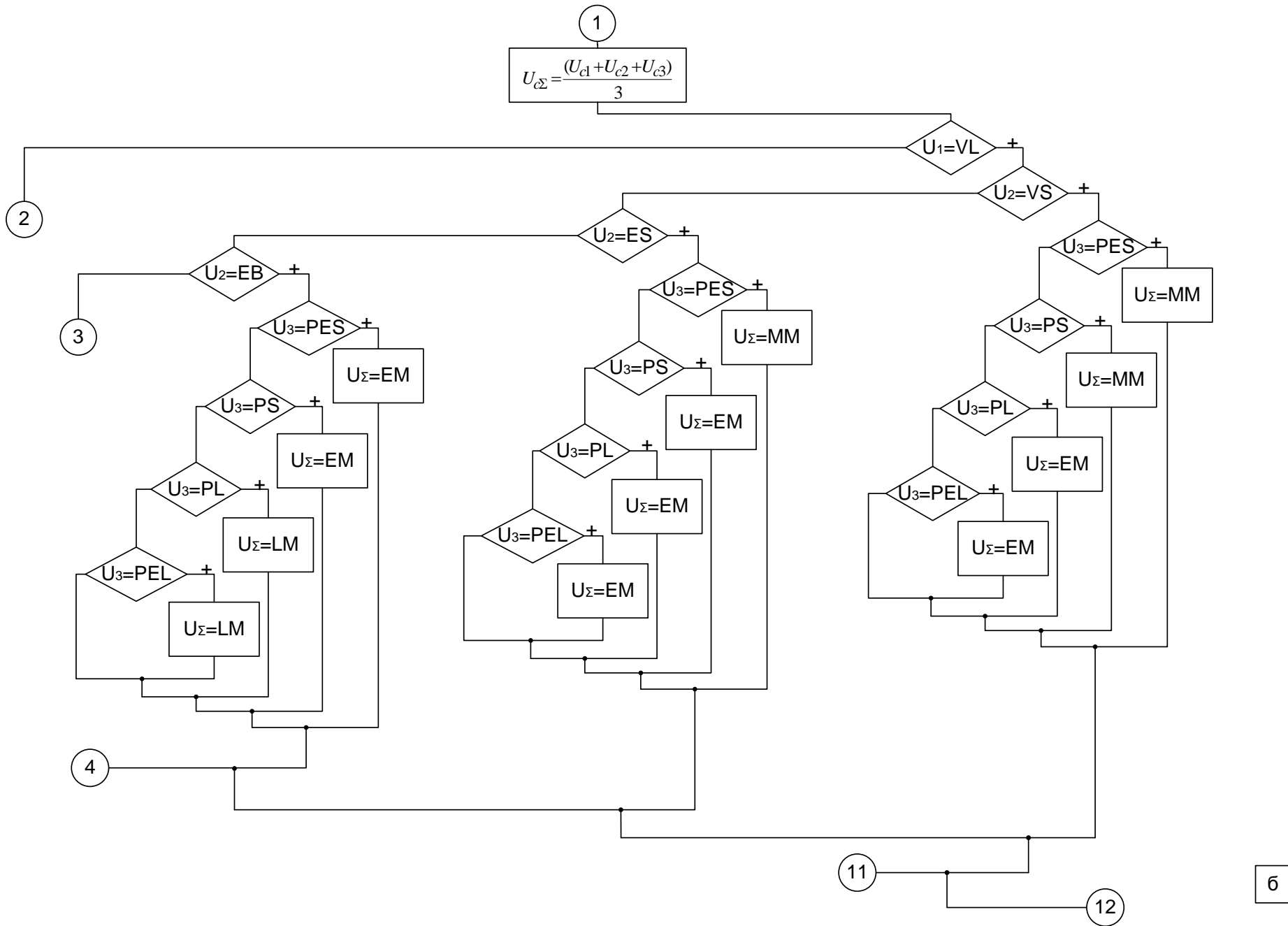
Рис.4.19. Обобщенная блок схема алгоритма работы фаззи-регулятора для контроллера

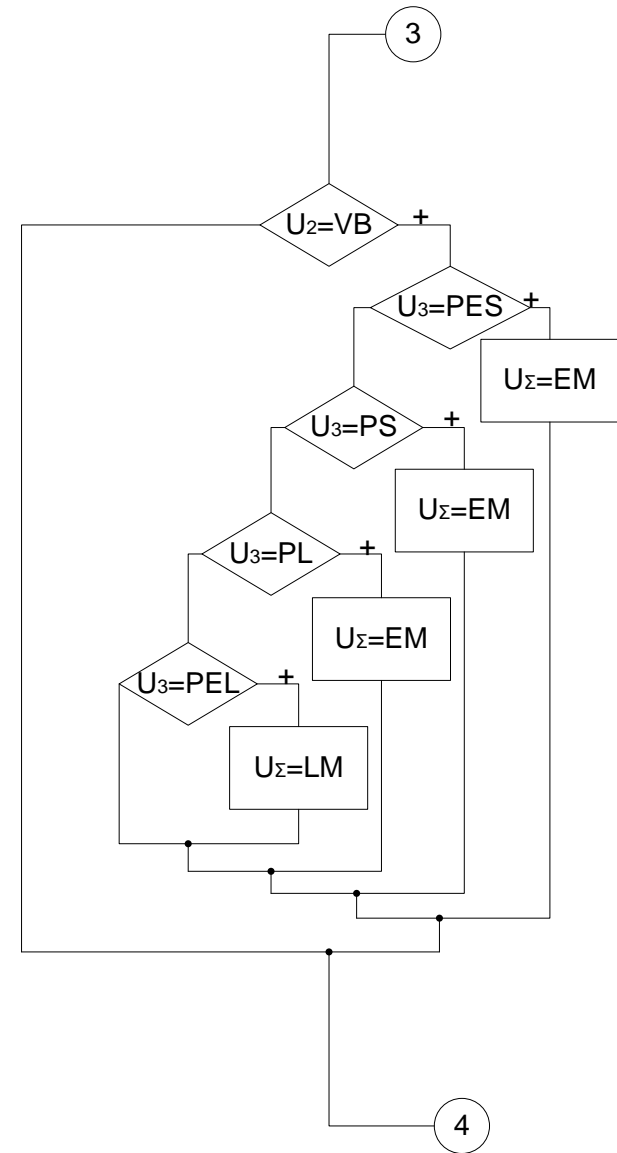
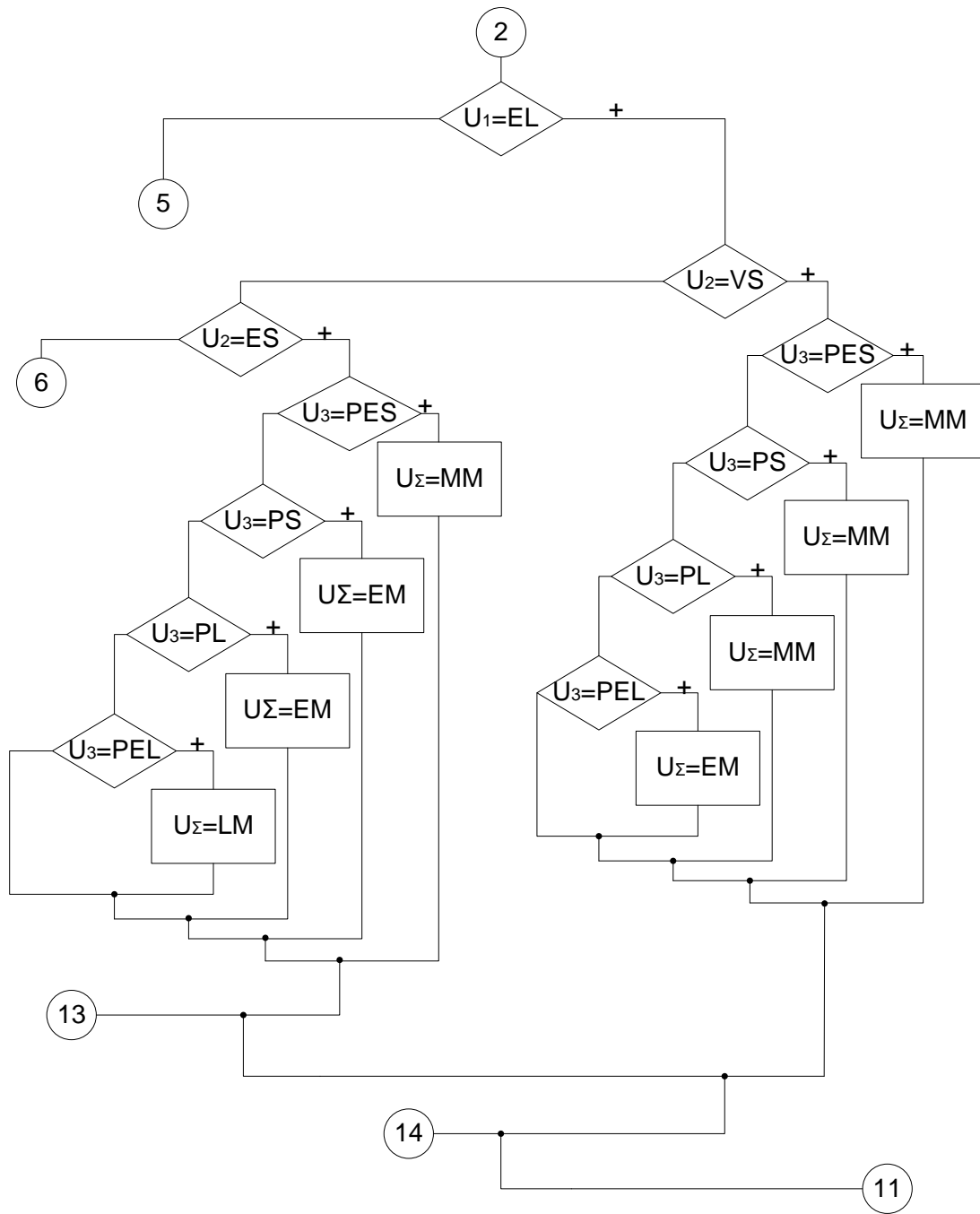
Полная блок схема алгоритма системы управления с нечетким регулятором с приведена на рис. 4.20 а – ж.



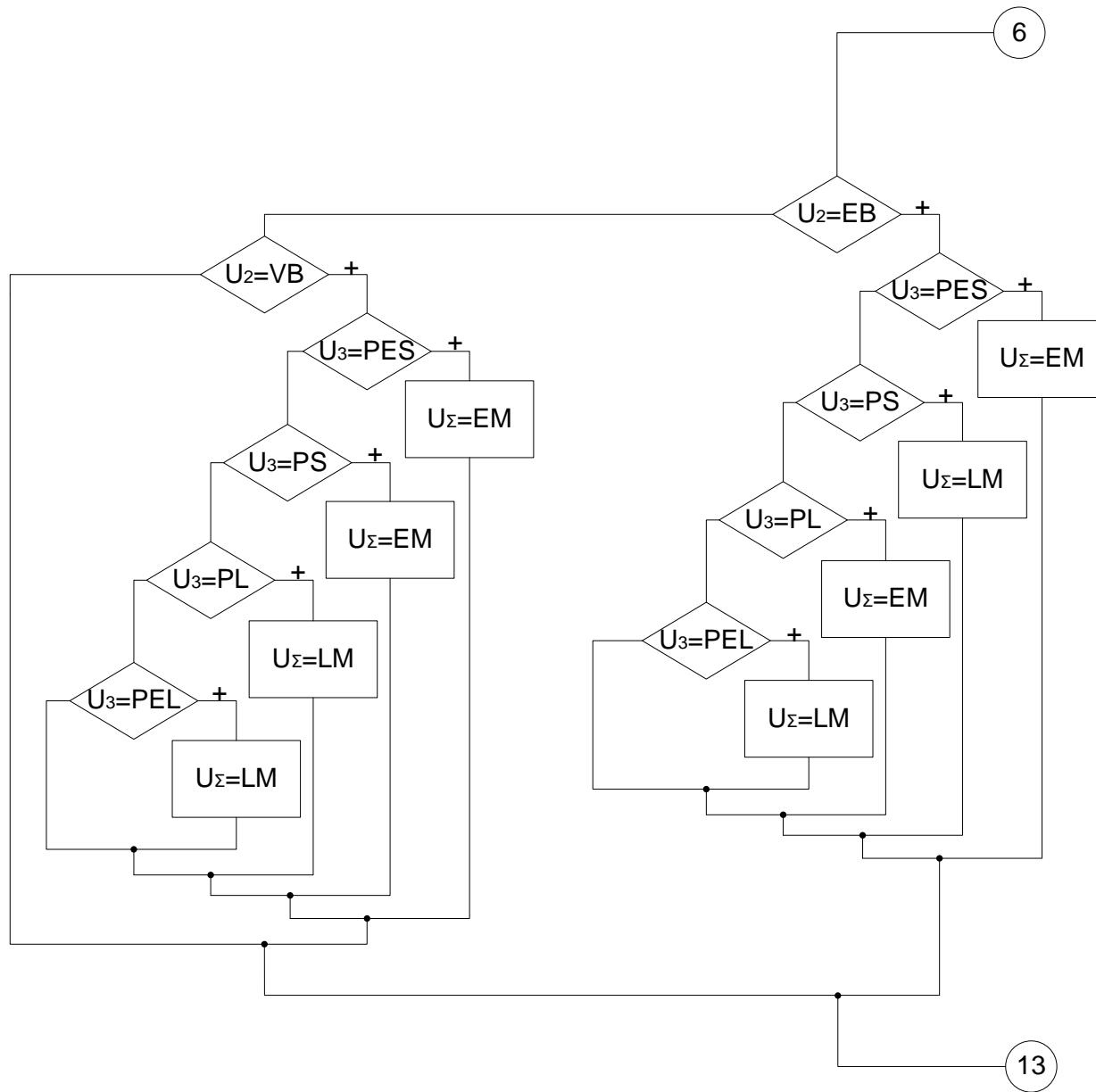
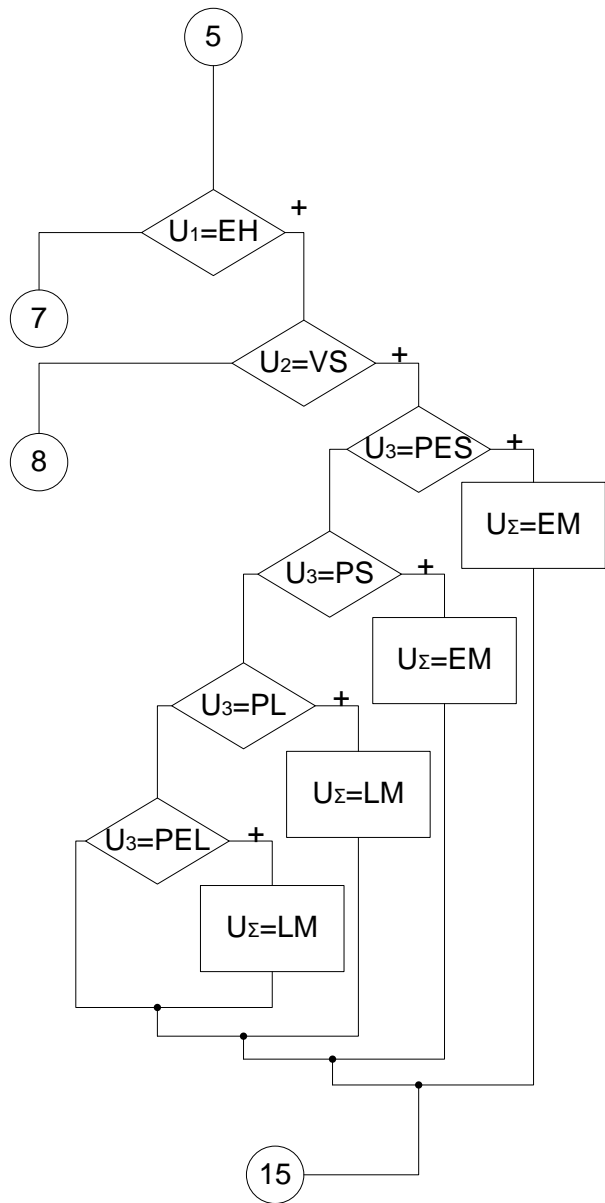
a

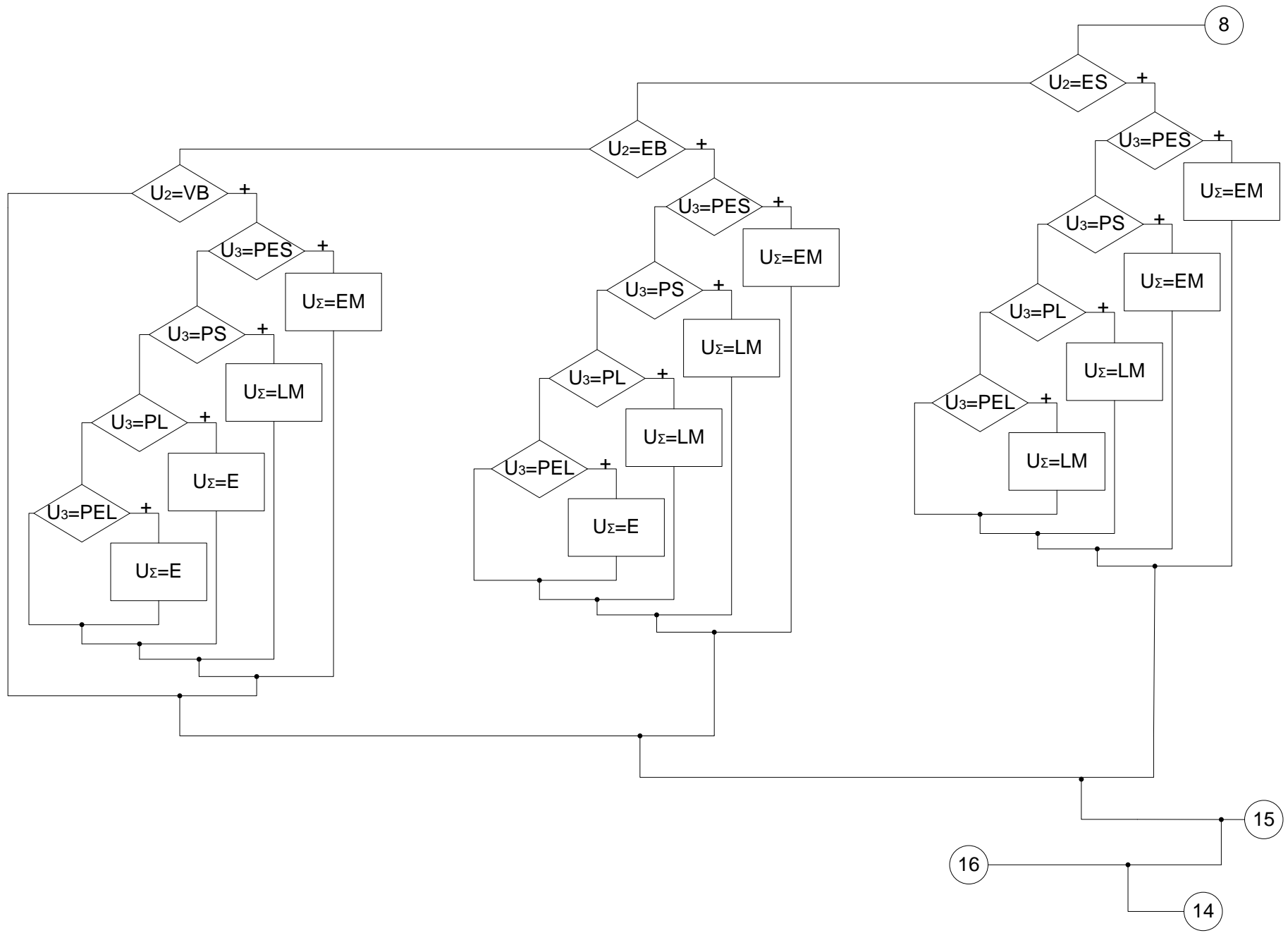




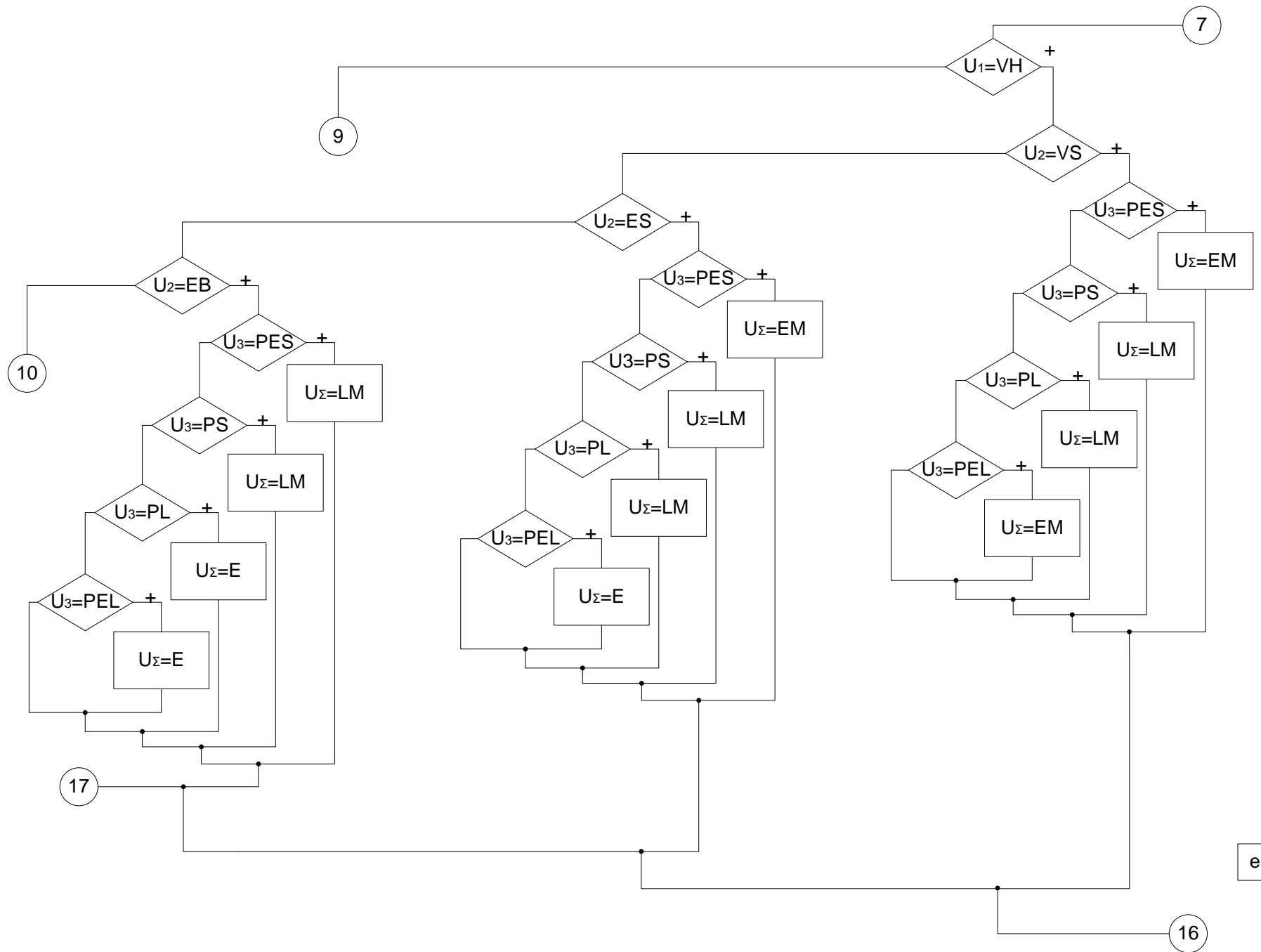


B





Д



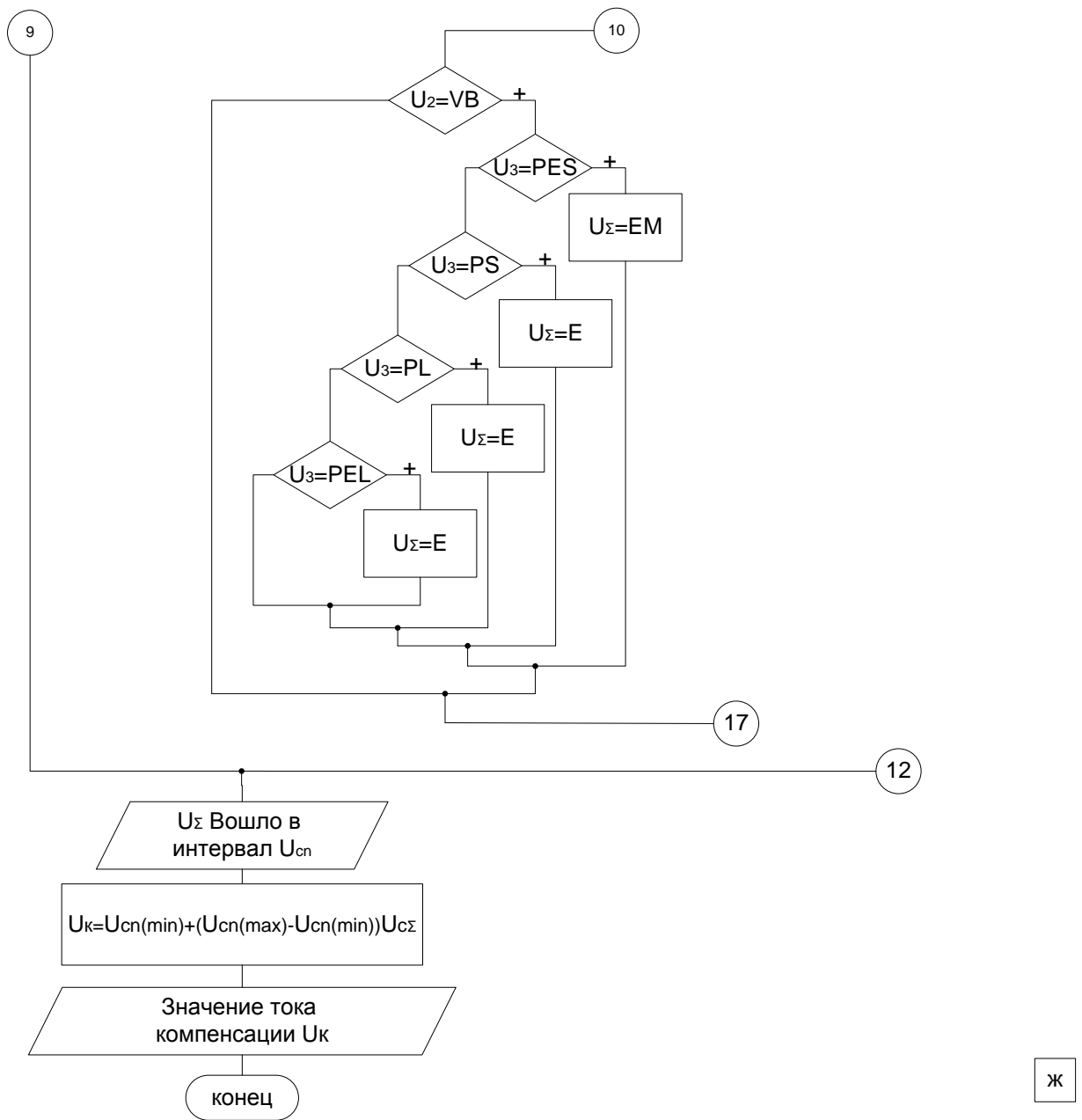


Рис. 4.20. Блок схема алгоритма управления АФГ на базе нечеткого регулятора

Работу алгоритма управления АФГ на базе нечеткого регулятора можно описать следующим образом:

- ввод интервалов изменения лингвистических переменных;
- получение параметров токов каждого элемента нагрузки на цифро-аналоговый преобразователь и запоминание величины каждого из входных значений;
- определение необходимости компенсации (проверка каждого из элементов нагрузки на включение);
- при подтверждении работы хотя бы одного из электроприемников начинается процесс вычисления попадания полученного мгновенного значения тока в заданный интервал изменения лингвистических переменных;
- после определения интервала происходит проверка соотношения значений мгновенного тока в данный момент времени и через шаг квантования для нахождения центра тяжести результирующей фигуры и расчет абсциссы центра тяжести для каждого из электроприемников;
- затем проводится сравнение полученных величин абсцисс центра тяжести, и если хотя бы одно из значений не равно 0 то производится расчет абсциссы центра тяжести выходной переменной по методу среднего максимума;
- далее происходит выбор необходимого правила нечеткой продукции исходя из определенных ранее интервалов изменения входных лингвистических переменных, в которые входили мгновенные значения тока каждого из электроприемников;
- по окончанию выбора происходит определение интервала изменения выходной лингвистической переменной;
- после этого производится расчет выходной величины нечеткого регулятора и начинается повторение цикла с начала.

#### 4.4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АФГ

Произведен расчет экономической эффективности установки АФГ на шину цехового электроснабжения, к которой подключены частотно-регулируемые механизмы мостового крана.

Параметры расчета производятся с учетом определения единовременных затрат, экономии активной и реактивной энергии и срока окупаемости АФГ.

Единовременные затраты для установки АФГ определяются по выражению 4,19, с учетом того, что стоимость заявленного активного фильтра Nokian MaxSine 100A-3L составляет 430000 рублей.

$$\mathcal{E}_{зат} = C_{фильтра} \cdot K_3, \quad (4.19)$$

где  $C_{фильтра}$  - стоимость АФГ,  $K_3$  - дополнительные затраты.

Для определения экономии активной и реактивной мощности необходимо определить ток нагрузки. При этом необходимо учитывать, что до внедрения АФГ коэффициент мощности системы составлял  $\cos(\varphi)_{до\_вн.} = 0,68$ , а после внедрения АФГ  $\cos(\varphi)_{после\_вн.} = 0,878$ . Значения тока потребляемого нагрузкой, рассчитывается с учетом постоянства относительной активной части тока, которая принимается равной 1, тогда ток потребляемый нагрузкой до внедрения АФГ и после его установки определится согласно выражений 4.20 и 4.21 соответственно.

$$I_1 = \frac{1}{\cos \varphi_{до\_вн.}}; \quad (4.20)$$

$$I_1' = \frac{1}{\cos \varphi_{после\_вн.}}. \quad (4.21)$$

Снижение потребления активной энергии рассчитывается по формуле 4.22.

$$W = W_{ак} \left( \frac{I_1^2 - I_1'^2}{I_1^2} \right) K_n, \quad (4.22)$$



где  $W_{ak}$  – текущее потребление активной и реактивной энергии,  $I_1$  и  $I_1'$  – ток потребления до и после внедрения АФГ,  $K_n$  – коэффициент потерь.

Годовые затраты по оплате электроэнергии определяются по выражению 4.23.

$$P = W_{ТП} \cdot T_a, \quad (4.23)$$

где  $W_{ТП}$  – среднее потребление электроэнергии за год на анализируемом объекте – цеховой шине электроснабжения ООО Цитробел, к которой подключены частотно-регулируемые механизмы крана ( $W_{ТП} = 4.65$  МВт),  $T_a$  – тариф на электроэнергию ( $T_a = 3,71$  руб/кВт.ч).

Экономия по оплате электроэнергии за год рассчитывается по выражению 4.24.

$$\mathcal{E}_0 = P \cdot W. \quad (4.24)$$

Тогда срок окупаемости затрат на установку АФГ составит:

$$T = \frac{\mathcal{E}_{зам}}{\mathcal{E}_0}. \quad (4.25)$$

Результаты расчета приведены в таблице 4.5:

Таблица 4.5 Параметры расчета экономической эффективности установки АФГ

<i>Наименование величины</i>	<i>Значение</i>
Единовременные затраты для установки АФГ, $\mathcal{E}_{зам}$ , руб.	475000
Годовые затраты по оплате электроэнергии $P$ , руб./год	183645,2
Экономия по оплате электроэнергии $\mathcal{E}_0$ , руб./год	21945,6
Срок окупаемости затрат на установку АФГ $T$ , месяцев	22

Таким образом окупаемость затрат на установку активного фильтра составит порядка 1,83 года.

## **Выводы:**

1. Произведен расчет параметров и выбор стандартного АФГ типа MaxSine 100A-3L с установленной полной мощностью 70 кВА и током 100 А с емкостным накопителем для установки в цеховой системе электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере крановых механизмов.

2. Результаты имитационного моделирования цеховой системе электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками с применением АФГ с СУ, построенной на базе нечеткой логики показывают, что уровень высших гармоник значительно снижается на всем интервале цикла работы крановых механизмов. При этом эффективность обеспечения ЭМС намного выше, чем при использовании АФГ со стандартной СУ.

3. Разработаны алгоритм и исходный код программы управления нечетким регулятором СУ АФГ, который позволяет аналитически реализовать фаззи-регулятор на базе контроллера. При сравнении результатов имитационного моделирования в среде Matlab и программирования фаззи-регулятора получена хорошая сходимость выходных сигналов. Это подтверждает правильность реализации алгоритма управления фаззи – регулятором.

4. Произведена экономическая оценка эффективности установки АФГ с СУ на базе нечеткой логики для обеспечения ЭМС в цеховой системе электроснабжения с электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками на примере крановых механизмов, при этом срок окупаемости такой установки не превышает 1.8 года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализированы особенности работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, на примере крановых механизмов, как источника генерирования в цеховую систему электроснабжения высших гармоник тока и напряжения. Выявлено, что уровень гармоник зависит от работы крановых механизмов в динамических режимах, которые могут составлять до 60% за 1 цикл технологических операций крана.

2. Экспериментально, имитационно и аналитически подтверждено наличие высших гармонических составляющих тока и напряжения в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой (на примере однобалочного мостового крана). При этом уровень электромагнитной совместимости не соответствует требованию стандарта.

3. Обосновано применение АФГ для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения в цеховой системе электроснабжения с подключением электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками как технического решения, для обеспечения нормируемого уровня ЭМС.

4. Разработана и программно реализована методика построения системы управления АФГ на базе нечеткого вывода. При этом, определены входные и выходная лингвистические переменные, сформирована база правил на основании математической статистики и экспертных оценок. Применение АФГ с системой управления на базе нечеткой логики позволяет в полной мере эффективно решить проблему ЭМС в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой и придает разработанной методике научную и практическую ценность.

5. Сформирован алгоритм для аналитического расчета функций принадлежности входных и выходной лингвистических переменных

нечеткого регулятора (фаззи-регулятор) в виде алгоритмов и программного кода для контроллера в СУ АФГ.

6. Использование СУ АФГ, построенной на базе нечеткой логики позволяет сократить число датчиков тока до одного в любой фазе системы электроснабжения крановых механизмов, что повышает помехозащищенность измерительной информации и одновременно снижает стоимость установки АФГ.

7. Произведена экономическая оценка эффективности использования АФГ с СУ, построенной на базе нечеткой логики, для обеспечения стандартного уровня ЭМС в цеховой системе электроснабжения, к которой подключены электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Срок окупаемости при установке АФГ не превышает 1.8 года при капитальных затратах в ценах 2015 года около 500 тысяч рублей.

8. Разработанная модель АФГ, построенная на базе нечеткого вывода, предложена для внедрения в систему электроснабжения мостового однобалочного крана «ООО Цитробел» г. Белгорода, грузоподъемностью 15 тонн и результаты внедрения подтверждаются актом, утвержденным главным инженером ООО «Цитробел» г. Белгород (15 июня 2015 г). Результаты работы, также могут быть использованы в учебном процессе энергетического института БГТУ им. В.Г. Шухова в курсах «Силовая электроника» и «Качество электроэнергии».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Влияние динамики частотного электропривода мостового крана на электромагнитную совместимость / Д.С. Лимаров// Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы X Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 178-182.

[2] Классификация режимов работы кранов и их механизмов [электронный ресурс]. – 2015 – Режим доступа: [www.i-Mash.ru](http://www.i-Mash.ru).  
Машиностроение: новости, статьи, каталог машиностроительных заводов.

[3] Яуре А.Г., Певзнер Е.М. Крановый электропривод: Справочник. – Энергоатомиздат, 1988. – 344 с.: ил.

[4] Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

[5] Проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М. А. Авербух, В. А. Кузнецов, Д. Н. Коржов, А. А. Коробкин, Д. С. Лимаров// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Транспорт и энергетика. – 2013. - №5 (36). – С. 203-208. – ISSN 2071-7318.

[6] Особенности обеспечения электромагнитной совместимости в промышленных электрических сетях напряжением 0,4 кВ/М. А. Авербух, Д.С. Лимаров, А.А. Пацев // Современная наука: теория и практика: материалы II Международной научно-практической конференции / под ред. Б. М. Синельникова. – Ставрополь: СевКавГТУ, 2011. – С. 150-154.

[7] Васильев Б.Ю. Электропривод. Энергетика электропривода. Учебник. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. –268 с.

[8] ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Стандартинформ, 2013. – 16 с.

[9] Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. Пособие для вузов/ О.З. Попков. 3-е изд., стереот. – М. Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.: ил.

[10] Гидалевич, Е.Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при несинусоидальном напряжении // Промышленная энергетика. - 1990. - № 7. - С. 24-30.

[11] Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 186 с

[12] Шидловский, А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. - Киев: Наук, думка, 1985. - 268 с.

[13] Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Е.В. Иванова; под ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека. - Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2006. - 432 с.

[14] Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. - М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.

[15] Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях / Пер. с англ. - М13] Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. Изд. 2-е. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.

[16] Климов В. П., Москалев А. Д. Способы подавления гармоник в системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2003. № 6.

[17] Вагин Г. Я., Севостьянов А. А., Юртаев С. Н. Выбор типа и параметров фильтрокомпенсирующих устройств в электрических сетях с дуговыми печами. - Промышленная энергетика, 2009, № 11.

[18] Климов В. П., Москалев А. Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2002. № 5.

[19] Николаев, А.В. Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока: Дне... канд. тех. наук. - СПб.: 2005. - 161 с.

[20] Особенности использования активного фильтра в узле нагрузки с нелинейным потребителем трубогибного стана / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / редколлегия Г. С. Подгородецкий, Ю. И. Еременко и др. - Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 2014. – Т. 2. – С. 133-138.

[21] Оценка электромагнитной совместимости при нестационарных режимах работы кранового электропривода/ Д.С. Лимаров // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: материалы Международной молодежной научной конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - Т. 3. – С. 240-244.

[22] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: Энергия, 1974.

[23] Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибного стана УЗТМ-465 / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // – Промышленная энергетика. Качество электроэнергии. – 2015. - №1 (138). - С. 48-54. – ISSN 0033-1155.

[24] Приборы для измерений электрических величин и показателей качества электроэнергии «Энергомонитор 3.3Т»: Руководство по эксплуатации МСЗ.055.028 РЭ; НПП Марс-Энерго, 2010. – 150 с.

[25] Кубацкий В.Г. Контроль несинусоидальности напряжения в электрических сетях. – Электричество. 1991. №6, С. 17-22.

[26] Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

[27] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736с.: ил.

[28] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс, СПб: Питер, 2008. 288 с.

[29] Автоматизированный электропривод переменного тока шахт и подъемных установок/ М.А.Авербух, - Норильский индустриальный институт, 2006. 242 с.

[30] Анализ гармонических составляющих в пакете Matlab. / Д.С. Лимаров // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014.

[31] Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. Заведений/ Г.Г. Соколовский – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с .

[32] Оценка электромагнитной совместимости при нестационарных режимах работы кранового электропривода/ Д.С. Лимаров // Поколение будущего: взгляд молодых ученых: материалы Международной молодежной научной конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2012. - Т. 3. – С. 240-244.

[33] Оценка гармонических составляющих тока и напряжения кранового частотного электропривода с помощью виртуальной модели/ Д.С. Лимаров // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 27-30.

[34] Бахтиаров, К. Н. Электроэнергетика: учеб. пособие / К. Н. Бахтиаров, Н. Ю. Шевченко; ВолгГТУ, Волгоград, 2010. – 70 с.

[35] Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

[36] Расчет гармонических составляющих напряжения и тока в питающей сети ППЧ-АД электропривода подъема мостового крана / М. А. Авербух, Д.С. Лимаров // Молодежь и научно-технический прогресс:



материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / составители Т. С. Таничева, М. В. Уваров и др. – Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2014. – Т. 1. – С. 85 – 88.

[37] Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab: материалы V международной научной конференции. – Харьков: ФЛП Шейнина Е.В., 2011. – 711 с.

[38] Основные особенности обеспечения электромагнитной и электромеханической совместимости в электроустановках промышленных предприятий / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, А. А. Пацев, Д. С. Лимаров // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: материалы XVI международной научно-практической конференции / научный редактор А. П. Кудинов. – СПб: Политехнический университет, 2013. – С. 163 – 173.

[39] Лабунцов В.А. Однофазные полупроводниковые компенсаторы пассивной составляющей мгновенной мощности // В.А. Лабунцов, Дайжун Чжан // Электричество. – 1993. - №12.

[40] Крутиков К.К. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода / К.К. Крутиков, В.В. Рожков// Электричество. – 2011. – №2.

[41] Мещеряков В. Н., Хабибуллин М. М. Система управления параллельным активным фильтро-компенсирующим устройством на базе релейного регулятора тока в трехфазных электрических сетях / К.К. Крутиков, В.В. Рожков// Электрические комплексы и системы управления. – 2012. –№2.

[42] Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 632 с.

[43] Parkatti P., Salo M., Tuusa H. Experimental results for a current source shunt active power filter with series capacitor / IEEE Power Electronics Specialists Conference, 15-19 June 2008, pp. 3814-3818.

[44] Куликов, Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб. пособие / Ю.А. Куликов. - Новосибирск: НГТУ, М.: ООО «Издательство АСТ», 2003.-283 с.

[45] Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы / С.А. Ульянов. - М.: Энергия, 1970. - 519 с.

[46] Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке: пер. с чешек. / Р. Дрехслер. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 112 с.

[47] Люতারевич, А.Г. Повышение качества электроэнергии за счет снижения несинусоидальности кривой напряжения / Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич, С.Ю. Долингер, В.В. Харламов; Омский гос. техн. ун-т - Омск, 2009. - 14 с. - Деп. в ВИНТИ 30.09.09, № 606. - В 2009.

[48] Люতারевич, А.Г. Применение методов контроля и анализа качества электроэнергии при исследовании систем электроснабжения объектов министерства здравоохранения Омской области / Г.И. Бумагин, А.В Дед, А.Г. Люতারевич; Омский гос. техн. ун-т— Омск, 2008. - 9 с. - Деп. в ВИНТИ 22.02.08, № 151.-В2008.

[49] H. Akagi, E. Watanabe, V. Aredes, Теория мгновенной мощности и ее применение для повышения качества электроэнергии (IEE Press Series on Power Engineering), New York: Wiley, 2007.

[50] R. S. Herrera, P. Salmeryn, H. Kim, «Использование теории мгновенной мощности в задачах компенсации с помощью активных фильтров: различные подходы, расчеты и экспериментальные результаты», IEEE Trans. Ind. Electron., том 55, №1, с. 184-196, янв. 2008.

[51] V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera, M.I. Valla, «Компенсация реактивной мощности и гармоник в сетях среднего напряжения с помощью

активных фильтров», в Proc IEEE PES, Vigo, Spain), Июнь 2007, с. 2510-2515.

[52] V.F. Corasaniti, M.B. Barbieri, P.L. Arnera, M.I. Valla, «Характеристики нагрузок в сетях среднего напряжения с точки зрения использования активных фильтров», в Proc. IEEE PES Transmiss. Distrib. Conf. – Exposition Latin America, Caracas, Venezuela, Авг. 2006, с.1-7.

[53] Асаи К. и др. Прикладные нечеткие системы: Пер. с японского/ Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сэгуно – М.: Мир, 1993 – 368с.

[54] Пантелеев В.И., Колмаков В.О. Электромагнитная совместимость и энергосберегающее оборудование – М.: «Энергетик» №11, 2012.

[55] Srinivasan D., Tan S.S., Chang C.S., Chan E.K. Practical implementation of a hybrid fuzzy neural network for one-day-ahead load forecasting // IEE Proc. Gener. Transm. Distrib. 1998. Vol. 145. № 6.

[56] Fuller R. Fuzzy sets and Fuzzy Logic – [электронный ресурс]. – 2012 – Режим доступа <http://www.aboli.fi/~rfuller/robert.html>.

[57] Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польского И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

[58] Jiang H.Y. Optimization Approach of Sintering Feature Parameter Based on Fuzzy SVM / H.Y. Jiang, Y. Huo, X.J. Zhou, T.Y. Chai // Proceeding of International Symposiums on Information Processing (ISIP), 2008 – P. 412-416.

[59] Jiang H.Y. State recognition of rotary kiln sintering based on genetic algorithm and neural network/ H.Y. Jiang, Y. Huo, X.J. Zhou, T.Y. Chai // Chinese Control and Decision Conference, 2008 – P. 1405-1408.

[60] Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S/ Haykin. – 3rd ed. – Prentice Hall, 2009. – 906p.

[61] Fuller R. Neural Fuzzy Systems – [электронный ресурс]. – 2007 – Режим доступа <http://www.aboli.fi/~rfuller/robert.html>.

[62] Fuller R. Fuzzy relations – [электронный ресурс]. – 2009 – Режим доступа <http://www.aboli.fi/~rfuller/robert.html>.

[63] Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

[64] Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 131 с.

[65] Pedrycz W. Processing In Relational structures: Fuzzy Relational Equations // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. №40/ - P. 77-106.

[66] Plavica V., Petrovacki D. About simple fuzzy control and fuzzy control based relational equations // Fuzzy Sets and Systems. – 1999. №101/ - P. 41-47.

[67] Sessa S/. Some results in the setting of Fuzzy Relational Equations theory // Fuzzy Sets and Systems. – 1984. №14/ - P. 38-48.

[68] Пивкин В.Я., Бакулин Е.П., Кореньков Д.И. Нечеткие множества в системах управления / Под ред. Ю.Н. Золотухина. <http://eportal.da.ru/fuzzy/content.html>.

[69] Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования/ А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров; Риж. техн. ун-т. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

[70] Усков А.А., Котельников С.А., Грубник Е.М., Лаврушин В.М. Гибридные нейросетевые методы моделирования сложных объектов: Монография. – Смоленск: Смоленский филиал ФНО ВПО ЦС ЗФ «Российский университет кооперации», 2011. – 132 с: ил.

[71] Промышленные испытания активного фильтра в промышленных сетях ОАО "Оренбургнефть ТНК-ВР / Б. Н. Абрамович [и др. ] // Промышленная энергетика. - 2008. - N 10. - С. 42-46. - Библиогр.: с. 46

[72] Кудинов Ю.И., Венков А.Г., Келина А.Ю. Моделирование технологических и экологических процессов. – Липецк ЛЭГИ, 2001 – 131 с.

[73] Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. Пособие для бакалавров/ Г.С. Зиновьев. – 5-е изд. испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 201. – 667 с.

[74] Чаплыгин Е.Е. Теория мощности в силовой электронике / Е.Е. Чаплыгин, Н.Г. Калугин // Учебное пособие, М.: Московский энергетический институт, 2006, 56 с.

[75] Чивенков А.И. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / А.И. Чивенков, В.И. Гребенщиков, А.П. Антропов, Е.А. Михайличенко // «Инженерный вестник Дона», 2013. №1

[76] Титов В.Г. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями / В.Г. Титов, А.С. Плехов, К.А. Бинда, Д.Ю. Титов // «Инженерный вестник Дона», 2013. №4

[77] Nokian Capacitors Ltd – MaxSine Active Filter [электронный ресурс]. – 2015 – Режим доступа: [http://www.nokiancapacitors.ru/documents/products/lowvoltage/RU-LV06-05\\_2006-maxsine.pdf](http://www.nokiancapacitors.ru/documents/products/lowvoltage/RU-LV06-05_2006-maxsine.pdf)

[78] Тихомиров В.А. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // Тихомиров В.А, Хватов С.В. // Труды Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. №3 (90), с. 204-215.

[79] Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

[80] Bart Kosko. Fuzzy Thinking. Flamingo. – 1994. 158 p.

[81] Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода // Электричество. - 2000. — № 3. - С. 46-54.

[82] Рябчинский, М.В. Регулятор качества электроэнергии на базе активного фильтра // Электротехника. — 2000. — № 7. — С. 37-41.

[83] Оценка высших гармоник в сетях с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // – Энергетик. – 2015. - №5. - С. 31-34. – ISSN 0013-7278.

[84] Выбор активного фильтра для кранового электропривода/ Д.С. Лимаров // Техника и технологии: пути инновационного развития: материалы III Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 105-110.

[85] Особенности использования активного фильтра в системах электроснабжения с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом: материалы II Международной научно-практической конференции. - Новосибирск, 2015.

[86] Построение системы управления активным фильтром с применением нечеткой логики/ М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // Научное обозрение физико-математических и технических наук в XXI веке: материалы XV Международной научно-практической конференции. – Москва «Prospero», 2015

[87] Д. Прайс. Программирование на языке Паскаль. Практическое руководство. 1987 год. 234 стр

[88] Ю. Федоренко. Алгоритмы и программы на Turbo Pascal. Учебный курс: Питер/ - 2001. 240 с.

[89] М.А. Черкасов. Практический курс программирования на ПАСКАЛЕ. Уч. пособие. 2005 год. 180 стр.


[90] Ник Рендольф, Дэвид Гарднер, Крис Андерсон, Майкл Минутилло, «Visual Studio 2010 для профессионалов», 1184 стр., ISBN 978-5-8459-1683-9, «ДИАЛЕКТИКА», 2011

[91] Гостев В.И. 'Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: «Радиоаматор», 2008. – 972 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ  
0.4 КВ ПРИ РАБОТЕ МОСТОВОГО ОДНОБАЛОЧНОГО КРАНА,  
ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 15 ТОНН

Утверждаю  
Главный энергетик  
ООО Цитробел  
г. Белгород

 Кузубов В.И.

## **Экспериментальные исследования параметров электромагнитной совместимости в низковольтной сети 0.4 кВ при работе мостового однобалочного электрического крана, грузоподъемностью 15 тонн**

### 1. Цель проведения измерений.

Целью проведения эксперимента является определение нижеприведенных показателей электромагнитной совместимости на низкой стороне трансформаторной подстанции, к которой подключены электроприемники однобалочного мостового крана:

- 1.1. Действующее значение напряжения.
- 1.2. Действующее значение тока.
- 1.3. Активная электрическая мощность.
- 1.4. Реактивная электрическая мощность.
- 1.5. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.
- 1.6. Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40.
- 1.7. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока.
- 1.8. Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40.
- 1.9 Активная и реактивная электрическая мощность n-ой гармоники, n от 1 до 40.
- 1.10. Определение напряжения на выходе преобразователя частоты Toshiba Tosvert VF-S11 перед электроприводом передвижения крана.

### 2. Место проведения экспериментов.

2.1. Показатели электромагнитной совместимости в сети 0.4 кВ определяются на низкой стороне согласующего трансформатора ТМПН 100 0.4/0.4 при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1». Подключение прибора осуществляется к трехфазной четырехпроводной сети.

2.2. Напряжение на выходе преобразователя частоты снимается с выходных зажимов преобразователя частоты Toshiba Tosvert VF-S11.

### 3. Подготовительные работы.

3.1. Утвердить план мероприятий и программу проведения экспериментов, обеспечивающих безопасность экспериментов на площадке механического цеха ООО Цитробел.

3.2. Подготовить оборудование и приборы, предназначенные для проведения измерений.

4. Порядок проведения измерений высших гармонических составляющих токов и напряжений на низкой стороне понижающего



трансформатора ТМПН 100 0.4/0.4 при помощи прибора «Энергомонитор – 3.3Т1».

4.1. Собрать схему подключения согласно рис. 1 (подключить питание и измерительные кабели к прибору «Энергомонитор – 3.3Т1»).

4.2. Проверить отсутствие напряжения на подключаемых шинах.

4.3. Подключить токоизмерительные клещи ко вторичной обмотке измерительных трансформаторов.

4.4. Активировать режим регистрации и записи параметров электромагнитной совместимости и электрической сети на приборе «Энергомонитор – 3.3Т1».

4.5. Подключить первичную обмотку измерительных трансформаторов к нагрузке.

4.6. По окончании времени регистрации обесточить первичные обмотки измерительных трансформаторов ТА1 – ТА3 и отсоединить прибор от их вторичных обмоток.

4.7. Произвести анализ полученных параметров высших гармонических составляющих токов и напряжений, при различных режимах работы кранового электропривода

5. Порядок определения напряжения на выходе преобразователя частоты Toshiba Tosvert VF-S11.

5.1. Выставить требуемые пределы измерения на цифровом мультиметре.

5.2. Соединить щупы мультиметра с токоведущими шинами, примыкающими к индуктору, а затем с выходными клеммами Toshiba Tosvert VF-S11. Зафиксировать показания прибора.

**Примечание:** вышеуказанные измерения следует провести при различных повторно-кратковременных режимах работы кранового электропривода.

В табл. 1 приведен перечень приборов, необходимых для выполнения измерений.

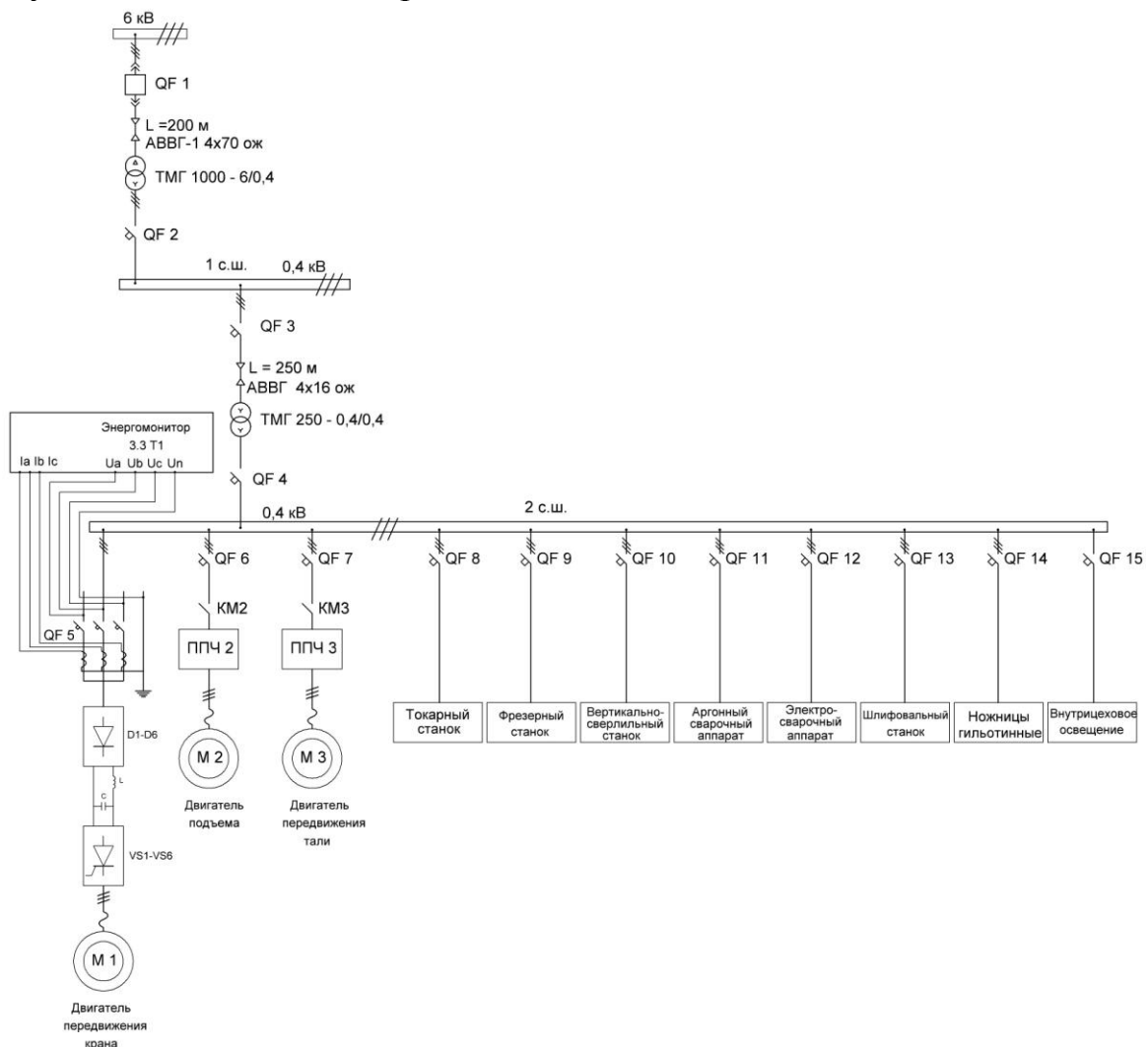
Таблица 1. Перечень приборов для проведения измерений.

№ п/п	Наименование	Погрешность измерения	Обозначение	Предел измерения
1	Мультиметр цифровой MS8217	$\pm 0.5, \%$	V1, V2	1000 В
2	Измерительный прибор «Энергомонитор 3.3Т1»	Ток, А	-	150
		Напряжение, В		622,5
		Фазовый угол, градус		360
		Активная мощность, Вт		3735

		Реактивная мощность, вар	$\pm 4 \%$		3735
		Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40 ( $K_{U(n)}$ ), %	$\pm 5 \%$		49,9
		Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40 ( $K_{I(n)}$ ), %	$\pm 10 \%$		49,9

**Примечание к таблице 1:** в формулах, отмеченных знаком \*, используются следующие величины: I – измеренное значение тока, U – измеренное значение напряжения, P – измеренное значение мощности.

Подключение прибора к распределительной шине 0,4 кВ, осуществляется согласно рис. 1.1:



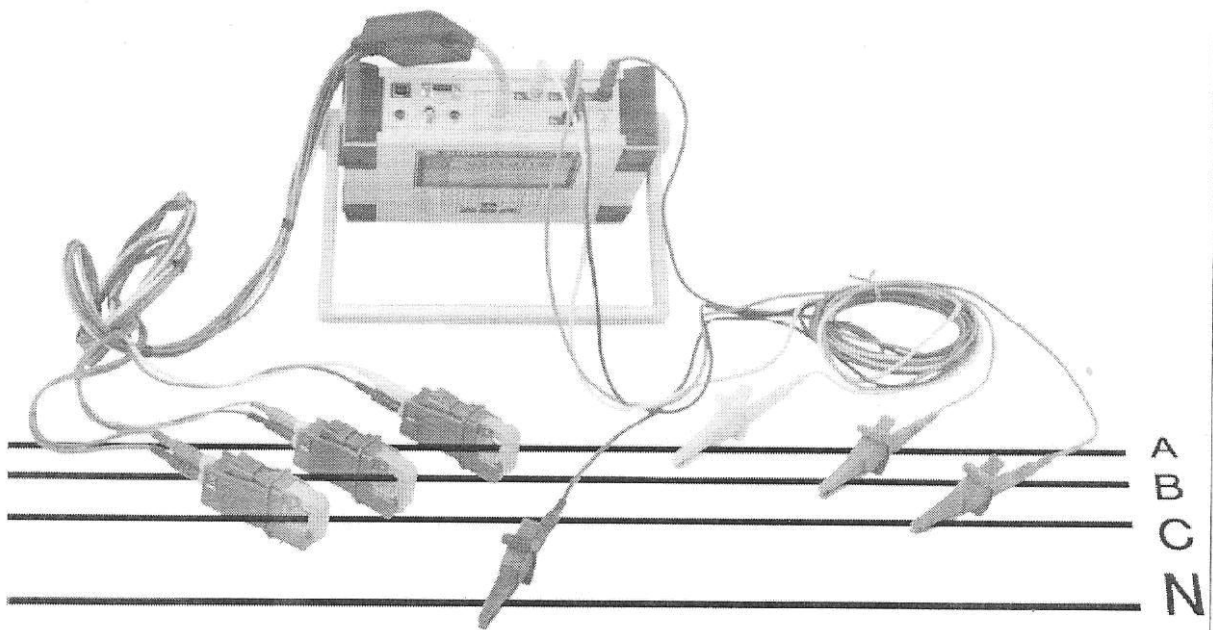


Рис. 1. Схема подключения прибора «Энергомонитор 3.3Т1» к распределительной шине

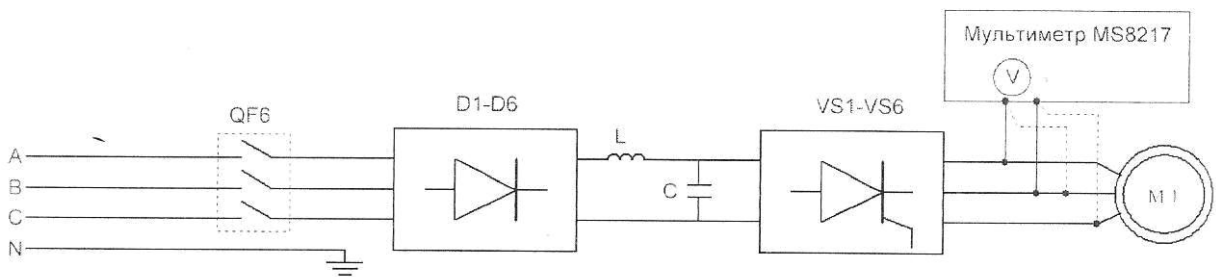


Рис. 2. Схема измерения напряжения на выходе преобразователя частоты VF-S1

Согласовано:

Главный энергетик  
ООО Цитробел

 Кузубов В.И.

18 декабря 2013 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ПРОТОКОЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ, АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

ПРОТОКОЛ №1 - ИЗМЕРЕНИЯ НА ВХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЧАСТОТЫ VFS11-4075

ПРОТОКОЛ №2 - ИЗМЕРЕНИЯ НА ВХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЧАСТОТЫ VFS11-4055

ПРОТОКОЛ №3 - ИЗМЕРЕНИЯ НА ВХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ЧАСТОТЫ VFS11-4055

# ПРОТОКОЛ №1

## измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VF-S11- 4075PL

Дата проведения измерений 18 декабря 2013 года.

Место проведения измерений: ООО Цитробел (Белгород), мостовой однобалочный кран, грузоподъемность 15 тонн.

Перечень приборов, схемы подключения, характеристики приведены в программе эксперимента. Измерения проводились с временным шагом в три секунды.

Результаты измерений приведены в табл. №1, №2, №3, №4.

Таблица №1. Амплитуда первой гармоники тока фазы А и коэффициенты n-ых гармонических составляющих,  $n = 2 \div 10$ .

№	$I_{A(1)}$ , А	$K_{IA(2)}$ , %	$K_{IA(3)}$ , %	$K_{IA(4)}$ , %	$K_{IA(5)}$ , %	$K_{IA(6)}$ , %	$K_{IA(7)}$ , %	$K_{IA(8)}$ , %	$K_{IA(9)}$ , %	$K_{IA(10)}$ , %
1	0,58	0,38	1,53	0,38	64,61	0,32	55,78	0,5	1,22	0,33
2	0,91	0,23	2,03	0,55	74,81	0,28	62,36	0	0,83	0,06
3	1,65	0,91	1,16	0,18	66,8	0,37	46,36	0,42	1,2	0,35
4	2,95	0,58	0,23	0,16	52	0,16	26,61	0,26	1,06	0,08
5	4,38	0,66	0,19	0,52	42,49	0,31	17,73	0,14	0,95	0,25
6	7,09	0,32	2,45	0,08	33,61	0,25	12,17	0,4	0,5	0,23
7	10,71	0,26	0,67	0,17	29	0,17	10,05	0,37	0,38	0,22
8	15,64	0,3	0,31	0,33	26,67	0,38	9,36	0,07	0,5	0,12
9	19,82	0,7	0,37	0,28	25,42	0,28	9,38	0,1	0,28	0,21
10	22,59	1,92	0,75	1,98	25,07	0,6	8,43	0,6	0,23	0,31
11	22,6	2,39	0,92	1,51	25,82	0,52	8,14	0,38	0,31	0,21
12	22,55	2,31	0,85	1,01	24,72	0,44	10,26	0,1	0,46	0,15
13	22,51	2,47	0,9	1,19	24,19	0,47	10,93	0,14	0,39	0,27
14	22,51	2,79	0,77	1,35	24,04	0,58	10,99	0,14	0,38	0,33
15	22,5	2,41	0,75	1,38	23,28	0,39	11,39	0,12	0,4	0,31
16	22,42	2,19	0,7	1,42	22,72	0,47	11,65	0,27	0,34	0,35
17	22,45	2,15	0,63	1,39	23,01	0,37	11,21	0,31	0,32	0,31
18	22,38	3	0,49	1,32	23,62	0,56	10,44	0,25	0,23	0,23
19	22,46	3,66	0,42	1,69	24,46	0,89	9,49	0,42	0,22	0,16
20	22,34	3,15	0,5	2,26	25,59	0,84	8,41	0,6	0,32	0,42
21	22,47	2,45	0,65	1,64	26,47	0,65	7,92	0,62	0,36	0,27
22	22,28	1,27	0,53	0,8	25,68	0,52	9,23	0,33	0,26	0,17

23	22,43	1,02	0,9	0,67	24,32	0,42	11,33	0,28	0,17	0,19
24	22,32	0,59	0,84	0,76	23,31	0,31	11,64	0,23	0,21	0,31
25	22,22	1,38	1,07	0,88	23,15	0,52	11,35	0,44	0,27	0,6
26	22,38	1,6	0,72	1,46	26,62	0,79	8,09	0,59	0,36	0,16
27	22,45	3,34	0,7	1,99	26,38	0,93	7,82	0,48	0,36	0,39
28	22,33	3,78	0,74	1,82	25,19	0,75	8,91	0,44	0,3	0,27
29	22,43	1,95	0,85	1,14	23,85	0,32	10,34	0,63	0,35	0,46
30	22,42	1,34	0,79	1,17	23,01	0,17	11,44	0,33	0,33	0,37
31	22,62	2,48	1	1,15	24,53	0,45	10,4	0,23	0,42	0,19
32	22,84	1,81	0,93	1,93	24,83	0,55	8,59	0,66	0,2	0,25
33	22,8	1,6	1,02	0,95	22,7	0,12	11,01	0,32	0,17	0,19
34	22,65	0,98	0,88	1,18	25,17	0,25	8,8	0,31	0,17	0,15
35	22,52	1,13	0,9	1,51	23,83	0,25	10,32	0,57	0,29	0,44
36	22,34	1,44	0,62	0,93	24,28	0,12	10,95	0,17	0,16	0,21
37	22,45	2,2	0,77	1,96	25,91	0,77	8,48	0,63	0,32	0,38
38	22,46	2,51	0,72	1,49	23,72	0,51	10,35	0,45	0,24	0,29
39	22,51	1,46	0,9	1,03	23,12	0,08	11,51	0,21	0,34	0,27
40	22,56	1,18	1,09	0,76	23,98	0,2	11,11	0,26	0,42	0,15
41	22,56	1,74	1,12	0,74	24,96	0,24	9,64	0,15	0,38	0,14
42	22,73	2,33	1,2	1,2	25,69	0,39	8,37	0,21	0,39	0,14
43	22,77	2,09	0,91	1,67	26	0,46	7,68	0,53	0,24	0,22
44	22,7	1,47	1,03	2,04	25,49	0,28	7,58	0,56	0,27	0,3
45	22,73	1,69	0,98	2,26	24,75	0,32	8,41	0,58	0,32	0,44
46	22,72	2,28	0,97	2,16	24,53	0,47	8,53	0,58	0,29	0,39
47	22,8	2,7	0,95	2,36	25,04	0,63	8,12	0,54	0,32	0,49
48	22,8	2,93	1,07	1,88	25,55	0,59	7,56	0,49	0,34	0,3
49	22,75	2,62	1,14	1,26	25,83	0,27	7,7	0,34	0,37	0,11
50	22,73	2,59	1,16	1,13	25,98	0,17	7,66	0,3	0,39	0,04
51	22,69	2,78	1,16	1,23	25,75	0,18	8,02	0,27	0,39	0,08
52	22,67	2,59	1,21	1,17	25,43	0,2	8,6	0,18	0,43	0,07
53	22,67	1,81	1,11	0,81	24,68	0,16	10	0,25	0,35	0,08
54	22,68	1,54	1,09	0,85	23,73	0,22	11,41	0,22	0,37	0,14
55	22,53	0,88	0,63	0,94	23,05	0,09	11,65	0,21	0,27	0,31
56	22,63	0,77	0,89	1,06	22,62	0,16	11,74	0,38	0,33	0,39
57	22,48	1,73	1,02	1,76	24,36	0,37	9,92	0,7	0,29	0,3
58	22,6	2,27	0,85	1,71	26	0,16	8,35	0,49	0,3	0,2
59	22,39	1,54	0,57	0,73	24,68	0,26	10,63	0,27	0,2	0,12
60	22,54	0,86	0,8	1,12	23,2	0,3	11,51	0,51	0,27	0,41
61	22,64	1,98	1,03	1,92	24,91	0,58	9,01	0,69	0,3	0,36
62	22,65	1,93	0,83	1,69	26,03	0,38	7,91	0,44	0,31	0,23
63	22,61	1,09	0,96	0,82	24,05	0,14	10,13	0,13	0,24	0,09
64	22,59	1,33	0,93	0,73	23,35	0,19	11,04	0,18	0,33	0,11
65	22,82	0,84	0,81	0,69	22,89	0,22	11,1	0,28	0,12	0,16

66	22,77	1,3	0,81	0,95	23,08	0,22	11,11	0,21	0,27	0,17
67	22,77	1,62	0,8	1,1	22,94	0,22	11,16	0,23	0,21	0,21
68	22,7	1,5	0,86	0,95	22,69	0,25	11,36	0,2	0,26	0,24
69	22,55	1,99	0,95	1,17	22,7	0,21	11,2	0,19	0,3	0,25
70	22,7	1,86	0,79	1,2	22,35	0,24	11,42	0,26	0,28	0,31
71	22,61	2,16	0,8	1,26	22,33	0,31	11,31	0,3	0,31	0,28
72	22,7	1,71	0,71	0,98	21,99	0,12	11,52	0,29	0,22	0,32
73	22,76	1,67	0,8	1	22,03	0,19	11,62	0,3	0,18	0,26
74	22,73	1,43	0,87	0,88	22,49	0,24	11,39	0,23	0,19	0,2
75	22,73	0,81	0,92	0,62	23,21	0,23	11,08	0,27	0,19	0,17
76	22,72	1,17	0,88	0,67	23,41	0,3	11,05	0,24	0,13	0,17
77	22,72	1,31	0,9	0,82	23,43	0,14	11,14	0,16	0,14	0,1
78	22,79	1,36	0,91	0,77	23,87	0,1	10,48	0,04	0,19	0,12
79	22,71	1,86	0,9	0,89	24,33	0,24	9,89	0,09	0,18	0,14
80	22,59	2,17	0,99	1,07	24,61	0,31	9,58	0,12	0,22	0,18
81	22,64	1,88	0,98	1,39	24,83	0,17	9,32	0,34	0,16	0,27
82	22,58	1,7	0,75	1,18	24,88	0,22	9,28	0,36	0,21	0,31
83	22,57	1,4	0,83	1,23	25,06	0,37	9,08	0,43	0,17	0,23
84	22,52	1,4	1,06	0,73	24,23	0,29	9,98	0,12	0,21	0,1
85	22,52	0,86	0,95	0,53	23,58	0,35	10,91	0,08	0,24	0,09
86	22,55	0,64	0,86	0,57	23,42	0,33	11,21	0,15	0,21	0,09
87	22,57	1,19	0,99	0,97	23,58	0,24	11,14	0,29	0,2	0,17
88	22,58	0,79	0,8	0,68	23,51	0,16	11,09	0,23	0,22	0,11
89	22,54	1,3	1,15	0,77	23,72	0,31	10,8	0,31	0,31	0,22
90	22,59	1,4	0,9	0,96	23,39	0,26	10,88	0,25	0,23	0,19
91	20,44	0,8	0,7	0,76	24,63	0,19	10	0,26	0,22	0,27
92	16,99	0,38	0,25	0,34	26,42	0,32	9,19	0,07	0,24	0,37
93	12	0,38	0,3	0,29	28,08	0,23	9,66	0,09	0,31	0,3
94	8,01	0,25	3,38	0,17	31,49	0,08	11,14	0,06	0,69	0,14
95	4,92	0,72	0,41	0,29	39,73	0,5	16	0,25	0,47	0,1
96	3,29	1,14	0,58	0,85	49,11	0,4	24,29	0,16	0,49	0,08
97	1,8	0,65	0,98	0,15	64,22	0,38	44,15	0,26	0,72	0,14
98	0,92	0,42	0,47	0,23	72,24	0,05	60,7	0,16	1,12	0,33
99	0,52	0,2	0,2	0,46	58,77	0,59	50,51	0,2	0,3	0,11

Таблица №2. Коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А, n = 11÷20.

№	K <sub>I</sub> A(11), %	K <sub>I</sub> A(12), %	K <sub>I</sub> A(13), %	K <sub>I</sub> A(14), %	K <sub>I</sub> A(15), %	K <sub>I</sub> A(16), %	K <sub>I</sub> A(17), %	K <sub>I</sub> A(18), %	K <sub>I</sub> A(19), %	K <sub>I</sub> A(20), %
1	43,45	0,99	39,77	0,84	0,99	0,81	18,54	1,05	15,24	0,73
2	48	0	39,31	0,11	1,23	0,19	21,57	0,25	18,19	0,54
3	30,06	0,36	25,85	0,42	1,09	0,21	14,2	0,3	13,8	0,42

4	22,44	0,27	17,22	0,14	0,61	0,14	10,31	0,2	13,68	0,03
5	18,93	0,24	10,93	0,19	0,69	0,15	10,35	0,15	10,57	0,21
6	13,64	0,31	6,34	0,12	0,62	0,12	7,95	0,07	7,08	0,17
7	11,39	0,14	5,27	0,25	0,23	0,1	6,34	0,12	5,76	0,19
8	9,82	0,07	5,21	0,14	0,25	0,12	5,3	0,13	5,17	0,13
9	9,2	0,23	5,41	0,09	0,21	0,14	4,94	0,13	5,01	0,16
10	9,01	0,2	4,97	0,24	0,17	0,24	4,69	0,16	4,85	0,22
11	8,43	0,3	5,65	0,22	0,25	0,13	4,49	0,21	4,96	0,12
12	8,86	0,22	5,71	0,14	0,26	0,14	5,35	0,16	4,64	0,19
13	9,59	0,22	4,96	0,09	0,23	0,22	4,46	0,24	5,72	0,21
14	9,93	0,16	5,12	0,14	0,3	0,36	4,33	0,14	5,61	0,31
15	9,6	0,2	6,16	0,06	0,26	0,29	4,99	0,2	5,05	0,25
16	8,95	0,25	7,11	0,13	0,29	0,23	5,47	0,14	5,01	0,27
17	8,68	0,2	7,13	0,12	0,26	0,23	5,69	0,08	5,1	0,23
18	8,42	0,28	6,86	0,22	0,21	0,2	5,44	0,3	5,4	0,22
19	8,56	0,34	6,06	0,32	0,17	0,19	5,13	0,4	5,31	0,15
20	8,88	0,23	4,94	0,28	0,25	0,32	4,6	0,22	4,89	0,27
21	9,1	0,28	4,82	0,24	0,2	0,16	4,39	0,17	5,02	0,34
22	8,32	0,27	6,27	0,11	0,23	0,15	4,95	0,19	4,9	0,12
23	9,72	0,12	5,32	0,14	0,2	0,17	4,53	0,19	5,79	0,25
24	9,64	0,11	6,16	0,13	0,16	0,29	4,85	0,14	5,25	0,29
25	8,7	0,23	7,02	0,08	0,18	0,37	5,44	0,19	5,18	0,19
26	8,79	0,18	5,12	0,2	0,25	0,22	4,64	0,16	4,97	8,79
27	8,64	0,12	5,66	0,13	0,23	0,15	4,74	0,09	4,93	8,64
28	9,77	0,18	5,41	0,17	0,39	0,28	4,56	0,15	5,41	9,77
29	8,83	0,22	6,72	0,13	0,34	0,32	5,27	0,15	5,02	8,83
30	8,51	0,21	5,87	0,12	0,27	0,2	5,06	0,16	5,08	8,51
31	8,88	0,13	5,05	0,13	0,21	0,16	4,45	0,11	4,83	8,88
32	9,12	0,1	5,5	0,09	0,33	0,14	4,92	0,1	5,11	9,12
33	9,9	0,09	5,1	0,09	0,35	0,19	4,26	0,1	5,63	9,9
34	9,49	0,1	6,45	0,17	0,27	0,34	5,13	0,1	4,93	9,49
35	8,51	0,11	7,02	0,13	0,34	0,28	5,51	0,13	5,37	8,51
36	8,9	0,19	5,33	0,19	0,27	0,22	4,89	0,21	4,99	8,9
37	9,03	0,11	5,19	0,14	0,17	0,1	4,49	0,09	4,99	9,03
38	8,71	0,22	6,15	0,12	0,22	0,16	5,35	0,14	4,56	8,71
39	9,78	0,15	5,22	0,15	0,32	0,08	4,69	0,13	5,57	9,78
40	9,92	0,15	4,87	0,13	0,22	0,2	4,09	0,12	6,12	9,92
41	10,12	0,2	4,86	0,12	0,21	0,23	4,04	0,21	6,14	10,12
42	9,99	0,18	5,01	0,1	0,19	0,21	4,25	0,13	5,98	9,99
43	8,81	0,02	5,97	0,12	0,18	0,12	5,37	0,01	4,66	8,81
44	8,19	0,2	6,28	0,17	0,24	0,12	4,73	0,14	5,12	8,19
45	8,97	0,42	5,44	0,21	0,27	0,17	4,43	0,22	5,14	8,97
46	9,27	0,29	4,54	0,27	0,19	0,31	4,52	0,2	4,8	9,27



47	8,8	0,23	5,48	0,34	0,29	0,23	4,9	0,27	5,14	8,8
48	8,53	0,2	6,71	0,13	0,28	0,26	5,43	0,16	5,4	8,53
49	9,11	0,04	6,74	0,12	0,24	0,28	5,41	0,06	5,11	9,11
50	9,25	0,17	5,51	0,09	0,29	0,22	4,8	0,1	5,15	9,25
51	8,79	0,25	5,43	0,3	0,18	0,23	4,8	0,22	4,96	8,79
52	9,24	0,08	5,87	0,15	0,15	0,21	4,81	0,04	5,23	9,24
53	8,86	0,1	5,2	0,13	0,2	0,14	4,49	0,06	4,99	8,86
54	8,58	0,1	6,43	0,14	0,2	0,28	5,18	0,13	5,22	8,58
55	9,53	0,06	5,7	0,1	0,16	0,18	4,92	0,08	5,18	9,53
56	9,01	0,31	5,3	0,32	0,29	0,29	4,63	0,26	5,02	9,01
57	8,59	0,2	6,57	0,22	0,22	0,22	5,34	0,23	5,26	8,59
58	9,56	0,04	6,25	0,13	0,28	0,27	5,03	0,08	5,13	9,56
59	9,79	0,11	5,02	0,09	0,32	0,22	4,28	0,12	5,75	9,79
60	8,57	0,11	5,8	0,21	0,2	0,16	5,41	0,1	4,44	8,57
61	8,1	0,17	5,99	0,19	0,24	0,08	4,77	0,15	4,93	8,1
62	9,23	0,26	4,81	0,2	0,25	0,19	4,37	0,24	4,82	9,23
63	9,12	0,06	4,4	0,24	0,31	0,24	4,46	0,09	4,65	9,12
64	9,03	0,09	4,91	0,2	0,23	0,37	4,76	0,08	4,72	9,03
65	8,81	0,14	5,06	0,16	0,32	0,33	4,68	0,14	4,82	8,81
66	9,06	0,17	4,63	0,24	0,23	0,38	4,69	0,14	4,62	9,06
67	9,15	0,15	4,33	0,31	0,28	0,19	4,49	0,11	4,7	9,15
68	9,15	0,1	4,8	0,11	0,34	0,09	4,33	0,06	4,78	9,15
69	9	0,05	5,05	0,08	0,28	0,15	4,41	0,09	4,92	9
70	8,77	0,1	5,47	0,07	0,18	0,08	4,44	0,14	5,22	8,77
71	8,24	0,14	6,01	0,19	0,3	0,08	4,56	0,09	5,18	8,24
72	8,77	0,1	5,86	0,15	0,25	0,17	5,4	0,11	4,64	8,77
73	9,84	0,11	5,11	0,09	0,36	0,22	4,45	0,11	5,7	9,84
74	9,7	0,03	6,16	0,16	0,23	0,27	4,91	0,05	5,21	9,7
75	8,92	0,08	7,07	0,15	0,28	0,28	5,48	0,12	5,1	8,92
76	8,6	0,19	6,17	0,16	0,38	0,2	5,03	0,19	5,39	8,6
77	8,99	0,07	5,11	0,16	0,28	0,19	4,46	0,12	5,06	8,99
78	8,15	0,2	6,26	0,15	0,12	0,13	5,23	0,13	4,49	8,15
79	7,99	0,1	6,35	0,19	0,11	0,19	5,02	0,17	4,68	7,99
80	8,11	0,1	6,21	0,2	0,18	0,13	5,13	0,2	4,54	8,11
81	8,69	0,09	5,78	0,07	0,21	0,14	5,42	0,07	4,4	8,69
82	9,24	0,12	5,27	0,07	0,23	0,19	4,91	0,1	4,96	9,24
83	9,54	0,13	5,07	0,11	0,19	0,14	4,44	0,14	5,44	9,54
84	9,81	0,1	4,72	0,21	0,19	0,09	4,07	0,13	5,91	9,81
85	9,91	0,12	4,61	0,09	0,17	0,18	3,91	0,12	5,98	9,91
86	10,05	0,14	4,65	0,11	0,22	0,25	4,17	0,09	5,6	10,05
87	9,82	0,14	5,2	0,1	0,19	0,29	4,49	0,07	5,13	9,82
88	9,59	0,06	5,94	0,12	0,2	0,28	4,78	0,08	5,02	9,59
89	8,98	0,1	6,78	0,12	0,19	0,31	5,2	0,08	4,98	8,98

90	9,2	0,12	5,8	0,1	0,19	0,18	5,13	0,13	5,01	9,2
91	9,59	0,12	5,18	0,04	0,23	0,1	5,13	0,09	5,11	9,59
92	10,82	0,05	5,16	0,06	0,25	0,03	5,84	0,17	5,55	10,82
93	13,01	0,06	5,77	0,09	0,47	0,08	7,42	0,17	6,49	13,01
94	17,75	0,23	9,19	0	0,41	0,09	9,84	0,15	9,15	17,75
95	21,78	0,16	15,24	0,35	0,35	0,37	9,93	0,32	12,32	21,78
96	27,82	0,34	24,51	0,2	0,22	0	12,35	0,26	12,57	27,82
97	44,89	0,25	38,69	0,05	0,69	0,16	25,32	0	20,68	44,89
98	47,41	0,58	44,47	0,25	0	0,84	36,03	0,84	30,93	47,41
99	39,57	0	38,89	0,14	0	0	34,36	0,27	31,33	39,57

Таблица №3. Коэффициенты несинусоидальности напряжения и тока в фазе А и значения фазных напряжений.

№	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	8,43	8,26	8,9	50	48,29	49,03	224,94	226,99	225,23
2	8,14	7,6	9,88	50	50	50	224,95	226,97	225,24
3	10,26	9	11,2	50	50	50	224,96	227	225,25
4	10,93	9,74	8,68	50	50	50	224,87	226,89	225,17
5	10,99	10,19	10,55	50	50	50	224,98	226,97	225,23
6	11,39	10,46	9,91	42,93	43,13	43,4	224,73	226,72	224,97
7	11,65	10,61	8,26	36,09	36,41	35,31	224,43	226,41	224,66
8	11,21	10,72	11	32,59	32,89	32,71	223,95	226	224,29
9	10,44	10,55	10,46	31,19	31,52	31,29	223,52	225,58	223,88
10	9,49	10,28	8,49	30,59	30,75	30,95	223,32	225,36	223,67
11	8,41	10,27	11,7	31,07	30,99	31,52	223,37	225,36	223,73
12	7,92	10,12	10,47	31,05	30,32	31,03	223,38	225,35	223,66
13	9,23	10,23	8,82	30,89	30,26	31,14	223,28	225,25	223,59
14	11,33	10,66	10,68	31	30,35	31,09	222,98	224,93	223,31
15	11,64	11,5	8,09	30,84	30,08	30,56	223,05	225,12	223,46
16	11,35	11,09	10,24	30,54	29,84	30,32	222,15	224,26	222,62
17	8,43	9,93	10,4	30,49	29,79	30,11	222,42	224,53	222,88
18	9,25	8,46	9,24	30,71	30,06	30,49	222,74	224,83	223,14
19	10,95	8,11	10,93	31	30,43	30,7	222,86	224,91	223,22
20	11,13	8,21	8,59	31,2	30,79	30,93	222,71	224,9	223,22
21	9,15	7,99	10,75	31,7	30,98	31,26	222,77	224,92	223,28
22	7,77	7,73	8,37	31,44	31,18	30,8	222,79	224,97	223,26
23	10,51	9,47	11,18	31,37	31,1	30,06	222,83	224,95	223,24
24	10,99	11,26	9,71	30,9	30,94	29,89	222,89	225,04	223,33
25	11,37	11,03	9,97	30,63	30,79	29,46	222,84	224,95	223,27
26	10,77	11,36	10,56	30,95	31,49	30,28	222,82	224,95	223,23
27	8,68	11,54	8,73	30,75	31,5	30,9	222,86	225,01	223,3
28	8,23	11,33	10,69	30,42	31,2	30,45	222,76	224,92	223,25
29	10,01	9,64	8,23	29,8	30,73	30,18	222,74	224,91	223,22

30	11,38	8,47	11,07	30,3	30,81	30,85	222,8	224,98	223,31
31	11,13	7,65	9,03	31,13	31,14	31,45	222,83	224,98	223,32
32	11,39	8,05	9,56	31	30,4	31,07	222,2	224,29	222,66
33	11,45	8,94	11,03	30,86	30,44	31,15	222,24	224,35	222,71
34	10,18	10	8,5	30,7	30,18	30,56	222,19	224,35	222,64
35	8,73	11,3	10,82	30,55	29,76	30,5	222,31	224,41	222,76
36	8,09	11,35	8,81	31,21	30,58	30,82	222,15	224,29	222,57
37	7,82	8,26	10,03	31,54	31,11	31,11	222,21	224,37	222,64
38	8,91	7,6	11,08	31,27	31,16	30,59	222,21	224,39	222,61
39	10,34	9	8,69	31,21	31,03	30,03	222,15	224,29	222,53
40	11,44	9,74	9,92	31,23	31,04	30,11	222,16	224,27	222,54
41	10,4	10,19	11,62	31,32	31,08	30,32	222,07	224,34	222,36
42	8,59	10,46	9,94	31,23	30,99	30	222,04	224,41	222,32
43	11,01	10,61	8,68	31,14	31,03	30,57	221,97	224,32	222,23
44	8,8	10,72	10,81	31,49	30,88	31,02	222,1	224,4	222,35
45	10,32	10,55	10,53	31,9	31,02	31,49	222,16	224,4	222,39
46	10,95	10,28	8,2	31,67	30,76	31,19	222,06	224,29	222,26
47	8,48	10,27	11,07	31,3	30,46	30,89	222,16	224,4	222,36
48	10,35	10,12	10,93	30,76	29,77	30,64	222,16	224,41	222,39
49	11,51	10,23	8,45	30,6	29,83	30,4	222,1	224,4	222,38
50	11,11	10,66	10,7	31,1	30,37	31,12	222,01	224,33	222,33
51	9,64	11,5	11,53	30,6	30,87	31,13	221,68	224,01	222,04
52	8,37	11,09	11,84	29,88	30,89	30,54	221,54	223,83	221,88
53	7,68	9,93	11,61	30,73	31,32	30,88	221,58	223,88	221,89
54	7,58	8,46	10,9	30,6	30,83	29,81	221,66	223,93	221,91
55	8,41	8,11	10,76	31,22	30,83	30,21	221,63	223,89	221,89
56	8,53	8,21	10,59	31,56	30,64	31,18	221,88	224,14	222,14
57	8,12	7,99	9,8	30,68	29,91	30,61	221,73	224,01	221,99
58	7,56	7,73	9,39	30,74	29,94	30,66	221,76	224,04	222,03
59	7,7	9,47	9,7	30,89	30,39	31,15	221,74	223,99	222,01
60	7,66	11,26	10	30,96	30,63	31,29	221,76	224	222
61	8,02	11,03	10,37	31,09	30,69	31,55	221,74	224,01	221,97
62	8,6	11,36	10,52	31,18	31,3	31,66	221,67	223,98	221,92
63	10	11,54	10,56	30,56	31,01	31,46	221,59	223,94	221,89
64	11,41	11,33	9,32	30,39	30,77	31,35	221,57	223,9	221,87
65	11,65	9,64	9,44	30,28	30,83	31,3	221,63	223,94	221,91
66	11,74	8,47	10,31	30,51	30,92	31,31	221,53	223,79	221,77
67	9,92	7,65	12,92	30,74	31,02	31,61	221,44	223,69	221,66
68	8,35	8,05	8,9	31	31,49	32,26	221,6	223,84	221,83
69	10,63	8,94	9,88	31,15	31,26	32,04	221,59	223,86	221,85
70	11,51	10	11,2	31,1	31,01	31,6	221,5	223,81	221,79
71	9,01	11,3	8,68	31,01	30,76	31,47	221,58	223,88	221,87
72	7,91	11,35	10,55	30,99	30,51	31,08	221,58	223,83	221,81

73	10,13	8,26	9,91	30,86	30,3	30,88	220,47	222,65	220,73
74	11,04	7,6	8,26	30,77	30,03	30,57	220,53	222,66	220,67
75	11,1	9	11	30,43	29,63	30,31	220,53	222,66	220,66
76	11,11	9,74	10,46	30,92	30,17	30,79	220,52	222,75	220,72
77	11,16	10,19	8,49	31,44	30,89	31,19	220,46	222,71	220,68
78	11,36	10,46	11,7	31,28	30,99	30,42	220,81	223,05	221,02
79	11,2	10,61	10,47	30,66	30,7	29,7	221,04	223,28	221,24
80	11,42	10,72	8,82	30,75	31,1	30,19	220,99	223,23	221,18
81	11,31	10,55	10,68	31,16	31,57	31	220,99	223,24	221,17
82	11,52	10,28	8,09	30,38	31,19	30,9	221,04	223,3	221,23
83	11,62	10,27	10,24	30,31	31,11	30,56	220,92	223,25	221,17
84	11,39	10,12	10,4	30,07	31,11	30,82	220,77	223,05	221,03
85	11,08	10,23	9,24	30,4	31,05	30,68	220,72	223,02	221,01
86	11,05	10,66	10,93	30,28	31,1	30,81	220,7	222,96	220,98
87	11,14	11,5	8,59	30,21	31,03	30,72	220,71	222,96	220,95
88	10,48	11,09	10,75	30,15	30,94	30,6	220,66	222,95	220,9
89	9,89	9,93	8,37	29,98	30,6	30,36	220,59	222,92	220,9
90	9,58	8,46	11,18	29,91	30,55	30,2	220,54	222,96	220,94
91	9,32	8,11	9,71	29,69	30,62	30,3	220,61	223	220,99
92	10,88	8,21	9,97	29,81	30,67	30,26	220,65	222,95	220,95
93	11,4	7,99	10,56	31,06	31,21	31,1	220,63	222,92	220,92
94	11,78	7,73	8,73	32,34	32,39	32,27	220,69	222,99	220,95
95	10	9,47	10,69	34,8	35,12	34,95	220,62	222,92	220,89
96	9,19	11,26	9,94	39,49	40,46	41,34	220,36	222,68	220,65
97	9,66	11,03	8,68	49,19	49,33	49,29	220,23	222,55	220,55
98	11,14	11,36	10,81	50	50	50	220,13	222,46	220,46
99	10,88	11,54	10,53	50	50	50	220,16	222,5	220,49

Таблица №4. Линейные напряжения, активная и реактивная мощность.

№	$U_{AB}$ , В	$U_{BC}$ , В	$U_{CA}$ , В	$P_A$ , Вт	$P_B$ , Вт	$P_C$ , Вт	$Q_A$ , вар	$Q_B$ , вар	$Q_C$ , вар
1	390,56	391,09	391,2	46,06	50,465	52,485	-217,6	-231,79	-227,55
2	390,55	391,08	391,23	88,835	92,085	94,525	-307,18	-319,49	-313,85
3	390,59	391,1	391,25	178,075	182,535	183,775	-412,99	-427,71	-418,55
4	390,39	390,93	391,11	331,115	337,785	336,39	-546,62	-563,23	-550,24
5	390,58	391,05	391,27	499,58	509,21	504,05	-652,53	-668,78	-651,81
6	390,15	390,6	390,82	805,835	824,395	809,8	-793,33	-806,85	-785,53
7	389,63	390,05	390,31	1234,19	1253,91	1242,115	-992,72	-1013,28	-977,89
8	388,83	389,44	389,52	1794,62	1819,71	1804,035	-1265,5	-1304,32	-1277,21
9	388,09	388,72	388,8	2254,9	2281,07	2262,375	-1101,22	-133,17	63,4
10	387,72	388,33	388,47	2530,525	2542,22	2505,55	198,95	1662,81	1641,34
11	387,73	388,39	388,58	2524,46	2546,095	2500,08	-1644,31	1664,01	1653,23
12	387,78	388,27	388,53	2509,28	2548,55	2497,82	-1635,97	1638,54	1626,26
13	387,59	388,14	388,39	2512,1	2550,12	2497,05	-1627,16	1633,99	1633,03

14	387,04	387,64	387,89	2511,165	2550,72	2502,88	-1628,31	1634,6	1631,23
15	387,26	387,99	388,03	2503,51	2554,85	2506,165	-1616,87	1628,27	1614,12
16	385,73	386,56	386,49	2495,39	2551,205	2503,705	389,57	1608,37	1604,19
17	386,2	387	386,95	2494,57	2547,86	2501,645	1585,07	1607,99	1603,19
18	386,76	387,45	387,47	2495,115	2551,16	2514,075	1406	1627,12	1617,23
19	386,95	387,57	387,64	2497,62	2553,87	2514,585	1617,96	1638,74	1628,08
20	386,73	387,67	387,48	2488,025	2550,105	2513,17	1629,56	1653,06	1636,26
21	386,79	387,73	387,6	2490,995	2554,735	2515,675	-628,39	414,04	1654,71
22	386,89	387,74	387,57	2487,52	2552,51	2530,82	-1632,03	-1674,18	1638,18
23	386,95	387,68	387,6	2492,105	2546,01	2546,975	615,52	-1669,2	1613,11
24	387,07	387,84	387,72	2489,46	2535,9	2541,25	1603,31	-15,53	1596,94
25	386,94	387,69	387,65	2486,555	2519,72	2535,075	1592,89	1631,27	1575,76
26	386,94	387,65	387,59	2511,65	2524,505	2547,18	1629,11	1461,73	1622,35
27	387,01	387,8	387,67	2521,65	2522,52	2530,335	1205,76	1251,12	202,33
28	386,82	387,7	387,55	2514,285	2513,04	2513,545	1382,58	1648,38	801,07
29	386,8	387,66	387,5	2516,71	2517,115	2507,185	1564,82	1629,98	1593,29
30	386,9	387,79	387,64	2527,485	2529,03	2502,18	1595,31	1648,81	1624,82
31	386,93	387,77	387,7	2519,835	2544,325	2496,26	-1432,29	1666,3	1645,19
32	385,79	386,6	386,58	2510,175	2553,08	2498,78	-1620,47	1633,08	1628,73
33	385,89	386,72	386,63	2506,505	2554,98	2499,47	-1608,8	1629,11	1632,93
34	385,87	386,65	386,52	2499,015	2555,12	2511,4	-401,46	1620,14	1613,39
35	385,99	386,8	386,75	2491,07	2544,565	2497	592,44	1595,43	1603,29
36	385,78	386,52	386,43	2482,495	2550,665	2508,51	1006,81	1636,87	1625,17
37	385,91	386,67	386,52	2484,71	2550,195	2516,695	-1440,47	-421,53	1645,35
38	385,94	386,65	386,49	2482,975	2547,135	2522,82	-1615,74	-1668,27	1623,52
39	385,8	386,48	386,38	2474,99	2526,65	2521,475	398,44	-1651,72	1595,74
40	385,79	386,47	386,41	2489,3	2544,285	2533,3	-815,22	-1661,44	1605,24
41	385,89	386,4	386,03	2480,32	2542,255	2523,575	-814,37	-1656,66	1601,89
42	385,98	386,44	385,91	2480,435	2541,31	2524,925	2,5	-1654,11	1598,56
43	385,83	386,28	385,78	2487,6	2550,75	2521,335	-1624,36	-1665,14	1621,16
44	386,01	386,43	386,01	2483,06	2556,48	2511,595	-1639,25	-1664,53	1642,4
45	386,06	386,44	386,13	2482,41	2556,355	2503,35	-1659,69	-1252,8	1659,02
46	385,88	386,22	385,94	2494,54	2560,66	2508,765	-5,64	1661,84	1645,07
47	386,07	386,4	386,1	2476,895	2545,355	2491,275	404,73	1629,09	1618,91
48	386,07	386,45	386,12	2484,99	2546,995	2489,505	797,09	1602,72	1605,69
49	386	386,45	386,06	2492,645	2554,235	2492,555	-1003,92	1611,24	1602,97
50	385,85	386,37	385,93	2500,27	2547,94	2481,54	-1628,31	1636,21	1632,04
51	385,26	385,86	385,4	2528,685	2542,51	2500,54	586,43	1656,8	1633,45
52	384,98	385,56	385,15	2521,785	2523,205	2512,885	1386,77	1651,03	805,51
53	385,08	385,59	385,19	2506,645	2517,21	2516,615	1012,39	1039,79	819,87
54	385,22	385,64	385,27	2487,085	2519,905	2526,125	1595,15	1428,95	1582,22
55	385,15	385,58	385,23	2480,435	2540,66	2522,06	-205,61	-1656,09	1606,67
56	385,58	386,01	385,67	2483	2556,12	2500,575	-1234,79	815,69	1638,62

57	385,36	385,77	385,4	2491,3	2553,02	2493,18	599,79	1612,97	1610,03
58	385,4	385,85	385,45	2495,16	2551,38	2490,145	-1605,34	1617,1	1611,01
59	385,32	385,78	385,45	2497,875	2547,855	2484,87	-1618,04	1630,78	1621,41
60	385,38	385,76	385,44	2499,875	2541,645	2475,965	-1617,56	1637,36	1626,14
61	385,37	385,74	385,39	2519,72	2557,465	2490,035	-1635,5	1653,3	1647,66
62	385,28	385,7	385,27	2520,535	2548,24	2495,49	-1642,1	1676,61	1655,35
63	385,17	385,67	385,15	2509,625	2527,285	2476,495	-205,48	1652,02	1631,1
64	385,11	385,61	385,12	2519,895	2534,79	2484,17	799,71	1649,74	1632,32
65	385,2	385,66	385,22	2523,695	2534,53	2485,815	998,16	1649,52	1628,84
66	384,99	385,4	385,03	2522,44	2536,56	2487,395	803,38	1653,53	1631,35
67	384,84	385,2	384,86	2518,235	2537,105	2479,74	-1623,03	1658,06	1640,4
68	385,1	385,47	385,16	2519,115	2542,86	2480,88	-1640,72	1669,89	1451,22
69	385,1	385,53	385,15	2515,92	2541,72	2478,33	-1636,7	1668,29	1658,16
70	384,98	385,44	385,01	2514,09	2539,875	2479,94	-1628,9	1663,72	1448,92
71	385,1	385,57	385,16	2503,685	2538,51	2473,38	-1622,44	1649,11	1640,3
72	385,06	385,44	385,13	2505,78	2551,755	2488,01	-1627,24	1646,32	1623,18
73	383,06	383,48	383,25	2490,94	2542,875	2478,42	-1620,32	1627,96	1618,69
74	383,16	383,4	383,24	2489,665	2539,9	2488,08	-1596,43	1597,29	1586,38
75	383,17	383,39	383,24	2488,96	2545,54	2485,445	-798,78	1586,61	1576,48
76	383,24	383,56	383,25	2470,555	2540,83	2490,695	1000,14	1613,1	1601,64
77	383,15	383,49	383,16	2484,125	2554,32	2507,025	-421,72	197,84	1632,17
78	383,75	384,08	383,75	2472,445	2533,36	2510,82	-402,71	-1653,67	1597,35
79	384,16	384,47	384,14	2478,125	2517,88	2517,18	1592,58	1213,69	1571,97
80	384,07	384,38	384,05	2497,74	2510,67	2483,095	1612,91	1653,79	1606,89
81	384,08	384,37	384,03	2493,595	2500,955	2478,325	1627,82	1248,07	1424,12
82	384,17	384,47	384,13	2510,29	2512,19	2493,395	798,56	1641,01	1198,85
83	384,02	384,41	383,95	2505,62	2510,265	2494,005	1581,7	1646,13	1404,76
84	383,69	384,12	383,73	2504,595	2506,06	2499,185	1583,17	1642,51	1604,37
85	383,62	384,09	383,66	2509,26	2507,815	2503,695	1388,81	1644,58	1408,41
86	383,53	383,99	383,63	2507,655	2513,085	2506,115	989,49	1640,23	1408,65
87	383,56	383,95	383,61	2507,435	2518,995	2504,585	1376,61	1631,2	1602,24
88	383,52	383,92	383,51	2495,79	2505,4	2495,7	1366,85	1622,28	1588,97
89	383,4	383,93	383,44	2484,975	2492,98	2484,02	1387,18	1651,23	-5,79
90	383,36	384,05	383,41	2483,585	2491,08	2468,83	992,43	1646,57	805,86
91	383,46	384,11	383,53	2219,96	2251,75	2224,665	-995,43	1647,27	1625,9
92	383,48	383,98	383,55	1837,29	1872,505	1850,415	-888,92	-513,77	223,8
93	383,45	383,92	383,51	1288,69	1315,625	1299,545	-1280,89	-1315,88	-1283,74
94	383,59	384	383,57	847,035	860,24	847,715	-1002,39	-1034,29	-1004,71
95	383,45	383,9	383,46	515,2	529,405	523,215	-793,28	-818,47	-794,39
96	383,01	383,51	383,02	337,23	348,46	345,39	-653,21	-674,93	-652,79
97	382,77	383,31	382,83	174,18	183,93	182,215	-554,12	-576,15	-557,24
98	382,6	383,16	382,66	79,285	86,87	87,39	-407,32	-427,35	-411,44
99	382,67	383,21	382,7	33,705	41,065	41,545	-283,75	-303,82	-292,72

В таблицах №1 – 4 приведены значения следующих величин:

- $I_{A(1)}$ , А – амплитудное значение первой гармоники фазы А, А;
- $K_{I A(n)}$ , % - коэффициент n-ой гармонической составляющей,  
 $n = 2 \div 20$ , %;
- $K_U$ , % - коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- $K_I$ , % - коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения, В;
- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , - линейные напряжения, В;
- $P_A, P_B, P_C$ , - активная мощность для каждой фазы, Вт;
- $Q_A, Q_B, Q_C$ , - реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Мастер по автоматизации технологических процессов и метрологии

ООО Цитробел



Лимаров Д.С.

Инженер-электроник

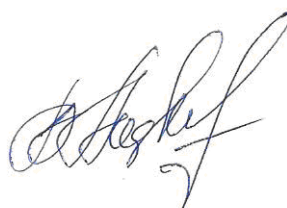
ООО Цитробел



Аветисян Д.М.

Инженер-электрик

ООО Цитробел



Андросов В.Д.

Научный руководитель

д.т.н., профессор



Авербух М.А.



## ПРОТОКОЛ №2

### измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VF-S11- 4055PL

Дата проведения измерений 27 декабря 2013 года.

Место проведения измерений: ООО Цитробел (Белгород), мостовой однобалочный кран, грузоподъемность 15 тонн.

Перечень приборов, схемы подключения, характеристики приведены в программе эксперимента. Измерения проводились с временным шагом в три секунды.

Результаты измерений приведены в табл. №1, №2, №3, №4.

Таблица №1. Амплитуда первой гармоники тока фазы А и коэффициенты n-ых гармонических составляющих,  $n = 2 \div 10$ .

№	$I_{A(1)}$ , А	$K_{IA(2)}$ , %	$K_{IA(3)}$ , %	$K_{IA(4)}$ , %	$K_{IA(5)}$ , %	$K_{IA(6)}$ , %	$K_{IA(7)}$ , %	$K_{IA(8)}$ , %	$K_{IA(9)}$ , %	$K_{IA(10)}$ , %
1	0,63	2,93	7,63	2,49	79,48	1,47	58,96	3,43	7,57	3,46
2	2,29	3,08	7,66	3,46	86,62	2,66	68,71	2,37	7,55	3,19
3	2,59	3,06	4,21	1,25	47,79	2,39	28,32	1,28	2,68	0,57
4	3,35	2,58	2,01	3,04	56,47	1,49	34,85	1,32	2,33	2,44
5	4,62	1,24	5,99	1,09	86,97	1,17	72,88	1,11	6,44	1,34
6	4,94	2,93	5,76	1,34	73,34	2,22	51,99	0,75	5,59	2,22
7	5,51	3,66	4,38	1,59	46,12	0,78	21,71	3,62	4,24	2,62
8	5,66	4,39	5,12	2,77	86,55	1,91	67,99	3,46	5,93	2,59
9	5,82	2,3	7,9	1,92	86,43	1,95	72,69	1,6	6,84	1,65
10	6,01	0,95	3,62	1,21	38,51	0,95	14,01	1,13	3,89	0,9
11	6,33	3,2	8,09	3,62	79,84	2,72	62,03	2,26	7,88	3,17
12	7,92	1,87	7,73	1,43	86,46	1,38	72,96	1,25	7,64	2,12
13	9,06	1,11	4,26	1,1	67,15	1,48	47,93	0,79	4,72	1,58
14	11,77	3,23	3,48	1,11	50,54	1,61	30,41	0,67	4,91	1,8
15	12,43	2,23	8,48	3,29	87,33	2,55	73,33	1,72	9,94	2,58
16	12,47	2,24	6,46	2,4	86,76	2	73,51	1,83	7,49	2,17
17	12,65	0	3,16	1,62	34,65	0	9,42	1,49	3,25	2,26
18	12,72	2,19	7,91	0,64	83,67	1,59	68,39	2,17	6,89	0,88
19	12,46	1,73	10,97	1,36	78,7	1,47	67,6	1,45	8,7	2,43
20	12,01	1,74	11,16	1,54	87,15	2,46	75,48	1,65	11,23	1,69
21	13,44	1,18	8,65	1,48	85,37	1,52	74,96	0,96	9,31	1,14
22	13,08	0,92	7,78	1,16	83,53	1,27	73,4	0,66	8,67	1,3

23	13,44	0,95	7,81	0,71	83,65	1,07	73,94	0,77	8,65	0,95
24	12,78	0,82	7,86	1,23	83,6	1,25	74,26	1,15	8,83	1,31
25	12,82	0,4	8,59	1,08	83,79	1,11	74,34	0,46	9,71	1,64
26	11,95	0,93	7,48	1,46	84,03	2,04	74,88	0,7	8,56	2,66
27	9,38	0,58	7,31	0,83	66,24	0,87	56,42	0,44	6,45	2,41
28	7,42	0,39	1,17	0	10,92	0	3,54	0	0,39	1,52
29	643	0,39	3,43	0	19,7	0	5,22	0,42	3,26	1,88
30	5,39	1,56	2,82	0	23,08	0,39	6,74	0	4,33	1,94
31	4,95	2,79	3,23	0,39	19,42	0	3,59	0,78	3,57	1,81
32	4,42	0,83	3,23	0	15,12	0	3,94	0	0,41	1,13
33	3,64	0,78	0	0	17,95	0	3,51	0,39	1,56	1,41
34	2,39	0,39	2,37	0	19,2	0	3,91	0	4,69	1,15
35	1,91	0	2,26	0	17,82	0	4,79	0	0,78	1,22
36	0,65	0	2,78	0	19,14	0	5,58	0	3,79	1,39

Таблица №2. Коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А, n = 11÷20.

№	K <sub>I</sub> A(11), %	K <sub>I</sub> A(12), %	K <sub>I</sub> A(13), %	K <sub>I</sub> A(14), %	K <sub>I</sub> A(15), %	K <sub>I</sub> A(16), %	K <sub>I</sub> A(17), %	K <sub>I</sub> A(18), %	K <sub>I</sub> A(19), %	K <sub>I</sub> A(20), %
1	3,01	36,67	2,76	7,93	4,29	20,91	5,5	15,77	3,22	8,43
2	2,77	40,16	2,14	7,82	3,41	18,28	3,68	19,47	2,58	9,98
3	0,47	18,61	1,79	2,96	3,21	10,64	3,37	6,57	0,97	5,12
4	2,32	23,32	0,95	3,86	3,04	13,15	3,99	6,12	1,42	4,27
5	1,85	36,65	1,36	6,49	2,51	15,29	2,61	16,2	1,72	6,65
6	2,46	22,46	1,73	5,77	4,32	9,29	2,28	11,84	2,28	4,54
7	0,89	19,72	2,03	3,27	2,76	11,37	3,9	9,94	2,18	6,18
8	2,85	38,07	1,13	6,46	2,47	17,98	3,87	13,89	2,58	5,53
9	1,85	34,68	1,49	5,55	1,91	14,12	2,25	14,63	1,94	4,94
10	0,95	12,29	0,9	5,62	0,45	7,38	2,01	3,95	0,45	5,55
11	2,34	38,53	2,82	8,39	2,5	15,78	1,97	15,27	1,97	8,8
12	2,26	36,76	1,55	7,28	2,78	14,52	3,44	15,55	1,9	6,24
13	2,72	23,98	1,87	7,33	2,8	13,89	3,15	12,82	1,01	8,08
14	3,2	20,4	1,35	5,46	3,24	10,7	2,45	7,93	0	8,32
15	2,66	40,66	0,53	9,3	2,75	17,02	3,1	19,13	1,06	8,01
16	2,41	37,3	0,79	7,14	2,45	15,52	2,74	16,85	1,54	5,45
17	1,52	10,35	0,64	3,65	3,06	6,97	2,38	5,78	0,64	7,81
18	1,88	40,96	1,35	7,39	1,42	20,05	1,8	16,78	1,4	7,02
19	1,94	30,6	1	7,89	1,74	12,96	1,91	14,63	2,35	6,86
20	1,81	38,66	1,16	9,81	1,31	14,88	0,9	17,81	1,28	7,44
21	1,13	34,31	0,71	8,95	1,61	11,72	1,32	17,06	1,23	6,69
22	1,41	30,28	0,58	7,43	0,88	7,48	1,28	12,99	1,13	5,58
23	1,15	30,23	0,51	6,72	1,13	7,08	1,45	11,33	0,93	4,52
24	1,22	31,02	0,63	6,99	0,82	7,64	0,84	12,43	1,01	5,23

25	1,39	31,68	0,39	7,94	1,16	7,86	1,36	12,7	0,52	5,21
26	1,84	31,63	0,61	7,27	0,87	7,73	1,37	11,81	0,42	4,75
27	0,73	23,39	0,46	4,72	1,94	5,14	1,38	6,87	0,5	4
28	1,17	4,68	1,2	0,39	0,81	4,68	0,86	1,59	0,39	1,95
29	1,22	8,92	1,56	6,16	0,78	9,99	0,92	5,25	0,78	3,77
30	0,78	11,1	1,56	1,95	1,17	10,17	0,94	2,77	0,78	5,92
31	1,22	15,16	0,78	4,13	0,92	6,82	0,89	2,63	0,81	4,83
32	2,76	8,84	1,59	5,87	2,09	7,99	1,05	8,57	1,22	4,72
33	0,78	7,45	1,29	1,95	2,99	5,08	0,78	3,33	1,86	3,92
34	2,19	23,59	3,69	1,37	4,32	16,52	2,82	8,76	1,21	6,33
35	2,67	37,5	3,8	8,68	6,18	27,92	2,87	16,54	2,97	7,82
36	2,35	32,64	3,8	4,97	4,62	12,23	3,69	13,92	5,42	6,24

Таблица №3. Коэффициенты несинусоидальности напряжения и тока в фазе А и значения фазных напряжений.

№	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	3,33	3,26	3,36	50	50	50	215,92	215,26	214,32
2	7,88	7,77	7,72	50	50	50	215,8	215,13	214,19
3	11,85	11,66	11,79	50	50	50	215,86	215,18	214,27
4	14,26	13,97	13,97	47,09	47,98	45,98	215,87	215,2	214,3
5	14,46	14,07	13,96	33,51	35,9	30,19	215,64	214,97	214,05
6	14,37	14,07	13,9	39,88	38,34	34,37	215,81	215,14	214,22
7	14,05	13,85	13,86	44,11	39,1	38,38	215,87	215,2	214,28
8	14,34	14,18	14,08	41,35	44,94	36,22	215,73	215,05	214,13
9	14,22	14,21	14,09	38,12	38,84	30,97	215,65	215,01	214,09
10	14,16	13,94	13,88	38,15	37,14	32,61	215,93	215,3	214,38
11	14,15	13,92	13,87	40,56	36,23	36,38	215,88	215,25	214,3
12	14,3	14,15	14,21	40,34	38,38	33,09	216,55	215,96	214,97
13	14,24	14,04	14,02	37,01	40,04	36,21	218,03	217,54	216,46
14	13,87	13,86	14,15	37,45	41,7	31,98	218,31	217,82	216,74
15	14,09	14,22	14,21	39,17	38,37	33,75	218,48	218	216,92
16	13,9	14,07	14,37	35,15	41,29	35,81	218,92	218,46	217,4
17	13,86	13,85	14,05	36,46	41,67	33,01	219,53	219,1	218,02
18	14,08	14,18	14,34	36,29	40,93	33,6	219,35	218,91	217,84
19	14,09	14,21	14,22	37,17	39,6	34,82	219,71	219,28	218,23
20	13,88	13,94	14,16	38,31	35,89	30,33	219,9	219,46	218,42
21	13,9	14,07	14,15	40,91	40,36	36,45	221,83	221,59	220,36
22	14,37	14,07	13,9	38,35	42,53	32,27	221,73	221,49	220,25
23	14,05	13,85	13,86	36,04	44,28	31	221,72	221,47	220,23
24	14,34	14,18	14,08	38,79	41,9	30,39	221,77	221,5	220,28
25	14,22	14,21	14,09	39,83	42,76	30,53	221,75	221,47	220,24
26	14,08	13,85	14,26	38,68	37,83	33,54	221,9	221,62	220,38
27	14,12	13,89	13,75	38,55	40,91	30,94	220,29	219,84	218,74

28	14,26	13,97	13,97	46,06	45,12	41,22	220,75	220,28	219,2
29	14,46	14,07	13,96	48,18	41,97	39,94	220,72	220,23	219,15
30	14,37	14,07	13,9	48,19	46,77	44,1	220,85	220,31	219,55
31	14,18	14,13	14,12	42,63	48,06	47,29	220,95	219,93	219,68
32	14,38	14,01	13,87	43,55	44,21	45,88	220,9	219,85	219,62
33	13,95	14,01	13,82	49,59	46,71	48,34	220,81	219,74	219,47
34	14,24	14,04	14,04	42,02	47,36	44,62	220,85	219,8	219,54
35	10,67	10,56	10,45	50	49,09	50	220,94	219,89	219,64
36	5,92	5,89	5,8	50	50	50	221,23	220,23	219,93

Таблица №4. Линейные напряжения, активная и реактивная мощность.

№	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A,$ вар	$Q_B,$ вар	$Q_C,$ вар
1	17,26	17,52	16,57	30,96	22,6	30,92	-97,22	-88,2	-87,32
2	33,99	34,36	33,98	118,24	120,32	120,2	-114,49	-105,48	-106,3
3	98,22	98,21	97,92	177,68	180,2	186,8	-132,87	-127,74	-127,59
4	110,1	109,84	110,04	312,44	294,88	335,48	-170,07	-165,72	-167,79
5	134,22	134	134,16	336,88	331,08	342,52	-188,01	-188,04	-191,71
6	185,83	185,66	185,87	405,32	374,76	396,64	-203,98	-198,79	-205,68
7	253,72	253,52	254,02	497,88	476,96	484,8	-242,99	-245,26	-251,01
8	308,58	308,65	308,5	553,08	543,4	587,24	-264,91	-266,25	-274,18
9	326,39	326,59	326,47	793,5	785,3	789,4	-297,38	-298,5	-306,07
10	326,35	326,68	326,43	1102,4	937,6	1016,4	-306,15	-305,36	-316,26
11	325,94	326,33	326,29	1322,28	1309,56	1385,44	-334,83	-338,78	-350,53
12	326,31	326,6	326,47	1528,52	1562,08	1585,56	-348,58	-354,39	-372,1
13	325,45	325,01	325,33	1580,56	1615,32	1650,68	-543,02	-563,68	-582,69
14	333,46	333,55	333,41	1699,6	1713,84	1761,56	-597,97	-608,13	-625,01
15	332,91	332,87	332,96	1544,36	1567,96	1601,6	-550,02	-579,01	-590,05
16	333,02	333,12	333,07	1562,16	1575,16	1616,44	-559,04	-561,96	-584,03
17	333,4	333,38	333,46	1584,32	1597,34	1632,23	-563,68	-582,69	-590,05
18	3208,87	329,01	329,17	1585,56	1528,52	1562,08	-543,02	-550,02	-559,04
19	322,58	322,39	322,79	1585,56	1650,68	1655,68	-584,03	-597,97	-625,01
20	330,8	330,6	330,67	1567,16	1581,16	1605,44	-582,69	-597,97	-625,01
21	330,52	330,52	330,48	1509,22	1522,28	1545,64	-550,02	-563,68	-590,05
22	330,42	330,3	330,42	1506,19	1517,25	1538,68	-543,02	-559,04	-584,03
23	330,66	330,74	330,82	1518,32	1532,27	1555,65	-561,96	-579,01	-608,13
24	301,49	301,08	300,92	1322,28	1309,56	1385,44	-551,75	-564,67	-591,28
25	302,73	302,65	302,68	1065,16	1033,28	1111,6	-451,04	-461,93	-481,88
26	293,05	293,05	293,06	750	756,52	788,64	-297,38	-298,5	-306,07
27	93,35	293,24	293,19	695,48	656,96	690,84	-272,26	-278,64	-293,18
28	282,99	283,14	283,15	537,44	528,08	534,64	-264,91	-266,25	-274,18
29	275,6	275,55	275,33	493,72	494,32	503,64	-347,6	-358,86	-372,98
30	273,49	273,08	273,92	354,2	344,16	361,04	-278,7	-282,25	-291,3
31	272,49	272,36	272,18	323,84	315,52	335,28	-248,33	-247,61	-258,55

32	258,55	257,82	258,15	262,48	242,76	252,16	-175,31	-170,78	-173,7
33	187,56	187,19	187,31	124,24	117,08	131,36	-138,73	-132,13	-136,05
34	123,17	122,76	122,85	67,96	60,08	68,8	-103,03	-93,43	-92,65
35	91,93	91,59	92	17,16	11,04	13,72	-100,99	-91,46	-91,08
36	39,59	38,97	39,47	5,8	4,6	7,52	-90,14	-83,09	-83,35

В таблицах №1 – 4 приведены значения следующих величин:

- $I_{A(1)}$ , А – амплитудное значение первой гармоники фазы А, А;
- $K_{I A(n)}$ , % - коэффициент n-ой гармонической составляющей,  
 $n = 2 \div 20$ , %;
- $K_U$ , % - коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- $K_I$ , % - коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения, В;
- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , - линейные напряжения, В;
- $P_A, P_B, P_C$ , - активная мощность для каждой фазы, Вт;
- $Q_A, Q_B, Q_C$ , - реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Мастер по автоматизации технологических процессов и метрологии

ООО Цитробел



Лимаров Д.С.

Инженер-электроник

ООО Цитробел



Аветисян Д.М.

Инженер-электрик

ООО Цитробел



Андросов В.Д.

Научный руководитель

д.т.н., профессор



Авербух М.А.

## ПРОТОКОЛ №3

### измерений гармонического состава напряжения и тока, активной и реактивной потребляемой мощности на входе преобразователя частоты VF-S11- 4055PL

Дата проведения измерений 27 декабря 2013 года.

Место проведения измерений: ООО Цитробел (Белгород), мостовой однобалочный кран, грузоподъемность 15 тонн.

Перечень приборов, схемы подключения, характеристики приведены в программе эксперимента. Измерения проводились с временным шагом в три секунды.

Результаты измерений приведены в табл. №1, №2, №3, №4.

Таблица №1. Амплитуда первой гармоники тока фазы А и коэффициенты n-ых гармонических составляющих,  $n = 2 \div 10$ .

№	$I_{A(1)}$ , А	$K_{IA(2)}$ , %	$K_{IA(3)}$ , %	$K_{IA(4)}$ , %	$K_{IA(5)}$ , %	$K_{IA(6)}$ , %	$K_{IA(7)}$ , %	$K_{IA(8)}$ , %	$K_{IA(9)}$ , %	$K_{IA(10)}$ , %
1	1,2	2,08	9,68	2,08	17,39	3,69	5,81	3,25	11,27	2,91
2	1,44	0,92	3,8	1,78	18,07	3,68	2,72	0,78	3,79	3,04
3	1,92	2,76	7,25	3,46	22,34	3,94	4,45	2,01	6,87	4,83
4	2,56	8,97	15,77	9,47	80,33	6,49	58,01	7,52	14,46	11,7
5	3,6	5,31	4,41	4,73	90	4,21	70,02	5,81	10,57	4,42
6	4,44	6,11	5,44	7,84	47,25	5,91	34,48	2,76	6,46	5,72
7	5,84	5,86	7,75	5,89	50,57	5,01	32,54	1,88	7,02	5,03
8	6,24	5,09	9,08	5,12	88,74	3,68	74,64	2,92	7,02	3,5
9	8,72	4,51	18,09	3,06	73,82	2,44	59,69	2,92	13,69	1,82
10	10,28	4,6	7,88	6,74	43,84	5,91	30,94	4,66	6,99	5,72
11	12,32	6,69	14,91	5,53	89,36	3,99	75,32	5,3	13,81	4,17
12	13,74	1,72	22,58	2,43	87,58	2,5	75,53	2,88	16,83	2,71
13	14,41	6,01	7,98	4,33	29,36	6,42	6,95	2,66	6,15	4,49
14	15,28	9,47	16,25	12,38	81,97	8,68	70,6	9,44	12,2	10,36
15	14,16	3,78	27,5	4,33	86,92	3,33	77,9	3,84	19,25	2,82
16	14	6,62	9,2	4,95	66,48	2,97	51,07	2,46	6,83	2,65
17	14,32	8,39	14,21	9,39	46,92	9,36	30,5	6,28	10,43	11,23
18	14	3,65	17,19	2,86	89,41	2,14	74,93	2,73	11,1	2,16
19	13,97	6,61	9,76	6,11	89	2,77	77,83	4,49	6	3,67
20	14,33	7,67	7,99	6,48	30,23	8,01	18,64	5,06	6,49	6,68
21	14,05	6,39	8,98	6,68	84,15	3,85	73,04	4,07	7,57	7,63
22	13,26	6,11	14,64	4,11	90,45	6,19	81,59	7,53	10,76	4,22

23	11,52	4,64	21,12	4,73	85,4	3,36	79,91	4,73	17,3	5,62
24	9,04	2,71	14,14	1,77	88,12	2,28	78,17	3,19	12,06	1,85
25	7,84	4,6	12,14	4,32	84,69	1,14	76,96	3,73	9,99	2,47
26	5,92	2,17	13,56	1,59	82,72	1,42	77,58	1,83	12,81	1,82
27	5,12	1,43	13,82	1,69	84,56	1,27	78,35	1,65	11,8	2,06
28	3,04	3,32	13,33	2,86	84,59	1,94	79,24	2,1	11,87	2,33
29	2,64	1,22	12,77	1,06	83,35	1,16	77,74	1,26	13,09	1,34
30	1,68	1,97	13,24	1,43	85,68	1,3	78,86	2,35	10,51	1,62
31	1,36	5,21	9,09	4,65	50,97	3,51	44,25	2,9	6,67	2,56
32	1,28	2,17	13,56	1,59	82,72	1,42	77,58	1,83	12,81	1,82

Таблица №2. Коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А, n = 11÷20.

№	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>I</sub>
	A(11), %	A(12), %	A(13), %	A(14), %	A(15), %	A(16), %	A(17), %	A(18), %	A(19), %	A(20), %
1	13,72	4,55	9,94	3	11,2	2,08	6,16	3,91	7,07	1,66
2	4,35	3,97	10,51	0,39	4,3	2,51	6,29	2,12	4,31	4,2
3	8,08	2,9	5,89	0,69	8,9	1,1	6,63	1,6	7,55	4,07
4	40,06	7,26	35,52	7,7	12,18	6,4	32,6	7,46	28,59	7,28
5	51,13	2,14	39,17	4,23	12,28	4,78	17,2	4,05	15,76	2,24
6	23,42	7,2	26,99	1,84	2,97	4,82	10,88	4,21	10,42	3,18
7	23,53	5,23	14,66	6,55	4,87	8,15	9,32	4,3	10,58	5,07
8	48,73	2,65	37,76	2,96	5,02	5,02	19,06	3,16	15,66	3,64
9	30,26	1,44	25,72	0,81	7,32	1,9	10,24	1,87	11,3	2,75
10	19,88	6,86	24,03	2,46	6,99	6,13	14,01	4,37	11,68	3,35
11	50,74	3,62	48,26	4,53	8,45	4,47	25,79	5,46	23,07	3,78
12	46,28	2,97	37,66	3,59	8,84	2,75	17,78	2,88	16,48	3,99
13	6,1	5,73	7,16	2,75	7,52	2,38	10,5	3,85	9,18	3,27
14	44,04	9,17	48,92	6,93	8,28	7,29	30,59	6,2	26,24	6,2
15	42,93	3,27	41,12	4,82	10,33	5,12	16,09	2,14	16,76	6,14
16	33,83	2,21	30,76	2,38	4,42	1,92	19,44	3,13	11,92	3,62
17	17,15	9,89	18,46	7,25	5,77	13,39	16,59	10,18	15,3	5,86
18	51,05	1,77	40,51	3,78	5,04	3,27	20,67	1,78	13,55	4,85
19	48,81	2,63	42,08	2,61	4,18	2,42	18,71	3,22	14,6	3,22
20	15,18	6,82	19,58	6,78	6,43	4,59	16,5	5,14	16,45	6,78
21	52,39	4,61	47,69	3,95	6,01	7,51	27,43	6,43	18,16	2,63
22	55,04	5,32	52,33	7,71	6,85	5,57	28,42	4,06	26,67	8,23
23	44,79	3,22	46,62	4,98	10,53	6,65	19,87	3,36	21,17	7,66
24	49,24	1,82	42,01	2,8	7,77	1,65	16,33	1,66	15,25	2,45
25	41,38	1,4	36,85	2,11	8,1	1,56	10,62	1,55	11,43	1,28
26	38,37	1,35	35,69	1,32	9,37	2,08	7,15	1,63	7,84	1,74
27	42,71	1,52	38,18	1,43	7,56	1,99	10,66	1,52	9,44	2
28	42,94	1,35	40,47	1,55	9,34	2,02	11,45	2,08	11,67	2,23



29	38,96	1,51	36,33	1,92	10,53	2,12	6,52	2,41	7,97	2,69
30	45,83	1,13	39,39	2	6,14	1,09	12,5	1,38	10,24	2,08
31	21,89	2,8	21,2	2,45	4,47	4,62	5,93	3,97	5,33	2,34
32	12,93	3,92	15,27	0,92	0,78	7,33	7,52	3,86	6,14	2,4

Таблица №3. Коэффициенты несинусоидальности напряжения и тока в фазе А и значения фазных напряжений.

№	$K_{U_A}, \%$	$K_{U_B}, \%$	$K_{U_C}, \%$	$K_{I_A}, \%$	$K_{I_B}, \%$	$K_{I_C}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	5,8	5,89	5,92	50	50	50	220,43	220,65	219,86
2	7,72	7,77	7,88	50	50	50	220,38	220,58	219,79
3	11,79	11,66	11,85	50	50	50	220,19	220,4	219,57
4	13,97	13,97	14,26	33,44	48,74	45,97	219,54	219,7	218,89
5	13,96	14,07	14,46	48,9	45,03	46,86	219,61	219,79	218,95
6	13,9	14,07	14,37	49,04	40,69	42,12	218,12	218,12	217,42
7	13,86	13,85	14,05	46,53	50	43,24	217,6	217,59	216,89
8	14,08	14,18	14,34	47,72	44,3	47,85	217,59	217,67	216,9
9	13,88	13,94	14,16	47,95	46,42	47,2	217,75	217,82	217,05
10	13,87	13,92	14,15	47,33	37,88	42,3	217,83	217,92	217,16
11	14,21	14,3	14,15	44,82	50	44,5	217,73	217,83	217,06
12	14,15	13,87	13,86	46,3	44,7	40,05	217,55	217,66	216,88
13	14,21	14,09	14,22	47,18	41,65	42,78	217,18	217,26	216,51
14	14,37	13,9	14,07	49,01	47,71	48,41	217,11	217,18	216,42
15	14,05	13,86	13,85	49,32	41,32	42,07	217,03	217,12	216,32
16	14,34	14,08	14,18	49,8	49,26	44,85	217,18	217,25	216,47
17	14,22	14,09	14,21	46,51	49,67	38,09	217,2	217,27	216,48
18	14,16	13,88	13,94	50	44,5	48,77	216,98	217,08	216,28
19	14,15	13,9	14,07	42,17	49,34	42,99	217,05	217,1	216,31
20	13,9	14,37	14,07	43,87	50	42,25	217,42	217,47	216,72
21	13,86	14,05	13,85	49,27	46,42	42,96	217,26	217,31	216,53
22	14,26	14,08	13,85	39,24	35,46	43,71	217,15	217,21	216,43
23	13,75	14,12	13,89	48,88	49,69	47,57	217,25	217,34	216,53
24	13,97	13,97	14,26	42,66	42,64	48,42	216,63	216,69	215,88
25	13,96	14,07	14,46	48,17	44,5	45,89	216,27	216,35	215,53
26	13,9	14,07	14,37	42,85	42,92	46,5	216,14	216,22	215,38
27	14,12	14,13	14,18	47,01	44,97	46,2	216,09	216,16	215,36
28	13,87	14,01	14,38	46,77	46,38	40,46	216,09	216,16	215,37
29	13,82	14,01	13,95	50	47,06	47,63	216,21	216,26	215,48
30	10,45	10,56	10,67	50	50	50	218,19	218,34	217,5
31	5,9	5,35	5,22	50	50	50	217,26	217,18	216,51
32	3,36	3,26	3,33	50	50	50	218,41	218,38	217,76

Таблица №4. Линейные напряжения, активная и реактивная мощность.

№	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
---	-------------	-------------	-------------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------

1	381,89	381,28	381,48	23,44	23,76	19,68	-97,24	-89,01	-88,96
2	381,79	381,15	381,4	102,52	109,24	100,12	-100,98	-92,36	-92,32
3	381,44	380,82	381,03	161,28	148,24	113,96	-135,09	-128,85	-131,94
4	380,27	379,64	379,87	354,88	357,48	364,52	-145,72	-133,71	-141,88
5	380,45	379,76	379,97	411,96	411,12	431,8	-152,77	-144,82	-161,71
6	377,65	377,06	377,33	462,84	450,52	489,2	-160,78	-158,43	-164,86
7	376,73	376,14	376,46	559,4	558,36	514,28	-163,43	-154,88	-166,97
8	376,79	376,18	376,46	638,4	641,4	757,28	-242,45	-236,14	-259,07
9	377,06	376,46	376,73	718,68	706,4	804,48	-232,62	-224,8	-230,46
10	377,19	376,67	376,89	1016	936,48	936,59	-243,63	-246,28	-263,91
11	377,05	376,49	376,71	1202,73	1024,32	1112,28	-318,8	-301,61	-336,61
12	376,74	376,2	376,39	1350,28	1362,96	1478,2	-417,53	-406,78	-409,36
13	376,02	375,57	375,75	1677,64	1680,12	1820,44	-507,46	-511,62	-524,42
14	375,91	375,42	375,6	1552,72	1572,92	1701,92	-584,79	-581,24	-515,65
15	375,8	375,29	375,42	1498,6	1504,92	1631,88	-525,18	-510,82	-521,2
16	376,05	375,53	375,71	1543	1555,8	1674,6	-527,83	-523,48	-528,98
17	376,08	375,55	375,73	1505,08	1545,16	1662,88	-502,49	-595,13	-511,21
18	375,74	375,2	375,36	1488,32	1501,23	1505,63	-523,79	-536,52	-543,53
19	375,82	375,24	375,45	1397,93	1402,35	1404,75	-503,36	-597,14	-596,58
20	376,45	375,92	376,12	1234,75	1286,22	1290,02	-533,95	-530,86	-536,77
21	376,2	375,6	375,82	1123,11	1195,32	1198,78	-495,78	-510,3	-522,96
22	376,01	375,43	375,63	996,28	900,12	822,88	-487,66	-495,9	-422,61
23	376,23	375,63	375,79	760,56	771,4	744,04	-419,06	-412,01	-451,23
24	375,1	374,52	374,72	632,96	640,24	611,52	-384,07	-346,68	-382,04
25	374,49	373,92	374,1	525,16	560,2	601,64	384,67	-389,81	-337,7
26	374,27	373,67	373,85	423,48	426,88	482,8	-271,6	-268,17	-217,22
27	374,16	373,61	373,78	325,96	330,68	381,8	-294,4	-248,7	-295,58
28	374,16	373,62	373,81	305,56	316,28	351,68	-239,07	-283,45	-218,73
29	374,35	373,8	374,01	193,48	202,44	169,32	-171,23	-178,31	-115,83
30	377,94	377,33	377,43	104,96	109,12	128,64	-167,96	-142,75	-160,17
31	376,08	375,52	375,76	28,08	32,04	36,72	-91,22	-84,05	-83,82
32	378,15	377,59	377,86	1,36	1,24	6,12	-97,24	-89,01	-88,96

В таблицах №1 – 4 приведены значения следующих величин:

- $I_{A(1)}$ , А – амплитудное значение первой гармоники фазы А, А;
- $K_{I A(n)}$ , % - коэффициент n-ой гармонической составляющей,  
 $n = 2 \div 20$ , %;
- $K_U$ , % - коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- $K_I$ , % - коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения, В;

- $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ , - линейные напряжения, В;
- $P_A, P_B, P_C$ , - активная мощность для каждой фазы, Вт;
- $Q_A, Q_B, Q_C$ , - реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Мастер по автоматизации технологических процессов и метрологии

ООО Цитробел



Лимаров Д.С.

Инженер-электроник

ООО Цитробел



Аветисян Д.М.

Инженер-электрик

ООО Цитробел



Андросов В.Д.

Научный руководитель

д.т.н., профессор



Авербух М.А.

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КАНДИДАТСКОЙ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛИМАРОВ ДЕНИСА СЕРГЕЕВИЧА В  
РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ООО ЦИТРОБЕЛ Г. БЕЛГОРОД



Общество с ограниченной ответственностью «Цитробел»

308015, Россия, г. Белгород,  
ул. Чичерина, 8

Тел. (4722) 22 76 37, 32 72 77  
Тел. Факс (4722) 32 02 35, 22 76 61, 22 76 62

E-mail: [citrobel@belmail.ru](mailto:citrobel@belmail.ru), [s@citrobel.ru](mailto:s@citrobel.ru)  
[www.citrobel.ru](http://www.citrobel.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ООО «Цитробел»

Немцев Д.В.

“ 15 ” июня 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Лимарова Дениса Сергеевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы «Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий с частотным крановым электроприводом», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при производстве моногидрата лимонной кислоты, безводной лимонной кислоты, цитрата натрия (пищевого и технического) в ООО «Цитробел» для транспортировки грузов в виде экспериментальных данных по исследованию энергоэффективности работы мостового однобалочного крана грузоподъемностью 15 тонн.

Использование указанных результатов позволяет повысить энергоэффективность работы мостового однобалочного крана грузоподъемностью 15 тонн, а также других мостовых кранов различной грузоподъемности, применяемых в производстве.

Отдел кадров

Согласовано

Главный энергетик  
ООО «Цитробел»

Катунина Е.П.

Кузубов В.И.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ПРОГРАММНЫЙ КОД ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРА В СУ АФГ,  
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ФУНКЦИЙ  
ПРИНАДЛЕЖНОСТЕЙ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНОЙ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ  
ПЕРЕМЕННЫХ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА (ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРА).

```

program MinMax;
uses crt;
type mas=array[1..2,1..4] of real;
var
dvig1,dvig2,dvig3,itog:mas;
u1,u2,u3:array[1..3] of real;
Uk,Uc,Uc1,Uc2,Uc3:real;
i,j,k,n,Nuc:integer;

procedure vvod;
begin
write('Dvig1');
writeln;
for i:=1 to 4 do
begin
write('vvedite min',i,'=');
readln(dvig1[1,i]);
write('vvedite max',i,'=');
readln(dvig1[2,i]);
end;
write('Dvig2');
writeln;
for i:=1 to 4 do
begin
write('vvedite min',i,'=');
readln(dvig2[1,i]);
write('vvedite max',i,'=');
readln(dvig2[2,i]);
end;
write('Dvig3');
writeln;
for i:=1 to 4 do
begin
write('vvedite min',i,'=');
readln(dvig3[1,i]);
write('vvedite max',i,'=');
readln(dvig3[2,i]);
end;
write('Vvedite intervaly dlya vyhodnoi velichiny');
writeln;
for i:=1 to 4 do
begin
write('vvedite min',i,'=');
readln(itog[1,i]);
write('vvedite max',i,'=');
readln(itog[2,i]);
end;
end;

function predel(u,uold:real;dvig:mas):real;
var
usum:real;

```





```

    end
else
    begin
        {-----PL-----}
        if C=3 then
            begin
                Nuc:=3;
            end
        else
            begin
                {-----PEL-----}
                if C=4 then
                    begin
                        Nuc:=3;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end
else
    begin
        {-----ES-----}
        if B=2 then
            begin
                {-----PES-----}
                if C=1 then
                    begin
                        Nuc:=4;
                    end
                else
                    begin
                        {-----PS-----}
                        if C=2 then
                            begin
                                Nuc:=3;
                            end
                        else
                            begin
                                {-----PL-----}
                                if C=3 then
                                    begin
                                        Nuc:=3;
                                    end
                                else
                                    begin
                                        {-----PEL-----}
                                        if C=4 then
                                            begin
                                                Nuc:=3;
                                            end;
                                        end;
                                    end;
                                end;
                            end;
                        end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

    end;
  end
else
  begin
    {-----EB-----}
    if B=3 then
      begin
        {-----PES-----}
        if C=1 then
          begin
            Nuc:=3;
          end
        else
          begin
            {-----PS-----}
            if C=2 then
              begin
                Nuc:=3;
              end
            else
              begin
                {-----PL-----}
                if C=3 then
                  begin
                    Nuc:=3;
                  end
                else
                  begin
                    {-----PEL-----}
                    if C=4 then
                      begin
                        Nuc:=2;
                      end;
                    end;
                  end;
                end;
              end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
else
  begin
    {-----VB-----}
    if B=4 then
      begin
        {-----PES-----}
        if C=1 then
          begin
            Nuc:=3;
          end
        else
          begin
            {-----PS-----}
            if C=2 then
              begin

```

```

        Nuc:=3;
    end
else
    begin
        {-----PL-----}
        if C=3 then
            begin
                Nuc:=2;
            end
        else
            begin
                {-----PEL-----}
                if C=4 then
                    begin
                        Nuc:=2;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;
end;
end
else
    begin
        {-----EL-----}
        if A=2 then
            begin
                {-----VS-----}
                if B=1 then
                    begin
                        {-----PES-----}
                        if C=1 then
                            begin
                                Nuc:=4;
                            end
                        else
                            begin
                                {-----PS-----}
                                if C=2 then
                                    begin
                                        Nuc:=3;
                                    end
                                else
                                    begin
                                        {-----PL-----}
                                        if C=3 then
                                            begin
                                                Nuc:=4;
                                            end
                                        else

```

```

begin
  {-----PEL-----}
  if C=4 then
    begin
      Nuc:=3;
    end;
  end;
end;
end
else
begin
  {-----ES-----}
  if B=2 then
    begin
      {-----PES-----}
      if C=1 then
        begin
          Nuc:=4;
        end
      else
        begin
          {-----PS-----}
          if C=2 then
            begin
              Nuc:=3;
            end
          else
            begin
              {-----PL-----}
              if C=3 then
                begin
                  Nuc:=3;
                end
              else
                begin
                  {-----PEL-----}
                  if C=4 then
                    begin
                      Nuc:=2;
                    end;
                  end;
                end;
              end;
            end
          end
        end
      end
    end
  else
    begin
      {-----EB-----}
      if B=3 then
        begin
          {-----PES-----}
          if C=1 then

```

```

begin
  Nuc:=3;
end
else
begin
  {-----PS-----}
  if C=2 then
    begin
      Nuc:=2;
    end
  else
    begin
      {-----PL-----}
      if C=3 then
        begin
          Nuc:=3;
        end
      else
        begin
          {-----PEL-----}
          if C=4 then
            begin
              Nuc:=2;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end
end
else
begin
  {-----VB-----}
  if B=4 then
    begin
      {-----PES-----}
      if C=1 then
        begin
          Nuc:=3;
        end
      else
        begin
          {-----PS-----}
          if C=2 then
            begin
              Nuc:=3;
            end
          else
            begin
              {-----PL-----}
              if C=3 then
                begin
                  Nuc:=2;
                end
            end
          end
        end
      end
    end
  end
end

```



```

end
else
begin
{-----ES-----}
if B=2 then
begin
{-----PES-----}
if C=1 then
begin
Nuc:=3;
end
else
begin
{-----PS-----}
if C=2 then
begin
Nuc:=3;
end
else
begin
{-----PL-----}
if C=3 then
begin
Nuc:=2;
end
else
begin
{-----PEL-----}
if C=4 then
begin
Nuc:=2;
end;
end;
end;
end
end
else
begin
{-----EB-----}
if B=3 then
begin
{-----PES-----}
if C=1 then
begin
Nuc:=3;
end
else
begin
{-----PS-----}
if C=2 then
begin
Nuc:=2;

```



```

    end
  else
    begin
      {-----PL-----}
      if C=3 then
        begin
          Nuc:=2;
        end
      else
        begin
          {-----PEL-----}
          if C=4 then
            begin
              Nuc:=1;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end
  end
else
  begin
    {-----VB-----}
    if B=4 then
      begin
        {-----PES-----}
        if C=1 then
          begin
            Nuc:=3;
          end
        else
          begin
            {-----PS-----}
            if C=2 then
              begin
                Nuc:=2;
              end
            else
              begin
                {-----PL-----}
                if C=3 then
                  begin
                    Nuc:=1;
                  end
                else
                  begin
                    {-----PEL-----}
                    if C=4 then
                      begin
                        Nuc:=1;
                      end;
                    end;
                  end;
                end;
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

        end;
    end;
end;
end;
end;
end
else
begin
    {-----VH-----}
    if A=4 then
    begin
        {-----VS-----}
        if B=1 then
        begin
            {-----PES-----}
            if C=1 then
            begin
                Nuc:=3;
            end
        else
        begin
            {-----PS-----}
            if C=2 then
            begin
                Nuc:=3;
            end
        else
        begin
            {-----PL-----}
            if C=3 then
            begin
                Nuc:=2;
            end
        else
        begin
            {-----PEL-----}
            if C=4 then
            begin
                Nuc:=2;
            end;
        end;
    end;
    end;
end
end
else
begin
    {-----ES-----}
    if B=2 then
    begin
        {-----PES-----}
        if C=1 then
        begin

```

```

    Nuc:=3;
  end
else
  begin
    {-----PS-----}
    if C=2 then
      begin
        Nuc:=2;
      end
    else
      begin
        {-----PL-----}
        if C=3 then
          begin
            Nuc:=2;
          end
        else
          begin
            {-----PEL-----}
            if C=4 then
              begin
                Nuc:=1;
              end;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end
  end
else
  begin
    {-----EB-----}
    if B=3 then
      begin
        {-----PES-----}
        if C=1 then
          begin
            Nuc:=2;
          end
        else
          begin
            {-----PS-----}
            if C=2 then
              begin
                Nuc:=2;
              end
            else
              begin
                {-----PL-----}
                if C=3 then
                  begin
                    Nuc:=1;
                  end
                else

```



```

end;

begin
clrscr;
vvod;
i:=0;
j:=0;
for i:=1 to 3 do
begin
u1[i]:=0;
u2[i]:=0;
u3[i]:=0;
end;

repeat
write('vvedite u1=');
readln(u1[1]);
write('vvedite u2=');
readln(u2[1]);
write('vvedite u3=');
readln(u3[1]);

Uc1:=predel(u1[1],u1[2],dvig1);
u1[3]:=n;
u1[2]:=u1[1];
Uc2:=predel(u2[1],u2[2],dvig2);
u2[3]:=n;
u2[2]:=u2[1];
Uc3:=predel(u3[1],u3[2],dvig3);
u3[3]:=n;
u3[2]:=u3[1];

until ((Uc1>0) or (Uc2>0) or (Uc3>0));
Uc:=(Uc1+Uc2+Uc3)/3;
writeln('Uc=',Uc:5:3);
writeln('n predela=',u1[3]:2);
writeln('n predela=',u2[3]:2);
writeln('n predela=',u3[3]:2);

pravila(u1[3],u2[3],u3[3]);
writeln('n predela Nuc=',Nuc:2);

Uk:=itog[1,Nuc]+(itog[2,Nuc]-itog[1,Nuc])*Uc;
writeln('Tok kompensacii Uk=',Uk:5:2);

readln;
readkey
end.

```