

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Белгородский государственный технологический университет
имени В.Г. Шухова**

На правах рукописи



КОРЖОВ ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В
СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ С ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ
ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА**

Специальность: 05.14.02 – «Электрические станции и
электроэнергетические системы»

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., доцент

Авербух Михаил Александрович

Белгород-2015

Содержание

Введение_____	4
1. Анализ проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева_____	11
1.1. Краткая характеристика электроустановок индукционного нагрева как источников высших гармоник тока и напряжения_____	11
1.2. Сущность проблемы обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей_____	18
1.3. Способы снижения уровня высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения_____	24
2. Анализ гармонического состава тока и напряжения нелинейных электроприемников электроустановок индукционного нагрева_____	32
2.1 Проведение экспериментальных измерений гармонического состава токов и напряжений на стороне 0,4 кВ цехового понижающего трансформатора_____	32
2.2. Разработка имитационной модели системы электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465_____	43
2.3. Анализ результатов измерения, моделирования ПКЭ_____	60
3. Построение фильтрокомпенсирующего устройства для систем электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева_____	65
3.1. Гибридный фильтр как средство снижения уровня высших гармоник тока и напряжения_____	65
3.2. Анализ алгоритмов формирования управляющего воздействия для силовой части активных фильтров_____	66
3.3. Разработка системы управления активного фильтра на базе системы нечеткого вывода_____	74
3.4. Реализация системы нечеткого вывода в среде <i>Matlab</i> для формирования управляющего сигнала активного фильтра_____	86

4. Оценка эффективности использования гибридного параллельного фильтра в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева _____	94
4.1. Выбор элементов и обоснование структуры гибридного параллельного фильтра _____	94
4.2. Построение имитационной модели гибридного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткой логики в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева _____	102
4.3. Синтез нечеткого регулятора для системы управления активной частью гибридного параллельного фильтра _____	114
4.4. Оценка экономической эффективности внедрения гибридного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткой логики в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева _____	120
Заключение _____	126
Список литературы _____	128
ПРИЛОЖЕНИЯ _____	138
Приложение 1. Программа и протоколы проведения измерений электрических параметров высокочастотного генератора трубогибочного стана УЗТМ-465 _____	138
Приложение 2. Листинг и свидетельство о государственной регистрации программы расчета углов управления преобразователя частоты установки индукционного нагрева стальных труб _____	162
Приложение 3. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в производство соединительных элементов трубопроводов ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» _____	166
Приложение 4. Результаты расчетов производной тока задания $\frac{di_{зад}}{dt}$ для полного периода тока нагрузки при частоте 50 Гц _____	167

Введение

Актуальность проблемы. В настоящее время в РФ широко используются электроустановки индукционного нагрева (ЭИН) для поверхностной закалки, гибки труб, высокочастотной пайки и т.д. Принцип индукционного нагрева основан на создании электромагнитного поля высокой частоты, которое индуцирует в нагреваемом теле вихревые токи. Для создания индуцированных токов используются высокочастотные генераторы на базе статических силовых полупроводниковых преобразователей. В зависимости от вида электротехнологической нагрузки применяются статические преобразователи различной конфигурации и построенные на разнообразной элементной базе. Статические полупроводниковые преобразователи являются генераторами высших гармоник тока и напряжения в электрическую сеть, входящую в состав системы электроснабжения промышленного предприятия. В связи с этим особую значимость имеют проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) как способности технических средств нормально функционировать в условиях электромагнитных воздействий, не создавая при этом недопустимых помех для других технических средств.

Проблеме ЭМС в системах электроснабжения промышленных предприятий посвящены работы российских и зарубежных ученых: Шваб А., Бадер М.П., Хабигер Э., Вагин Г.Я., Жежеленко И.В., Железко Ю.С, Аррилага Д. и др. В этих трудах установлена природа генерирования высших гармоник в питающую сеть, влияние высших гармоник на элементы сети и предложены средства для их компенсации. Особенности работы установок индукционного нагрева, такие как различные режимы нагрева заготовок, широкий диапазон изменения мощности нагрева в зависимости от геометрических размеров заготовок, не позволяют автоматически применять полученные решения для оценки ЭМС в электрических сетях, «запитывающих» такие установки. ЭИН могут быть построены с применением различных типов полупроводниковых преобразователей токов и напряжений, но все они относятся к потребителям с нелинейными вольт-

амперными характеристиками и, тем самым, являются генераторами высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Диссертационные работы Довгуна В.П., Люгаревича А.Г., Боярской Н.П., Темербаева С.А., Коваль А.А. в разной степени посвящены изучению систем управления активными и гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами. Авторы сходятся во мнении, что активные и гибридные фильтры целесообразно применять для компенсации высших гармоник тока и напряжения нелинейных электроприемников с широким диапазоном нагрузок. Перспективным направлением компенсации высших гармоник тока и напряжения в сети является использование ГПФ.

Таким образом, исследования в области обеспечения ЭМС в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева (СЭПП с ЭИН) являются актуальными.

Цель работы: обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий путем компенсации токов искажения с применением гибридных параллельных фильтров с системой управления на базе нечеткого вывода (на примере трубогибочного стана УЗТМ-465).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Анализ электроустановок индукционного нагрева как электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками, генерирующих в систему электроснабжения промышленных предприятий высшие гармонических составляющие токов и напряжений.

2. Анализ существующих способов компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения для обеспечения электромагнитной совместимости электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками в системах электроснабжения промышленных предприятий.

3. Экспериментальное исследование гармонического состава напряжения сети и тока в питающей сети электроснабжения, потребляемого

электроустановками индукционного нагрева, для различных технологических процессов гибки труб.

4. Разработка имитационных моделей систем электроснабжения промышленных предприятий для оценки показателей качества электроэнергии, характеризующих электромагнитную совместимость в системе электроснабжения электроустановок индукционного нагрева.

5. Обоснование структуры и конфигурации элементов фаззи-регулятора в составе системы управления гибридного параллельного фильтра.

6. Разработка алгоритма формирования массива нечетких правил как структурного элемента фаззи-регулятора в составе системы управления гибридного параллельного фильтра.

7. Сравнительная оценка эффективности использования гибридного параллельного фильтра с разработанной системой управления на базе фаззи-регулятора в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева.

Объектом исследования являются системы электроснабжения промышленных предприятий с мощными электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками электроустановок индукционного нагрева.

Предметом исследования являются средства обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы основные положения теории индукционного нагрева, теоретической электротехники, методы расчетов и построения схем замещения систем электроснабжения, теория вероятностей и математической статистики и теория нечеткого вывода, элементы современной экономической теории. Исследование электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий проводилось на основе имитационного моделирования с помощью современного программного обеспечения. Для подтверждения оценки электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий, полученной в результате

теоретических исследований, проведены экспериментальные исследования на объекте с помощью поверенных сертифицированных средств измерений.

Научная новизна заключается в том, что впервые:

1. Экспериментально установлен характер изменения напряжений и токов высших гармоник, генерируемых в сеть электроустановкой индукционного нагрева, в зависимости от параметров технологического процесса гибки труб на примере трубогибочного стана УЗТМ-465.

2. Сформирована база нечетких правил для трех входных и одной выходной лингвистических переменных на основании статистического анализа режимов работы электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками электроустановки индукционного нагрева, позволяющая получить выходной сигнал фаззи-регулятора в системе управления активным фильтром.

3. Разработан алгоритм получения задающего сигнала системы управления активной части гибридного параллельного фильтра, позволяющий реализовать управление переключением ключей инвертора посредством сравнения опорного пилообразного сигнала опорного и выходного сигнала фаззи-регулятора.

4. Обоснована возможность применения гибридного фильтра, состоящего из резонансного пассивного фильтра пятой гармоники и параллельного активного фильтра со свойствами источника несинусоидального тока, для компенсации высших гармоник тока в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева на примере трубогибочного стана УЗТМ-465.

Практическая значимость:

1. Программно реализован алгоритм определения параметров схемы замещения системы «индуктор – нагреваемое тело» и углов управления выпрямителя и инвертора в составе преобразователя частоты электроустановки индукционного нагрева.

2. Разработана имитационная модель узла нагрузки системы электроснабжения электроустановки индукционного нагрева в составе трубогибочного стана УЗТМ-465 с учетом электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

3. Разработанные база правил нечеткого вывода и структура системы управления гибридным параллельным фильтром с применением фаззи-регулятора могут быть использованы в различных отраслях промышленности в системах электроснабжения электроустановок индукционного нагрева для компенсации высших гармоник тока и напряжения.

4. Средствами языка программирования *Pascal* синтезирован нечеткий регулятор, на базе которого осуществляется получение управляющего сигнала в систему управления автономного инвертора напряжения в составе активной части гибридного параллельного фильтра.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена свидетельством регистрации программы для ЭВМ (№ 2015613018), актом внедрения в производство соединительных элементов трубопроводов на ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» (приложение 2 и приложение 3). Результаты научных исследований могут быть использованы в учебном процессе в дисциплинах, читаемых для магистров направления 140400 «Электроэнергетика и электротехника» специальности 140400.68.04 «Энергосбережение и энергоэффективность».

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования приняты к использованию в производстве соединительных элементов трубопроводов на ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», что подтверждено актом внедрения.

На защиту выносятся положения, составляющие научную новизну работы, а также алгоритм получения управляющего воздействия для гибридного параллельного фильтра на базе нечеткого вывода.

Личный вклад автора. Постановка задач научных исследований и их решение, разработка виртуальной модели узла нагрузки, структуры системы управления гибридным параллельным фильтром и проведение измерений на объекте принадлежат автору. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, описывается следующим образом:

[40] – выполнение имитационного моделирования и экспериментальных измерений, анализ полученных результатов;

[6, 27, 28, 49, 76, 77] – обзор литературы по теме статьи, поиск и анализ информации по объекту исследования, разработка методики расчетов;

[55] – разработка программы проведения экспериментальных измерений, анализ полученных результатов.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивается корректным использованием положений теоретической электротехники, теории нечеткого вывода, теории вероятностей и математической статистики и методов расчета и построения схем замещения систем электроснабжения. Экспериментальные исследования проводились с использованием приборов и оборудования, поверенного и сертифицированного для соответствующих измерений.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 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; 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; 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; Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Б.П. Соустина «Управление и информатика в технических системах», г. Красноярск, 15-18 мая 2013 г.

Публикации. По материалам проведенных исследований опубликовано 16 печатных работ, в том числе пять – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено одно свидетельство Российской Федерации о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Работа содержит 19 таблиц, 66 рисунков и список литературы из 91 наименования. Общий объем работы составляет 137 страниц машинописного текста.

1. Анализ проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева

1.1. Краткая характеристика электроустановок индукционного нагрева как источников высших гармоник тока и напряжения

Принцип индукционного нагрева заключается в следующем: ток, протекающий по индуктору, создает электромагнитное поле, которое индуцирует в нагреваемом теле вихревые токи, нагревающие это тело [1-4]. Поскольку электромагнитное поле переменное, в нагреваемом теле возникает поверхностный эффект — плотность вихревых токов уменьшается по экспоненте по мере проникновения в глубь тела. В теории индукционного нагрева принят термин «глубина проникновения» Δ , на которой плотность вихревых токов снижается в e раз. Если принять, что в слое толщиной Δ плотность вихревых токов равна плотности на поверхности тела, а вне этого слоя тока нет, то эффект нагрева будет эквивалентен действию вихревых токов при реальном их распределении. Величина Δ определяется электрофизическими свойствами материала нагреваемого тела и частотой тока и выражается формулой [2]:

$$\Delta = 5,03 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}, \quad (1.1)$$

где ρ — удельное сопротивление нагреваемого тела; μ — относительная магнитная проницаемость; f — частота тока.

Как следует из выражения (1.1) глубина проникновения Δ при постоянстве параметров нагреваемого тела обратно пропорциональна частоте индуцированного тока. Поэтому частота питающего индукционную установку напряжения должна выбираться исходя из размеров сечения нагреваемого тела, например, частота должна быть тем больше, чем меньше диаметр цилиндрического тела или чем меньше толщина тела с прямоугольным сечением.

Существует два основных способа индукционного нагрева: одновременный и непрерывно-последовательный нагрев [5,8-11]. При одновременном нагреве индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащей термообработке, причем нагрев ее во всех точках происходит одновременно. Температура поверхности и ее распределение по глубине зависят от времени нагрева t_k и энергии, переданной в деталь за это время. Устройства для сквозного нагрева, работающие таким образом, обычно называют нагревателями периодического действия.

При непрерывно-последовательном нагреве узкий индуктор передвигается вдоль нагреваемой детали. При поверхностной закалке из индуктора или специального приспособления, расположенного около него, на нагретую поверхность детали выпускается охлаждающая ее вода. Глубина закалки и температура поверхности определяются скоростью движения индуктора, его шириной и мощностью, выделяющейся в нагреваемой детали. В этом случае также вводят понятие времени нагрева, так как любой элемент поверхности находится под индуктором определенное время [5]:

$$t_k = \frac{a}{v}, \quad (1.2)$$

где a — ширина индуктора; v — скорость движения индуктора или детали.

Непрерывно-последовательный способ нагрева широко применяется для сквозного нагрева мерных заготовок, штанг и труб.

На современных промышленных предприятиях применяются ЭИН, основу которых составляют преобразователи частоты различных конфигураций.

В качестве примера рассмотрим трубогибочный стан УЗТМ ТВЧ-465, предназначенный для гибки стальных труб в горизонтальной плоскости с местным нагревом токами высокой частоты и одновременной осевой осадкой на участке гибки. Это устройство относится к типу станков горячей гибки, т.е. в его состав входит нагревательный элемент на базе полупроводникового преобразователя частоты ТПЧ-800. На рис. 1.1 представлена эскизная компоновка стана.

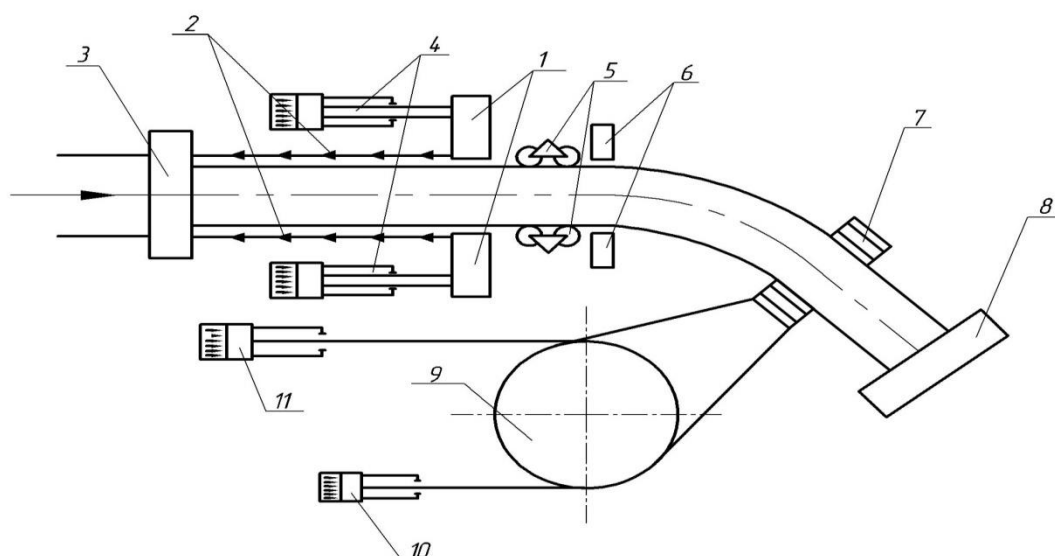


Рис. 1.1 Эскизная компоновка стана УЗТМ ТВЧ-465.

1 - траверса механизма продольной подачи; 2 – гребенчатые тяги; 3 – задний упор; 4 – гидроцилиндры продольной подачи (рабочие цилиндры); 5 – направляющие ролики; 6 – индуктор нагрева ТПЧ; 7 – гибочная головка; 8 – передний торцевой упор; 9 – водило; 10 – цилиндр холостого хода; 11 – тормозной цилиндр.

Труба нагревается токами высокой частоты в узкой кольцевой зоне так, что холодные участки трубы, находящиеся по обе стороны зоны нагрева, препятствуют овализации трубы в зоне изгибки. В нагретой кольцевой зоне труба подвергается одновременному воздействию изгибающего момента и продольной сжимающей силы. Изгибающий момент создается за счет эксцентричного положения рабочего усилия относительно оси водила [3,5].

Перемещением закалочного трансформатора в вертикальном и горизонтальном направлениях регулируется величина зазора между индуктором и трубой. Температура нагрева трубы регулируется изменением используемой мощности высокочастотного генератора или изменением скорости продольной подачи. Гибка труб осуществляется за счет усилия механизма продольной подачи и перемещения гибочной головки на заданный угол относительно оси трубы.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ЭИН в составе трубогибочного стана осуществляет поверхностную закалку труб непрерывно-последовательным способом нагрева.

Показатели технологического процесса гибки труб представлены в таблице 1.1[6].

Таблица 1.1. Показатели технологического процесса гибки труб

1. Диаметр изгибаемых труб, мм	219 ÷ 465
2. Максимальная толщина стенки трубы, мм	40
3. Длина, м	12
4. Угол гибки трубы, град	30° ÷ 90°
5. Радиус гибки трубы, мм	330 ÷ 1000
6. Скорость подачи, мм/с	0,2 ÷ 7,5
7. Величина хода продольной подачи, мм	2800

В соответствии с технологической режимной картой на гибку труб для трубогибного стана УЗТМ ТВЧ-465 разработан набор режимов, представляющий собой комбинации различных показателей технологического процесса гибки труб (см. таблицу 1.2) [7]. Очевидно, что мощность нагрева зависит от параметров изгибаемой трубы (диаметр, толщина и материал), а также от скорости подачи трубы и изменяется в диапазоне от 80 до 450 кВт.

Таблица 1.2. Характеристики различных режимов работы стана

№ п/п	DxS, мм	R гибки, мм	Марка стали	Скорость подачи, мм/мин	Температура нагрева, °С	Мощность нагрева, кВт
1	219x9	375	Ст 20	135-145	900-950	145
2	219x13	375	Ст 20	135-145	900-950	155
3	219x22	375	12Х1МФ	50-60	950-980	175
4	219x32	850	12Х1МФ	55-60	950-980	185
5	245x30	850	15Х1М1Ф	38-43	1020-1050	400
6	273x10	375	Ст 20	90-100	900-950	165
7	273x16	375	Ст 20	80-90	900-950	215
8	273x20	375	15ГС	70-80	900-950	245
9	325x13	450	Ст 20	100-110	900-950	245
10	325x19	450	Ст 20	90-100	900-950	295
11	325x32	450	12Х1МФ	40-50	950-980	295
12	377x13	525	Ст 20	80-90	900-950	295
13	377x17	525	12Х1МФ	60-70	950-980	325
14	377x26	525	15ГС	40-50	900-950	355
15	426x10	1000	Ст 20	80-85	900-950	400
16	426x14	900	Ст 20	80-90	900-950	375
17	426x19	600	12Х1МФ	60-70	950-980	275
18	465x16	650	Ст 20	55-65	900-950	295
19	465x22	650	12Х1МФ	30-40	950-980	205

В системе электроснабжения трубогибочного стана представлены следующие потребители, образующие линейную нагрузку: два асинхронных электродвигателя АО 2-81-6У3, обеспечивающих требуемое давление масла в гидравлической системе стана; электродвигатель АО2-51-4У3 перемещения гибочной головки; электродвигатель АО2-52-6У3 выставления радиуса гибки и другие менее мощные асинхронные электроприводы.

Нагрузка с нелинейной вольт-амперной характеристикой представлена двумя электроприемниками. Первый – установка объемного индукционного нагрева на базе тиристорного преобразователя частоты ТПЧ-800, второй – регулируемый электропривод по системе тиристорный преобразователь двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ТП-Д), осуществляющий подачу трубы во время ее гибки.

На рис. 1.2 представлена электрическая схема силовой части преобразователя частоты ТПЧ-800, который построен по схеме двухзвенного преобразователя частоты с явным звеном постоянного тока. Согласование ТПЧ-800 производится с помощью трансформатора ТМЗ-1000 с первичным напряжением 6000 В и вторичным 400 В.

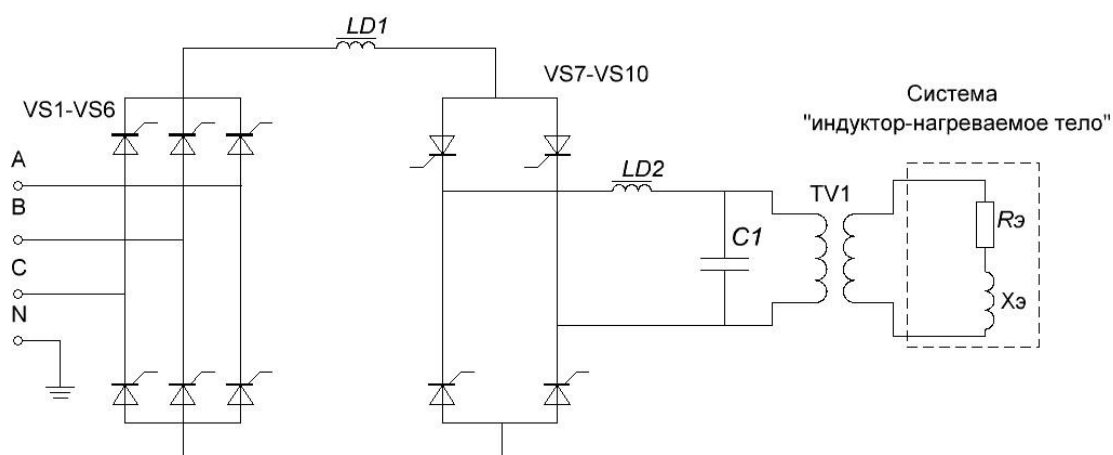


Рис. 1.2. Укрупненная принципиальная схема преобразователя частоты ТПЧ-800

QF_1 - автоматический выключатель; VS_1 - VS_6 - выпрямитель; LD_1 – LD_2 - сглаживающий реактор; VS_7 – VS_{10} - инвертор; C_1 – батарея конденсаторов; $R_{э}$, $X_{э}$ – эквивалентное активное и реактивное сопротивление системы «индуктор – нагреваемое тело»; TV_1 – закалочный трансформатор

Входной преобразователь представляет собой трехфазный управляемый мостовой выпрямитель. Инвертор представляет собой автономный параллельный инвертор тока [12-14]. Для таких инверторов характерно подключение большой индуктивности на входе (LD_1, LD_2), и в этом случае имеет место аperiодический процесс зарядки емкости C_1 , благодаря чему ток вентиля в межкоммутационном интервале остается практически постоянным. Для осуществления процесса инвертирования включение очередного тиристора должно осуществляться с опережением на угол β (угол управления инвертором тока) относительно начала отрицательного полупериода напряжения на нагрузке. Нагрузкой преобразователя частоты является система «индуктор – нагреваемое тело».

Сопротивление R_{Σ} характеризует активную мощность, выделяемую в индукторе и нагреваемом теле. Сопротивление X_{Σ} характеризует реактивную мощность, выделяемую в воздушном зазоре между индуктором и нагреваемым телом, материале индуктора и нагреваемого тела.

Конденсаторная батарея C_1 предназначена для компенсации реактивной мощности, генерируемой системой «индуктор – нагреваемое тело» в питающую сеть и для обеспечения коммутации тиристорov инвертора. Значение емкости батареи меняется в зависимости от геометрических размеров изгибаемой трубы путем изменения количества батарей конденсаторов. Значение емкости батарей конденсаторов пропорционально диаметрам труб.

Закалочный трансформатор служит для согласования электрических параметров индуктора с параметрами электрической сети, а также для регулирования режима работы индуктора. Первичная обмотка трансформатора выполнена в виде секций (галет) из шести витков полого медного проводника [15]. Вторичная обмотка представляет собой один незамкнутый виток, залитый алюминием. Меняя соединение первичных и вторичных витков, можно получить 37 различных значений коэффициента трансформации (от 3,24 до 24).

Индуктор представляет собой замкнутый контур, обладающий значительной индуктивностью, в котором протекают в обоих направлениях токи различной частоты [5]. Для нагрева труб в станах горячей гибки используются одновитковые

медные индукторы. На индуктор подается переменное напряжение высокой частоты. Переменное магнитное поле вызывает появление индуцированного тока в трубе, в результате чего она нагревается. На рис. 1.3 представлен эскиз индуктора.

Камера индуктора изготавливается из медной трубы, в которой выполняются отверстия для охлаждения нагретых участков трубы. В качестве охлаждающей жидкости используется вода [3, 7].

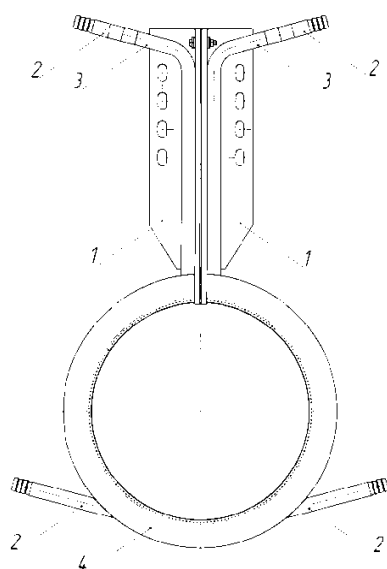


Рис. 1.3. Эскиз индуктора

1 – токопроводящие шины; 2 – присоединительный штуцер; 3 – охлаждающая трубка; 4 – камера индуктора.

Таким образом, процесс «горячей» гибки труб связан с изменением мощности нагрева, что в свою очередь определяется соответствующей величиной индукционного тока. Для получения необходимой величины тока регулируется угол управления входного тиристорного преобразователя. В связи с этим происходит искажение форм кривых потребляемого тока, что обуславливает наличие гармонических составляющих напряжения в питающей сети. Это явление определяет необходимость решения проблемы электромагнитной совместимости нелинейных электроприемников с системой электроснабжения промышленных предприятий.

1.2. Сущность проблемы обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных электроприемников

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается способность устройства или системы удовлетворительно функционировать в заданном окружении, не создавая электромагнитных помех другим устройствам, работающим в этом окружении [16-18].

Электромагнитные помехи (ЭМП) представляют собой электромагнитные, электрические и магнитные явления, создаваемые любым источником в пространстве или проводящей среде, которые влияют или могут влиять на полезный сигнал при его приеме или преобразовании к определенному виду.

По признаку среды распространения различают помехи излучения, т.е. распространяющиеся в пространстве, и помехи проводимости (кондуктивные помехи), распространяющиеся в проводящих средах. Помехи излучения появляются в результате воздействия электрического, магнитного или электромагнитного поля на объект. Кондуктивные помехи наиболее характерны для СЭПП, где они распространяются по проводам, кабелям, шинпроводам и т.д.

Классификацию помех по типу среды распространения иллюстрирует рис. 1.4.

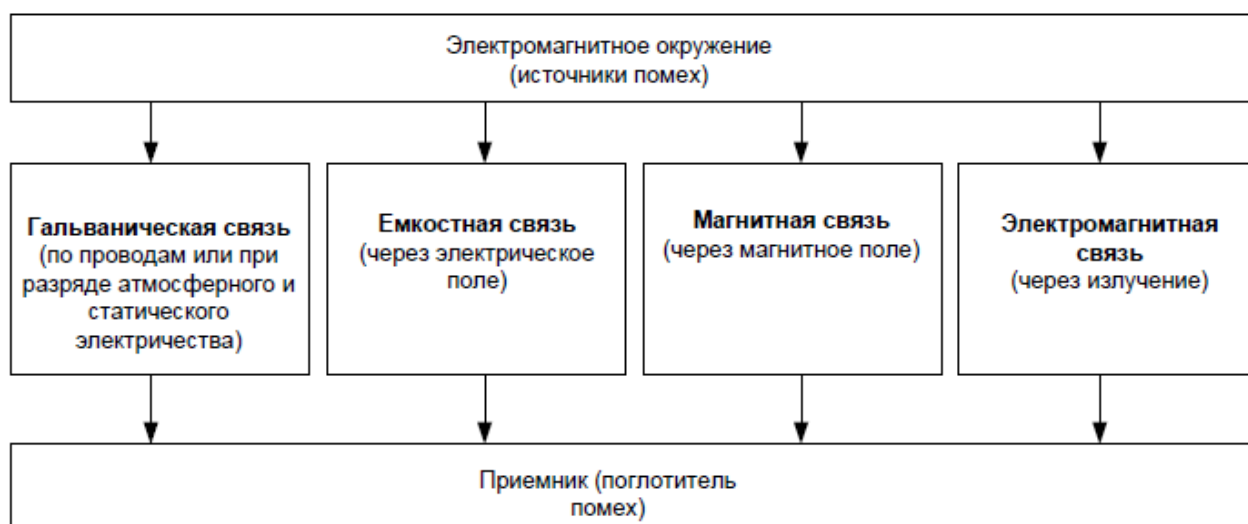


Рис. 1.4. Механизмы связи источников и приемников помех

Наиболее распространенным источником кондуктивных ЭМП в СЭПП являются потребители с нелинейными вольт-амперными характеристиками [19-

23, 27, 28]. Рассмотрим процесс генерирования высших гармоник тока и напряжения статическим преобразователем электроэнергии (управляемым выпрямителем на входе преобразователя частоты ТПЧ-800). На рис. 1.5 представлены примерные диаграммы токов и напряжений трехфазного мостового управляемого выпрямителя с активно-индуктивной нагрузкой L_H и R_H . Сопротивление питающей сети представлено в виде индуктивностей L_A, L_B, L_C .

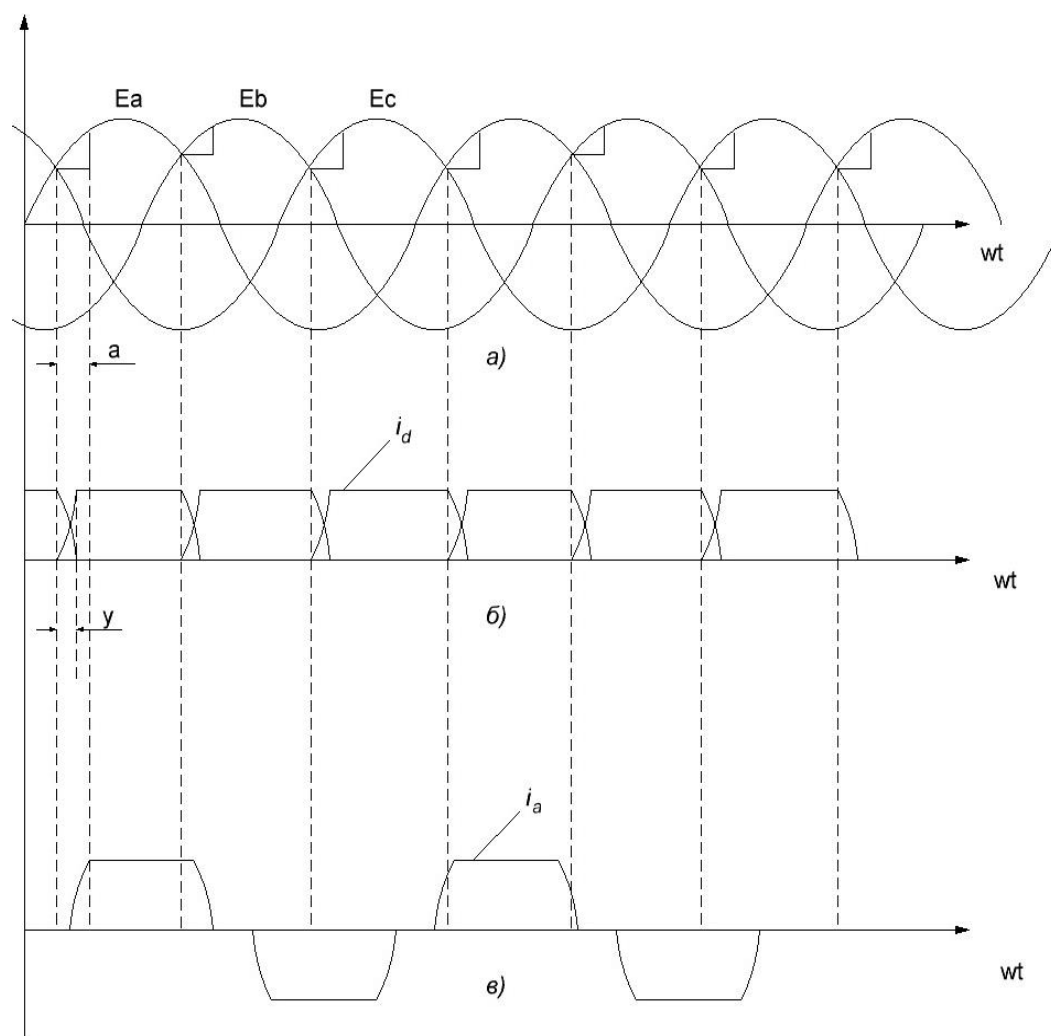


Рис. 1.5. Диаграммы токов и напряжений трехфазного мостового управляемого выпрямителя

а) напряжение сети; б) ток нагрузки; в) ток сети;

α – угол управления выпрямителя; γ – угол коммутации

Потребляемый таким выпрямителем ток имеет трапециевидную форму вследствие наличия индуктивностей L_A, L_B, L_C , которые разряжаются в процессе коммутации тока между фазами. В идеальном случае, если индуктивность сети

равна нулю, коммутация происходит мгновенно и потребляемый ток приобретает прямоугольную форму.

Очевидно, что при несинусоидальном токе искажение кривой напряжения зависит от сопротивления сети. В частности, для трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя форма кривой напряжения практически синусоидальна с резкими всплесками в моменты коммутации вентилей. В вышеописанном идеальном случае при нулевой индуктивности сети и треугольной форме потребляемого тока кривая напряжения будет иметь синусоидальную форму.

Известно, что любая периодическая интегрируемая на отрезке функция может быть представлена в виде суммы гармонических составляющих путем разложения в ряд Фурье. Амплитуда ν -ой гармоники тока определяется следующим образом [29]:

$$I_{\nu m} = \sqrt{a_{\nu}^2 + b_{\nu}^2}, \quad (1.3)$$

где a_{ν} , b_{ν} – коэффициенты разложения кривой первичного тока.

Эти коэффициенты определяются следующим образом:

$$a_{\nu} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot E_m}{\nu \cdot \pi \cdot x_k} \cdot \sin \frac{\nu \cdot \pi}{3} \cdot \left| \begin{array}{l} \frac{1}{\nu+1} \cdot \sin(\nu+1) \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(\nu+1) \cdot \psi - \\ - \frac{1}{\nu+1} \cdot \sin(\nu-1) \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(\nu-1) \cdot \psi \end{array} \right| ; \quad (1.4)$$

$$b_{\nu} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot E_m}{\nu \cdot \pi \cdot x_k} \cdot \sin \frac{\nu \cdot \pi}{3} \cdot \left| \begin{array}{l} - \frac{1}{\nu+1} \cdot \sin(\nu+1) \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(\nu+1) \cdot \psi + \\ + \frac{1}{\nu+1} \cdot \sin(\nu-1) \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \sin(\nu-1) \cdot \psi \end{array} \right|, \quad (1.5)$$

где x_k – индуктивное сопротивление контура коммутации, E_m – амплитуда ЭДС питающей сети, $\psi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$.

Таким образом, кривая несинусоидального тока (напряжения) представляет собой сумму основной гармоники ($n = 1$) с частотой, равной частоте сети, и

высших гармоник с частотами, кратными основной. Очевидно, что чем сильнее форма кривой отличается от синусоиды, тем выше амплитуды высших гармоник.

В идеальном случае гармоники, генерируемые статическим преобразователем в установившемся режиме, называются характерными гармониками, и их номера определяются следующим образом [24-26]:

$$n = kp \pm 1, \quad (1.6)$$

где n – порядковый номер гармоники, k – натуральное число, p – пульсность преобразователя.

Для трехфазного мостового преобразователя пульсность на одном периоде питающего напряжения $p = 6$, и перечень характерных гармоник выглядит следующим образом: $n = k*6 \pm 1 = 5, 7, 11, 13, 17, 19 \dots$

Указанное соотношение для характерных гармоник справедливо для установившегося режима работы преобразователя при условии симметричности и абсолютной синусоидальности напряжения в питающей сети. Несоблюдение хотя бы одного из указанных условий провоцирует генерирование нехарактерных гармоник в сеть и появление постоянной составляющей. На практике перечисленные выше условия часто не соблюдаются, из-за чего в реально полученных спектрах гармоник можно наблюдать те из них, которые не соответствуют соотношению (1.5).

Основными показателями наличия высших гармонических составляющих напряжения в СЭПП являются два показателя качества электроэнергии (ПКЭ): суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению и коэффициент ν -й гармонической составляющей напряжения.

В России нормальные и предельно допустимые значения вышеуказанных ПКЭ устанавливает государственный стандарт ГОСТ Р 34122-2013 [30]. В соответствии с ним суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению определяется отношением суммы действующих значений напряжения высших гармоник U_ν к действующему значению напряжения основной гармоники U_1 или номинальному напряжению:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1.7)$$

где n - номер последней из учитываемых гармоник. Для объективной оценки уровня высших гармоник в сети рекомендуется принимать $n \geq 40$.

Коэффициент v -й гармонической составляющей напряжения определяется следующим образом:

$$K_{U_v} = \frac{U_v}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

Предельные значения приведенных показателей представлены в таблице 1.3.

В других странах мира действуют аналогичные стандарты, регламентирующие уровень высших гармоник тока и напряжения в питающей сети. Так, в США действует стандарт IEEE 519-1992, распространяющийся на электрические системы, содержащие электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками [31]. Между отечественными и зарубежными стандартами существует ряд важных отличий.

Таблица 1.3. Предельные значения коэффициентов $K_{u(v)}$ и K_u .

		Напряжение электрической сети, кВ				
		0,38	6-25	35	110-220	
Значения коэффициентов в v -ых гармонических	Порядковый номер гармоники	5	6	4	3	1,5
		7	5	3	2,5	2
		11	3,5	2	2	1
		13	3	2	1,5	0,7
		17	2	1,5	1	0,5
		≥ 19	1,5	1	1	0,4
Суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению, K_u , %		8	5	5	5	

Примечание: значения коэффициентов v -ых гармонических составляющих напряжения $K_{u(v)}$ и суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению K_u , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в таблице 1.3, в течение 95 % времени каждого периода в одну неделю.

Во-первых, в зарубежном стандарте вводится понятие суммарного коэффициента гармонических составляющих по току, который представляет собой отношение суммы значений токов высших гармоник I_h к значению тока основной гармоники I_1 . Его значения нормируется в зависимости от характеристик сети.

Во-вторых, уровень нечетных гармоник тока нормируется в зависимости от соотношения между током нагрузки и током короткого замыкания для данного участка сети.

В-третьих, требования, предъявляемые к уровню высших гармоник в сети в западных странах, значительно жестче отечественных. Так, если в России предельно допустимое значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению для сети 0,38 кВ составляет 8%, то на Западе в аналогичной ситуации – 5%.

Высшие гармоники тока и напряжения оказывают негативное влияние на все элементы СЭПП [18-20, 23-25]. Факторы влияния представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Факторы влияния гармоник тока и напряжения на элементы СЭПП

Элементы систем электроснабжения	Влияющие факторы		
	Тепловое воздействие	Энергетическое воздействие	Механическое воздействие
Автономные генераторы	Избыточный нагрев медных и стальных элементов	—————	Вращательные вибрации элементов генератора
Силовые трансформаторы	Перегрев и пробой изоляции обмоток, колебания температуры обмоток	Потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи, потери в обмотках на намагничивание, появление резонанса	Вибрации в тонколистовом сердечнике трансформатора

Продолжение таблицы 1.4.

Электроприводы переменного тока	Увеличение потерь энергии в обмотках статора и ротора, попадание тока на корпус двигателей, поверхностный эффект на высоких частотах	Испарение смазки подшипников вследствие избыточного нагрева	Колебания момента на валу двигателя, разрушение подшипников
Электрические кабели	Усугубление влияния поверхностного эффекта и эффекта близости	Увеличение рассеивания потерь в виде тепла	_____
Системы освещения	Понижение КПД ламп накаливания, увеличение дозы фликера в системах освещения	_____	_____

1.3. Способы снижения уровня высших гармоник тока и напряжения в системах электроснабжения

В настоящее время все способы снижения несинусоидальности можно разделить на две группы: схемные решения и применение специальных технических средств [32].

К схемным решениям можно отнести рациональное построение сети, которое включает в себя:

- увеличение установленной мощности силовых трансформаторов систем электроснабжения;
- применение разделительных трансформаторов с обмотками «треугольник-звезда» позволяет эффективно бороться с гармониками, кратными третьей, при сбалансированной нагрузке. Для ослабления влияния несимметрии нагрузки по фазам и уменьшения тока, протекающего в нейтральном проводе, применяют зигзагообразную систему обмоток, где вторичная обмотка каждой фазы разбита на две

части и размещена на разных стержнях магнитопровода трансформатора.

- выделение крупной нелинейной нагрузки на отдельные секции шин;
- подключение нелинейной нагрузки к системе с большей мощностью короткого замыкания $S_{КЗ}$.

Вышеперечисленные способы должны использоваться как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации электроэнергетических систем.

К современным техническим средствам, снижающим уровень гармоник в системах электроснабжения, относятся:

- линейные дроссели;
- магнитные синтезаторы;
- пассивные фильтры;
- активные фильтры;
- гибридные фильтры.

Наиболее широкое применение среди выше перечисленных технических средств получили пассивные, активные и гибридные фильтры [21, 33].

Пассивные фильтры, состоят из пассивных элементов: конденсаторов, индуктивностей и/или резисторов. Для фильтрации высших гармоник тока и напряжения они подключаются параллельно существующей нелинейной нагрузке. Установка пассивных фильтров позволяет создать низкоимпедансные линии для протекания токов одной или нескольких гармоник, что приводит к их поглощению и препятствует их генерированию в питающую сеть. Значение сопротивления пассивного фильтра находится в тесной зависимости от добротности, которая определяет ширину полосы настройки. Обычно значение добротности меняется в диапазоне от 20 до 100.

По своему назначению пассивные фильтры подразделяют на резонансные и широкополосные. Резонансные фильтры настраиваются на подавление одной предварительно выбранной гармоники. Их недостаток очевиден: для подавления спектра гармоник, характерного, к примеру, для трехфазного мостового выпрямителя, необходимо использовать несколько таких фильтров, что

многократно увеличивает риск возникновения резонансных явлений в питающей сети.

Широкополосные фильтры предназначены для подавления высших гармоник в строго ограниченном частотном диапазоне. У таких фильтров также имеется существенный недостаток: помимо подавления амплитуд высших гармоник они снижают амплитуду основной гармоники.

Кроме того, настройка и выбор параметров элементов пассивных фильтров осуществляется с учетом постоянного тока нагрузки. Для подавления гармоник, генерируемых потребителями с широким диапазоном изменения тока нагрузки, пассивные фильтры являются неэффективными.

На рис. 1.6 представлены схемы резонансного и широкополосного пассивного фильтров.

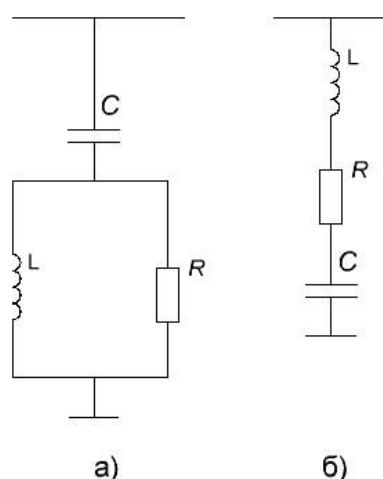


Рис. 1.6. Схемы пассивных фильтров

а) широкополосный фильтр; б) резонансный фильтр

Активные фильтры гармоник (АФГ) в отличие от пассивных содержат элементы управления, позволяющие изменять частотные характеристики фильтра [34-39]. Основной силовой элемент фильтра - преобразователь переменного/постоянного тока с ёмкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции мгновенное значение тока, противоположное току

искажения. Ток искажения представляет собой разность между несинусоидальным током сети (рис. 1.7 а, б) и его основной гармоникой.

АФГ классифицируют по следующим признакам:

1. Фазность. Различают однофазные, трехфазные трехпроводные и трехфазные четырехпроводные активные фильтры. Количество фаз фильтра соответствует количеству фаз питающей сети.

2. По способу подключения к сети АФГ подразделяются на параллельные и последовательные. Параллельный активный фильтр широко применяют для подавления гармоник тока, компенсации реактивной мощности и устранения несимметрии в сети. Его устанавливать как можно ближе к нагрузке, поскольку источниками гармоник тока в сети являются электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Последовательный активный фильтр устанавливают перед нагрузкой через согласующий трансформатор с целью подавления гармоник напряжения, выравнивания и регулирования напряжения сети а также снижения напряжения обратной последовательности.

В зависимости от вида накопителя в качестве базовых схем активного фильтра гармоник используются преобразователи со свойствами источника тока или источника напряжения. Рассмотрим работу активных фильтров, в которых в качестве накопителей энергии используются реактор (рисунок 1.7, а) или электромагнитный конденсатор (рисунок 1.7, б).

При параллельном подключении к питающей сети и использовании емкостного накопителя он представляет собой источник несинусоидального тока и используется для компенсации гармоник тока, потребляемого нелинейным потребителем [36]. При параллельном подключении к питающей сети и использовании индуктивного накопителя он представляет собой источник несинусоидального напряжения и используется для снижения влияния гармоник напряжения на потребители, подключенные после себя.

Установленная мощность АФГ весьма значительна в условиях использования его для компенсации высших гармоник и может достигать 30 % от полной мощности потребителя. Это обусловлено тем, что при последовательном

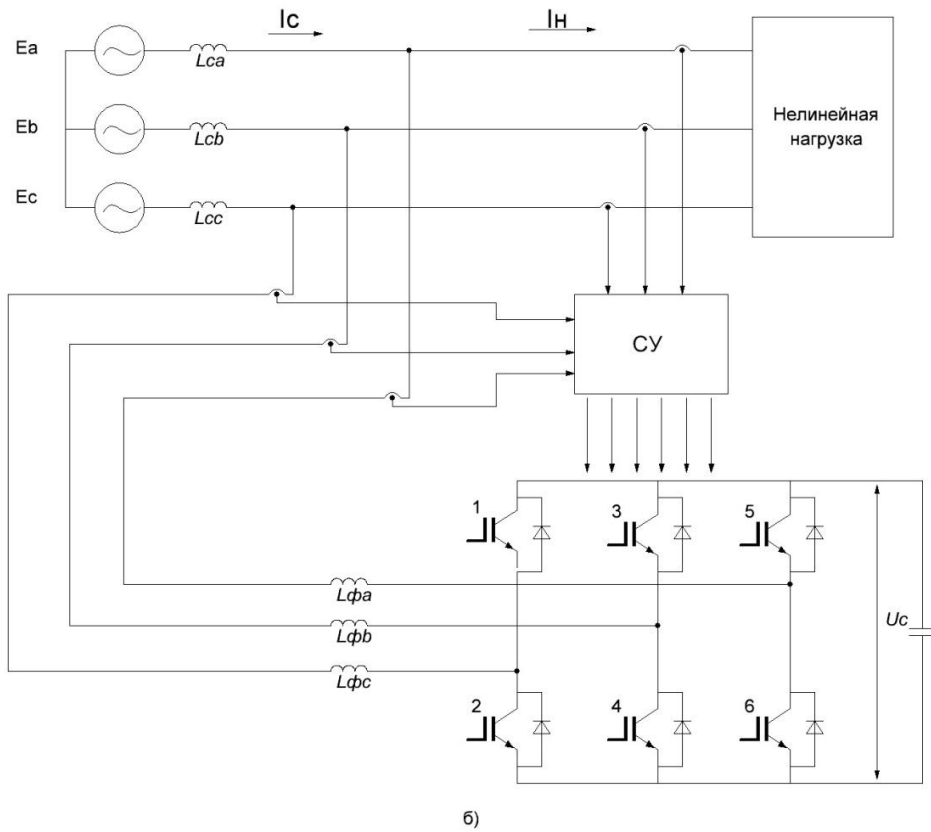
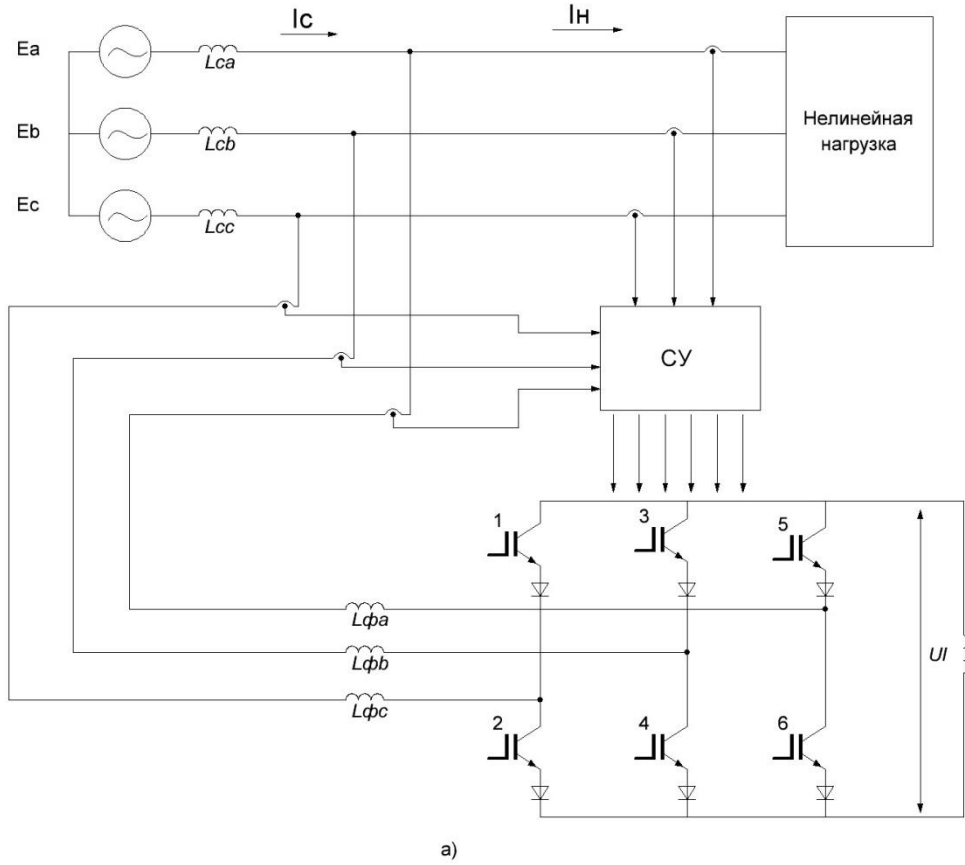


Рис. 1.7. Принципиальные электрические схемы АПФ
а) с индуктивным накопителем; б) с емкостным накопителем.

подключении к питающей сети через фильтр протекает ток нелинейного потребителя, а при параллельном подключении прикладывается полное напряжение сети. Поэтому при больших мощностях нелинейных нагрузок использование АФГ является неэффективным с экономической точки зрения. В таких случаях целесообразнее применять гибридные фильтры (ГФ), в которых АФГ включаются последовательно или параллельно с пассивным фильтром.

В этом случае пассивное фильтрокомпенсирующее устройство настраивается на подавление одной канонической высшей гармоники порядка $n = bk \pm 1$, а активный фильтр компенсирует все оставшиеся гармоники. В случае, если по одной канонической гармонике у каждой нелинейной нагрузки будет успешно подавлено пассивными фильтрами, активный фильтр в узловой точке выбирается на меньший номинальный ток, что снижает стоимость данного фильтра.

Гибридные фильтры классифицируются по способу подключения активной и пассивной части к компенсируемой электрической сети [37].

1. Комбинация последовательного активного и параллельного пассивного фильтра.

Такая конфигурация является более бюджетной по сравнению с вариантом, при котором к сети подключаются два активных фильтра: последовательный и параллельный. При этом даже при широком диапазоне изменения тока нагрузки такая схема более эффективна, чем использование одиночного АФГ. Укрупненная схема подключения этого ГФ представлена на рис. 1.8 (а).

2. Комбинация параллельного активного и параллельного пассивного фильтра.

Такая конфигурация является наиболее распространенной в условиях компенсации высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой. Пассивный фильтр компенсирует гармоники высокого порядка (5-я, 7-я, 11-я и т.д.), активный фильтр – все остальные. Основной недостаток – низкая эффективность пассивного фильтра в условиях широкого диапазона изменения тока нагрузки. Укрупненная схема подключения этого ГФ представлена на рисунке 1.8 (б).

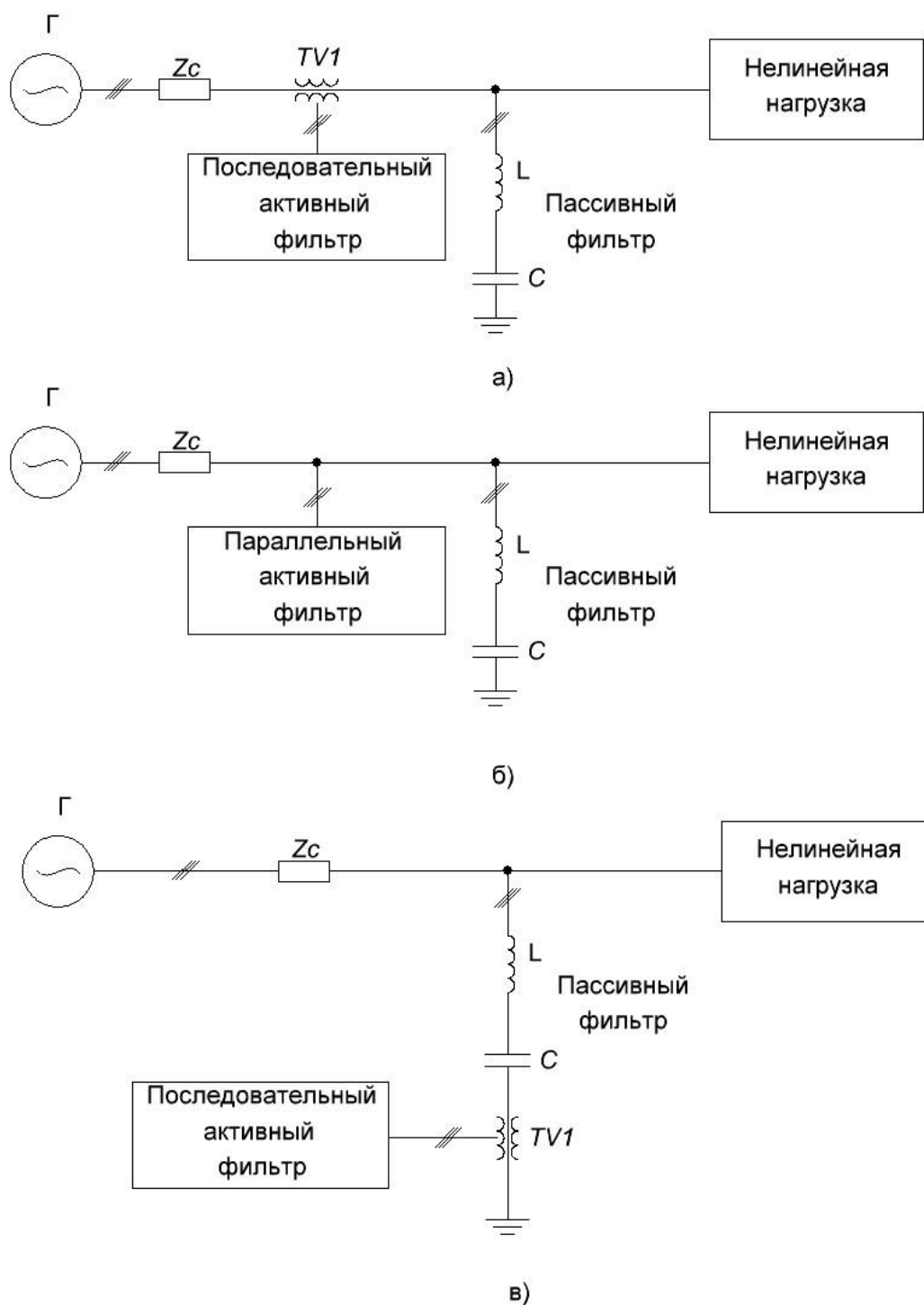


Рис. 1.8. Укрупненные схемы подключения гибридных фильтров:

а) комбинация последовательного активного и параллельного пассивного фильтра; б) комбинация параллельного активного и параллельного пассивного фильтра; в) активный фильтр подключен последовательно параллельному пассивному фильтру

3. Активный фильтр подключен последовательно параллельному пассивному фильтру.

Пассивный фильтр должен быть широкополосным. Его функция заключается в снижении значения максимального напряжения, прикладываемого к активному фильтру. Такая конфигурация может быть эффективной в условиях сети с несколькими доминирующими гармониками с небольшим диапазоном изменения амплитудных значений. Укрупненная схема подключения этого ГФ представлена на рис. 1.8 (в).

Выводы:

1. Для осуществления нагрева заготовок с разнообразными свойствами (геометрические размеры, материал и т.д.) необходимо варьировать в широком диапазоне мощность нагрева, скорость подачи заготовок, глубину проникновения тока и др. В связи с этим основным элементом электроустановок индукционного нагрева являются преобразователи частоты различных конфигураций. Исходя из этого электроустановки индукционного нагрева являются мощными электроприемниками с нелинейными вольт-амперными характеристиками с широким диапазоном изменения потребляемого тока.

2. Наличие потребителей с нелинейными вольт-амперными характеристиками в системе электроснабжения является причиной генерирования высших гармоник тока и напряжения. Уровень гармоник зависит от углов управления выпрямителя и инвертора в составе преобразователя частоты, нагруженного системой «индуктор – нагреваемое тело». Искажение синусоидальности кривых тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий и генерирование высших гармоник оказывает разнообразные негативные воздействия на питающую сеть.

3. Наиболее эффективным средством подавления высших гармоник тока и напряжения, генерируемых потребителем с нелинейной вольт-амперной характеристикой и широким диапазоном изменения тока нагрузки, является активный параллельный фильтр. Исходя из вышесказанного, целью последующих исследований является научное обоснование структуры активного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткого вывода для обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева.

2. Анализ гармонического состава тока и напряжения нелинейных электроприемников электроустановок индукционного нагрева

2.1. Проведение экспериментальных измерений гармонического состава токов и напряжений на стороне 0,4 кВ цехового понижающего трансформатора

Питание электроприемников трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465 осуществляется через понизительную подстанцию, на которой установлены два трансформатора ТМЗ-1000/6/0,4 (дальнейшие исследования проводились для одной трансформаторной подстанции). Цеховая трансформаторная подстанция питается от внешней системы электроснабжения через понизительный трансформатор ТДТН-25000/110/35/6. На рис. 2.1 изображена однолинейная схема электроснабжения стана УЗТМ ТВЧ-465 и ее схема замещения [40, 41]. Технические данные электроприемников и трехфазных трансформаторов представлены в таблице 2.1 и таблице 2.2 соответственно.

Как следует из рис. 2.1, все потребители трубогибочного стана можно условно разделить на 3 группы [42].

1. Асинхронные двигатели, обеспечивающие перемещения элементов стана в процессе гибки.

2. Регулируемый электропривод по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д), предназначенный для регулирования скорости подачи трубы при гибке.

3. Установка индукционного нагрева в составе генератора тока высокой частоты, выполненного на базе ТПЧ, батареи конденсаторов, закалочного трансформатора и активно-индуктивной нагрузки преобразователя частоты, представляющей собой индуктор и участок нагреваемого тела.

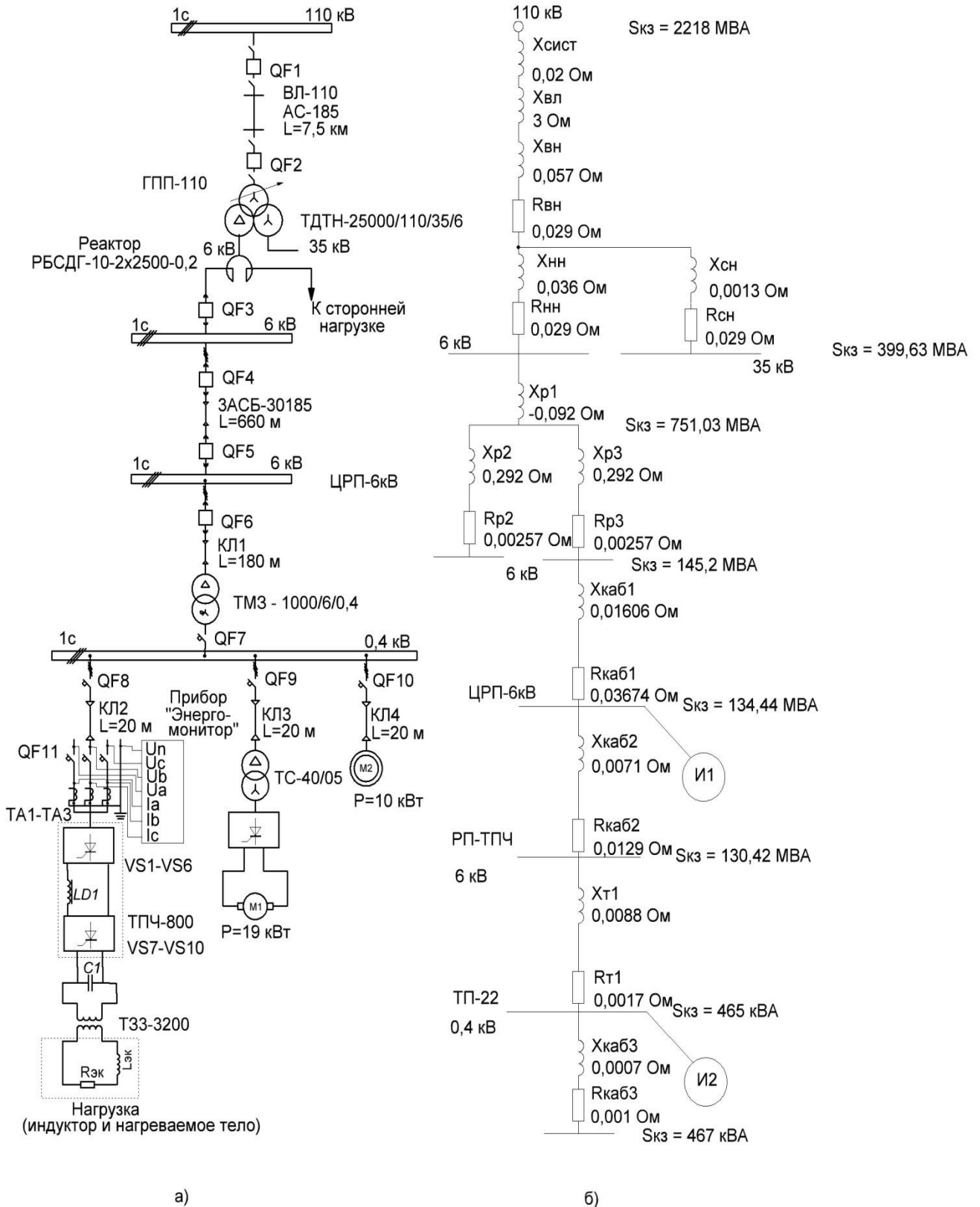


Рис. 2.1. Однолинейная схема электроснабжения (а) и схема замещения (б) электроприемников стана УЗТМ-465

Таблица 2.1. Характеристики основных электроприемников стана УЗТМ ТВЧ-465

Наименование потребителя	Тип двигателя	Номинальная мощность P_n , кВт	КПД, η %	Коэффициент мощности, $\cos \varphi$
Установка индукционного нагрева	—	800	95	—
Электропривод по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока	П-71У4	19	84	—
Двигатель холостого хода траверсы	АО 2-81-6У3	30	91	0,91
Двигатель рабочего хода гибочной головки	АОП 2-62-4	17	88	0,84

Таблица 2.2. Характеристики трехфазных трансформаторов

Тип	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение обмоток, кВ			Потери, кВт		Напряжение КЗ, %	Ток ХХ, %
		НН	СН	ВН	ХХ	КЗ		
ТДТН-25000/110/35/6	25000	6	35	110	38,4	ВН-НН=141 ВН-СН=132 СН-НН=106	ВН-НН=18,2 ВН-СН=10,6 СН-НН=6,8	0,92
ТМЗ-1000/6/0,4	1000	0,4	—	6	1,9	12,2	5,5	1,7

Наиболее достоверным способом оценки влияния нелинейного потребителя на сеть является экспериментальное измерение ПКЭ, влияющих на ЭМС. Ниже приведены фрагменты текста программы измерений, согласованной с ведущими специалистами ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ». Измерения проводились в соответствии с требованиями документов [43-45]. Сканированные оригиналы программы и протоколов измерений представлены в приложении 1.

Целью проведения эксперимента является определение нижеприведенных показателей на низкой стороне трансформаторной подстанции, «запитывающей» потребителей трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465:

- 1.1. Действующее значение напряжения.
- 1.2. Действующее значение тока.
- 1.3. Фазовый угол между напряжением и током первой гармоники одной фазы.
- 1.4. Активная электрическая мощность.
- 1.5. Реактивная электрическая мощность.
- 1.6. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.
- 1.7. Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40.
- 1.8. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока.
- 1.9. Коэффициент n -ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40.
- 1.10 Активная и реактивная электрическая мощность n -ой гармонической составляющей, n от 1 до 40.

Показатели электромагнитной совместимости определяются при помощи приборов «Энергомонитор - 3.3 Т1» и *Chavin Arnoux CA 8335*. Подключение приборов осуществляется к трехфазной четырехпроводной сети в точке И1 (см. рис. 2.1) [46, 47].

Напряжение на выходе преобразователя частоты снимается с выходных зажимов шкафа управления ТПЧ-800.

Порядок проведения измерений следующий:

1. Подключить питание и измерительные кабели к приборам «Энергомонитор - 3.3 Т1» и *Chavin Arnoux CA 8335* в соответствии со схемой рис. 2.2.
2. Снять питание с высокочастотного генератора при помощи автоматического выключателя.
3. Выставить необходимые параметры регистрации и пределы измерений тока и напряжения на измерительных приборах.

4. Подключить токоизмерительные клещи и входы по напряжению ко вторичной обмотке измерительных трансформаторов.

5. Подать питание на высокочастотный генератор.

6. Активировать режим регистрации параметров электрической сети (ток, напряжение, мощность) и показателей электромагнитной совместимости в течение суток.

7. По окончании времени регистрации обесточить генератор и отсоединить прибор от их вторичных обмоток.

В таблице 2.3 приведен перечень приборов, используемых при выполнении измерений, и их метрологические характеристики. Измерения проводились с временным шагом в одну минуту [46, 47].

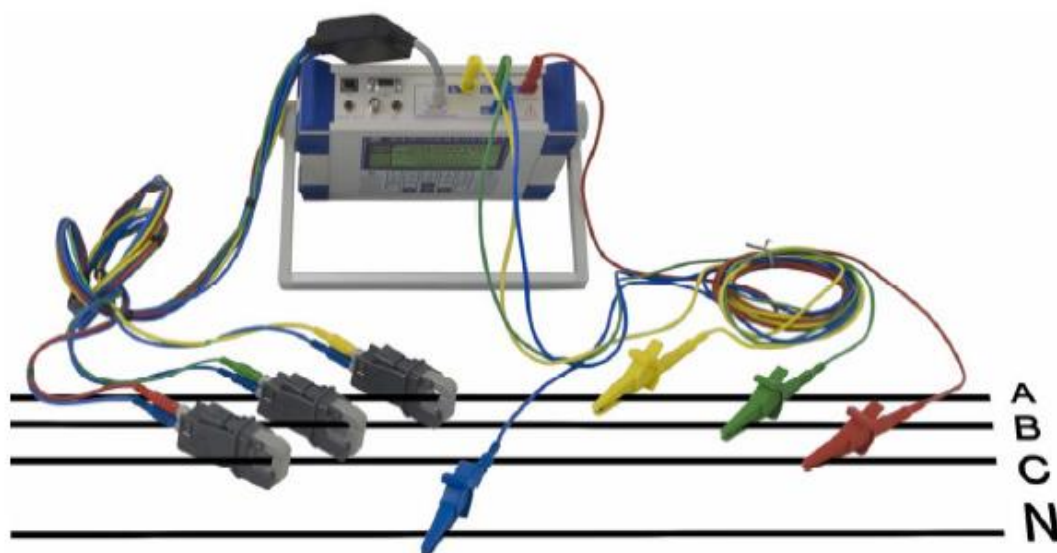


Рис. 2.2. Схема подключения прибора «Энергомонитор - 3.3Т1».

Схема подключения прибора *Chavin Arnoux CA 8335* к питающей сети аналогична представленной на рис. 2.2.

Измерения проводились в ООО «Белэнергомаш - БЗЭМ» на производстве соединительных элементов трубопроводов, участок гибки труб, во время гибки трубы №2 (см. таблицу 1.2).

Таблица 2.3. Перечень приборов, используемых при проведении измерений, и их метрологические характеристики

№ п/п	Измеряемые величины	Погрешность измерения, %	Диапазон изменения погрешности, %	Предел измерения
«Энергомонитор – 3.3 Т1»				
1	Ток, А	$\pm(1+0,05 (\frac{5}{I}-1))^*$	1,04÷1,2	7,5
2	Напряжение U , В	$\pm(0,1+0,01 (\frac{415}{U}-1))^*$	—	622,5
3	Фазовый угол φ , градус	$\pm 0,5$	—	360
4	Активная мощность P , Вт	$\pm(2+0,1 (\frac{2075}{P}-1))^*$	2,04÷2,13	3735
5	Реактивная мощность Q , вар	± 4	—	3735
6	Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40 K_{Un} , %	± 5	—	49,9
7	Коэффициент n -ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40 K_{In} , %	± 10	—	49,9
8	Суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению K_U , %	± 5	—	49,9
9	Активная электрическая мощность n -ой гармоники, n от 1 до 40 P_n , Вт	± 10	—	207,5
10	Суммарный коэффициент гармонических составляющих по току K_I , %	± 10	—	49,9
Chavin Arnoix CA 8335				
№ п/п	Измеряемые величины	Диапазон измерения	Максимальная погрешность	
1	Ток, А	1÷6	$\pm 0,5$ %	
2	Напряжение U , В	10÷1000	$\pm 0,5$ %	
3	Фазовый угол φ , градус	-180÷180	$\pm 1^\circ$	
4	Активная мощность P , Вт	0÷9999 кВт	$\pm 1,5$ %	
5	Реактивная мощность Q , вар	0÷9999 кВт	$\pm 1,5$ %	
6	Коэффициент n -ой гармонической составляющей тока и напряжения, n от 2 до 40 K_{In} и K_{Un} , %	0÷999,9 %	± 1 %	

7	Суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению и току K_U и K_I , %	0÷999,9 %	±1 %
---	--	-----------	------

Примечание: в формулах, отмеченных знаком *, измеренные с величины: I, U, P .

На рис. 2.3 представлен скриншот экрана прибора Энергомонитор – 3.3 Т1 в процессе регистрации ПКЭ.

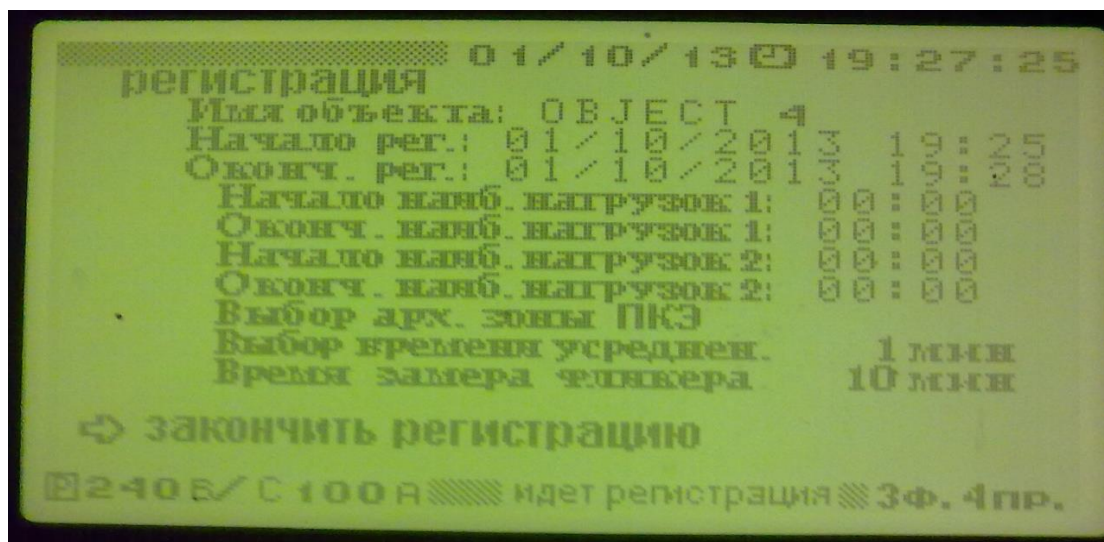


Рис. 2.3. Экран прибора «Энергомонитор» во время регистрации

Измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{ТТ} = 300$.

В таблицах 2.4 - 2.7 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ - амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA}(n)$ - коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U - коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I - коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ - фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ - линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ - активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ - реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Результаты измерений в точке подключения приборов И1 (см. рис. 2.1) представлены в таблицах 2.4 -2.7 и на рис. 2.4-2.5.

Таблица 2.4. Амплитуда первой гармоники и коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А, $n = 2 \div 10$.

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	2,4	3,7	1,17	1,91	20,09	0,46	10,47	2,3	0,89	1,91
2	2,22	5,19	1,04	2,45	20,9	0,31	10,96	3,34	0,93	2,78
3	2,18	4,88	0,95	2,38	21,31	0,27	11,25	3,29	0,88	2,81
4	2,17	4,57	0,97	2,17	21,39	0,27	11,32	3,08	0,92	2,59
5	2,18	4,69	1,01	2,3	21,33	0,29	11,32	3,18	0,96	2,72
6	2,18	4,65	1,01	2,33	21,33	0,27	11,3	3,15	0,94	2,72

Таблица 2.5. Коэффициенты n-ых гармонических составляющих тока в фазе А, $n = 11 \div 20$.

№ п/п	$K_{IA(11)}$, %	$K_{IA(12)}$, %	$K_{IA(13)}$, %	$K_{IA(14)}$, %	$K_{IA(15)}$, %	$K_{IA(16)}$, %	$K_{IA(17)}$, %	$K_{IA(18)}$, %	$K_{IA(19)}$, %	$K_{IA(20)}$, %
1	6,09	0,58	4,44	1,55	0,66	1,5	2,51	0,61	1,96	1,03
2	6,74	0,41	5,13	2,5	0,76	2,33	2,91	0,54	2,6	1,68
3	7,34	0,37	5,64	2,66	0,73	2,56	3,6	0,78	3,21	2
4	7,48	0,36	5,8	2,51	0,76	2,41	3,72	0,81	3,36	1,93
5	7,39	0,4	5,77	2,6	0,79	2,54	3,66	0,84	3,33	1,98
6	7,42	0,4	5,76	2,56	0,79	2,52	3,66	0,78	3,32	1,94

Таблица 2.6. Коэффициенты несинусоидальности тока и напряжения в фазе А и значения фазных напряжений.

№ п/п	K_{UA} , %	K_{UB} , %	K_{UC} , %	K_{IA} , %	K_{IB} , %	K_{IC} , %	U_A , В	U_B , В	U_C , В
1	7,23	7,09	7,3	25,32	25,15	26,44	229,49	228,01	230,1
2	7,06	6,9	7,06	27,19	27,28	27,89	229,86	228,49	230,44
3	7,55	7,35	7,55	28,25	28,36	28,85	229,09	227,81	229,7
4	7,62	7,43	7,62	28,39	28,47	29,01	229,03	227,65	229,57
5	7,7	7,52	7,68	28,48	28,56	29,15	229,17	227,7	229,76
6	7,55	7,34	7,5	28,37	28,49	29,05	229,05	227,51	229,62

Таблица 2.7. Линейные напряжения, активная и реактивная мощность

№ п/п	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	395,43	396,43	399,09	355,95	266,52	284,8	455,64	432,66	403,38
2	396,22	397,18	399,61	347,86	265,76	284,97	405,09	383,53	357,96
3	394,96	395,99	398,26	344,28	263,83	283,21	394,27	373,03	347,99
4	394,78	395,68	398,12	344,45	263,89	282,91	392,57	371,66	346,55
5	394,9	395,87	398,47	345,21	264,07	283,09	392,76	371,98	346,87
6	394,64	395,57	398,28	345,71	264,44	283,52	392,89	372	347,08

Осциллограммы токов и напряжений на стороне 0,4 кВ при гибке трубы № 2 (табл. 1.2) представлены на рис. 2.4-2.5.

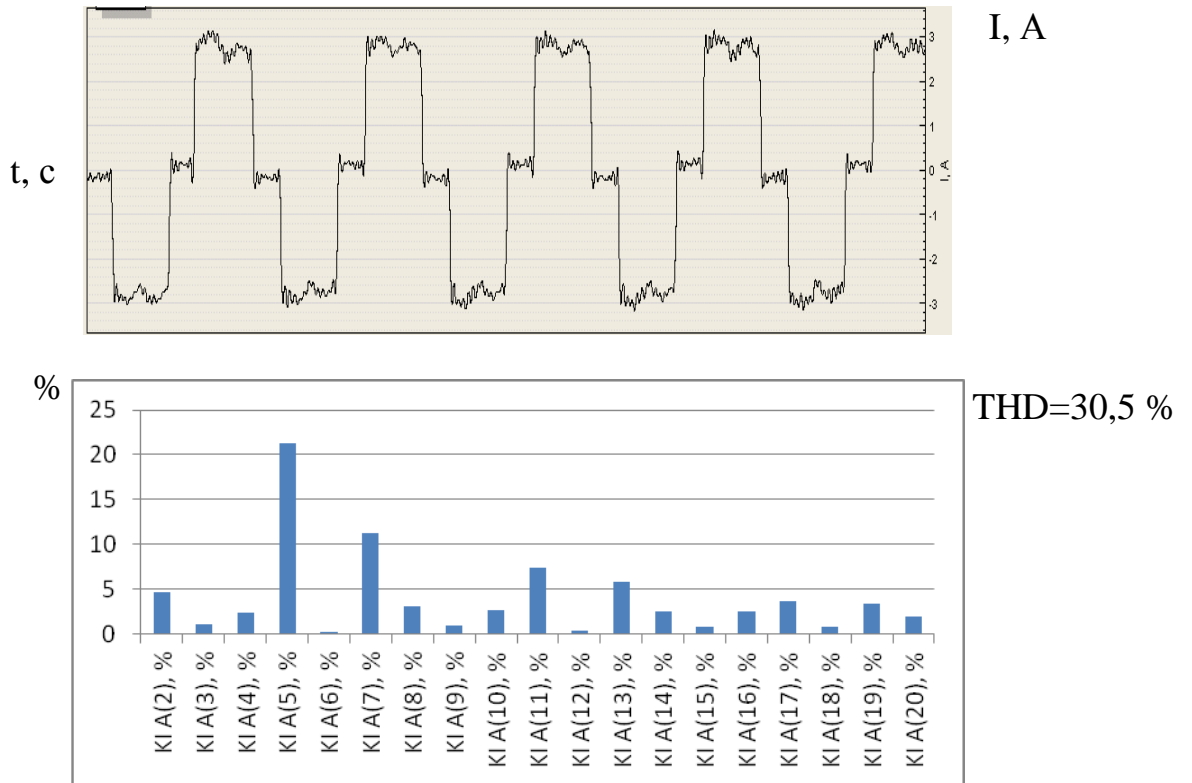


Рис. 2.4. Измеренные осциллограмма и спектр фазного тока на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

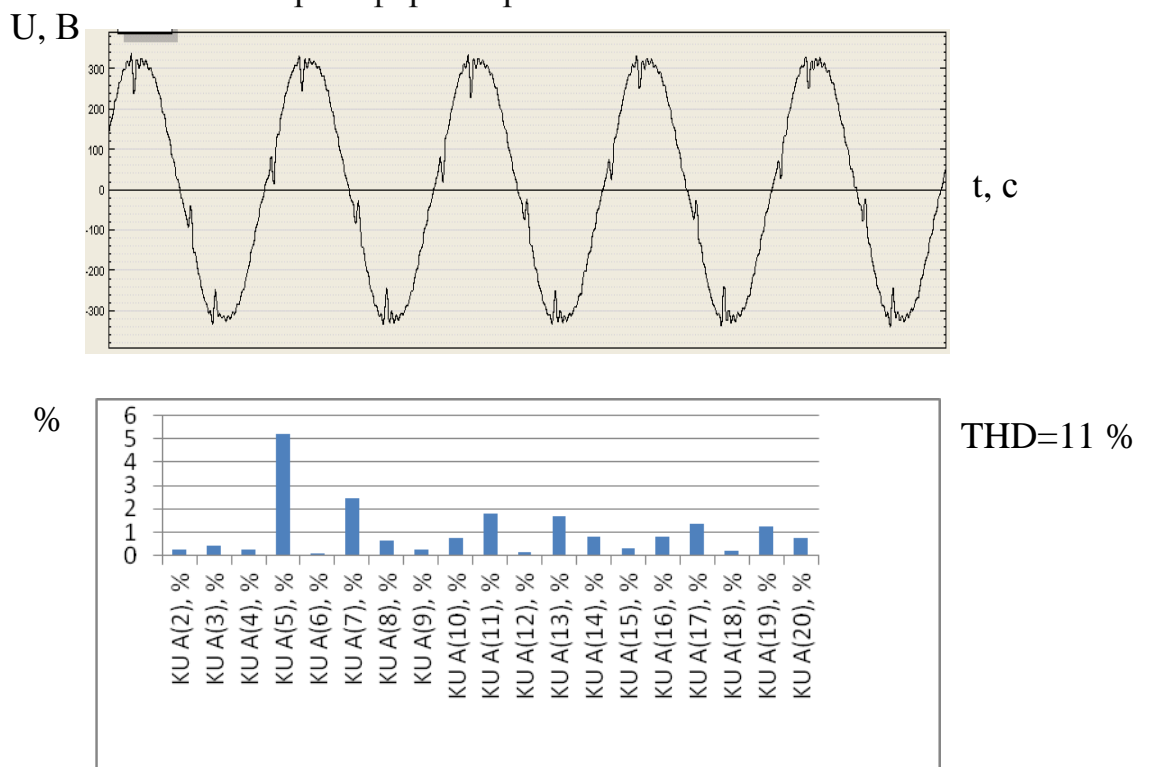


Рис. 2.5. Измеренные осциллограмма и спектр фазного напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

Для сравнения результатов измерений при различных режимах гибки труб на рис. 2.6-2.7 приведены осциллограммы токов и напряжений на стороне 0,4 кВ при гибке трубы № 17 (табл. 1.2).

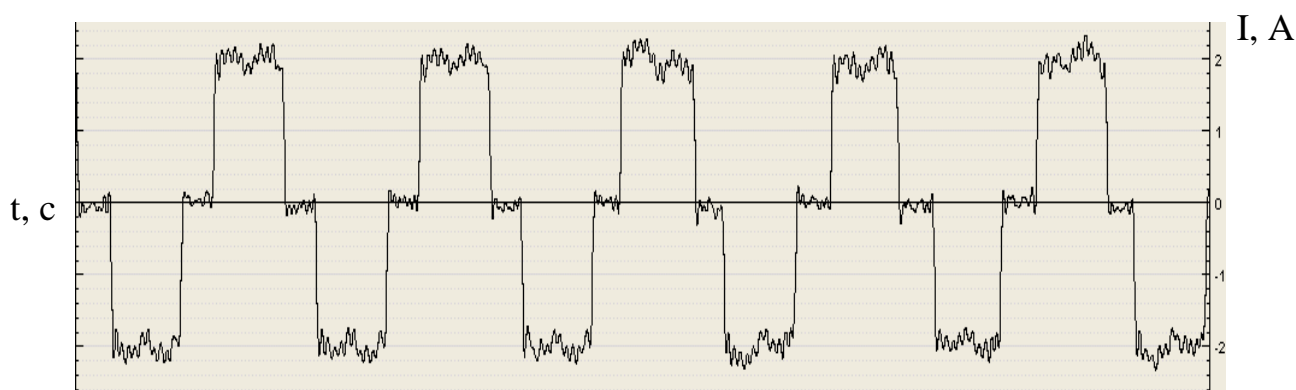


Рис. 2.6. Измеренная осциллограмма фазного тока на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

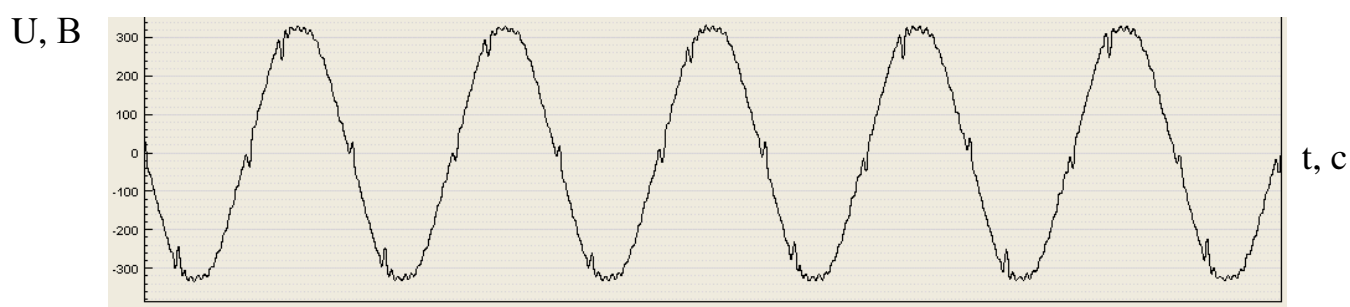


Рис. 2.7. Измеренная осциллограмма фазного напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

Как видно из представленных таблиц, осциллограмм и спектров, в системе электроснабжения присутствуют высокоамплитудные 5-я и 7-я гармоники по току и имеет место несимметрия напряжения по фазам. Для считывания измеренных значений с прибора «Энергомонитор-3.3 Т1» используется программа EmWorkNet. Ее интерфейсное окно представлено на рис. 2.8.

$I_{A(1)}$, A	$K_{IA(2)}$, %	$K_{IA(3)}$, %	$K_{IA(4)}$, %	$K_{IA(5)}$, %	$K_{IA(6)}$, %	$K_{IA(7)}$, %	$K_{IA(8)}$, %	$K_{IA(9)}$, %	$K_{IA(10)}$, %	$K_{IA(11)}$, %	$K_{IA(12)}$, %	$K_{IA(13)}$, %
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,42	1,40	0,97	0,92	13,01	0,35	8,22	1,09	0,87	1,01	4,50	0,37	3,93
2,04	1,56	1,05	1,07	20,21	0,51	12,26	1,10	0,81	1,04	7,14	0,56	5,79
1,78	0,62	0,61	0,50	20,82	0,36	12,78	0,45	0,38	0,45	8,23	0,32	6,44
1,79	0,39	0,34	0,24	20,85	0,16	12,81	0,14	0,15	0,15	8,39	0,15	6,63
1,76	0,36	0,33	0,22	20,95	0,10	12,74	0,07	0,15	0,13	8,42	0,10	6,64
1,74	0,36	0,35	0,23	20,98	0,10	12,70	0,09	0,17	0,14	8,46	0,12	6,63
1,73	0,37	0,38	0,26	20,99	0,11	12,65	0,11	0,17	0,14	8,44	0,13	6,60
1,73	0,36	0,36	0,23	20,95	0,09	12,70	0,07	0,15	0,12	8,41	0,12	6,65
1,73	0,36	0,36	0,22	20,91	0,12	12,70	0,09	0,14	0,12	8,42	0,12	6,64
1,73	0,36	0,39	0,23	20,98	0,10	12,64	0,09	0,16	0,14	8,43	0,12	6,59
1,72	0,38	0,39	0,26	21,02	0,11	12,61	0,11	0,19	0,15	8,43	0,14	6,60
1,72	0,38	0,39	0,27	21,01	0,10	12,62	0,10	0,17	0,16	8,44	0,12	6,60
1,71	0,37	0,39	0,26	20,97	0,11	12,66	0,11	0,15	0,15	8,43	0,11	6,63
1,72	0,38	0,42	0,24	21,01	0,10	12,62	0,10	0,16	0,14	8,45	0,11	6,61
1,72	0,38	0,40	0,23	21,04	0,11	12,61	0,11	0,17	0,13	8,46	0,13	6,61
1,71	0,37	0,42	0,23	21,00	0,10	12,64	0,12	0,21	0,13	8,48	0,12	6,61
1,71	0,38	0,40	0,23	21,04	0,12	12,60	0,12	0,17	0,13	8,45	0,11	6,63

Рис. 2.8. Отображение измеренных значений в программе EmWorkNet

Для подтверждения результатов, полученных при измерениях с использованием прибора «Энергомонитор-3.3 Т1», были проведены аналогичные измерения с использованием прибора Chavin Arnoux CA8335. Осциллограммы и спектры напряжений и токов на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/6/0,4 представлены на рис. 2.9, 2.10.

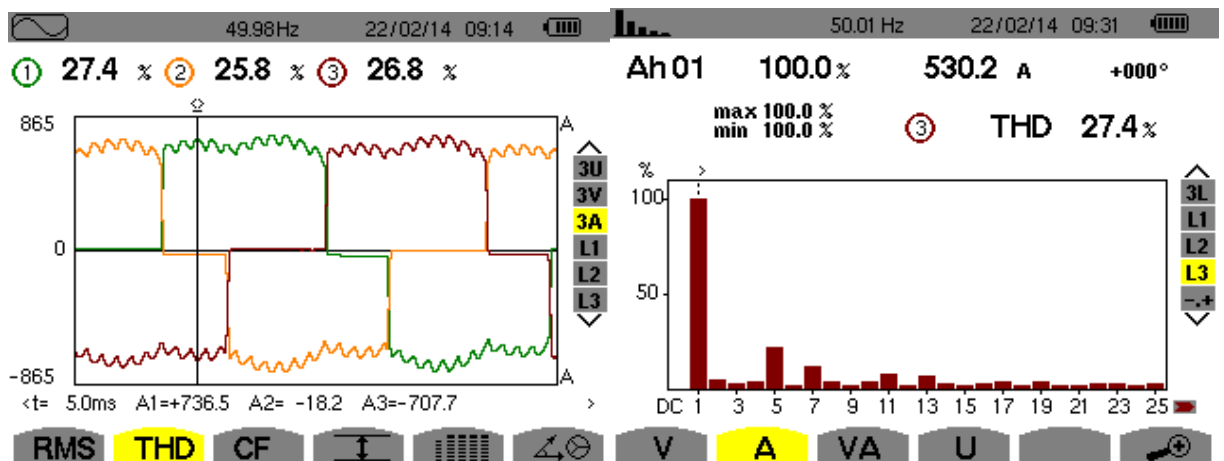


Рис. 2.9. Измеренные осциллограмма и спектр фазного тока на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/6/0,4

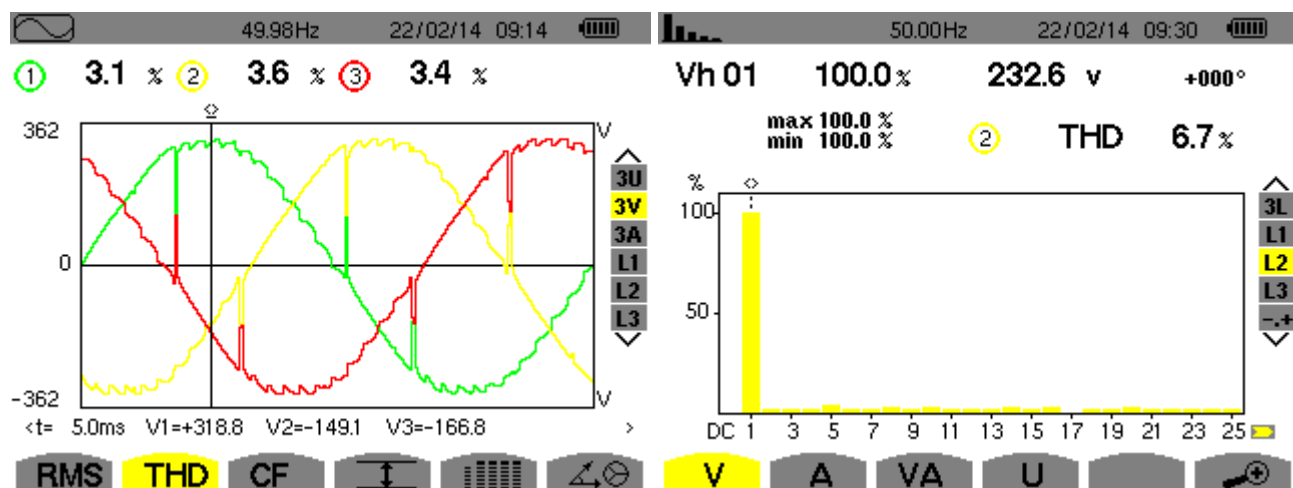


Рис. 2.10. Измеренные осциллограмма и спектр фазного напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/6/0,4

Как следует из анализа измерений, расхождение между результатами, полученными с использованием двух приборов, незначительное. Кроме нечетных гармоник, не кратным трем, присутствуют четные гармоники. Это объясняется наличием помех, генерируемых соседними электроприемниками.

2.2. Разработка имитационной модели системы электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465

Аналитический расчет ПКЭ в узле нагрузки с ЭИН представляется весьма сложной задачей, при решении которой невозможно учесть все факторы влияния. Поэтому для оценки влияния электроприемников с нелинейными вольт-амперными характеристиками на питающую сеть и окружающих электроприемников проведено имитационное моделирование. Одним из средств построения таких моделей является программный пакет *Matlab 7*.

Для построения имитационной модели системы электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465 и получения исходной информации для определения суммарных коэффициентов несинусоидальности напряжений и токов необходимо определить сопротивления схемы замещения СЭП с ЭИН и мощности трёхфазного короткого замыкания в узлах системы электроснабжения.

Как следует из однолинейной схемы электроснабжения, к одной из секций шин цеховой подстанции подключены два электроприемника с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Для расчетного определения суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению составлена схема замещения. Результаты расчетов представлены в таблице 2.8. Расчет производился в соответствии со следующей методикой [48].

Активное и индуктивное сопротивления трехфазного трансформатора соответственно:

$$R_T = \frac{P_k \cdot 10^3}{3 \cdot I_H^2}; \quad X_T = \frac{10 \cdot U_k \cdot U_{ном}^2}{S_H}, \quad (2.1)$$

где P_k – потери короткого замыкания, кВт; I_H – номинальный ток первичной обмотки, А; U_k – напряжение короткого замыкания, %; U_H – номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ; S_H – номинальная полная мощность, кВА.

Для трехобмоточного трансформатора ТДТН-25000/110 активное сопротивление одинаково для всех трех обмоток и определяется по (2.1).

Реактивное сопротивление вычисляется по (2.1), но напряжение короткого замыкания для каждой обмотки определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} U_{кв} &= 0,5 \cdot (U_{ВН} + U_{ВС} - U_{СН}); \\ U_{кс} &= 0,5 \cdot (U_{СН} + U_{ВС} - U_{ВН}); \\ U_{кн} &= 0,5 \cdot (U_{ВН} + U_{СН} - U_{ВС}); \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $U_{ВН}$ – напряжение холостого хода для обмоток 110/6 кВ, $U_{СН}$ – напряжение холостого хода для обмоток 35/6 кВ, $U_{ВС}$ – напряжение холостого хода для обмоток 110/35 кВ.

Активное и реактивное сопротивление кабельных линий определяется как:

$$R_{каб} = \frac{R_0 \cdot l}{3}; \quad X_{каб} = \frac{X_0 \cdot l}{3}; \quad (2.3)$$

где X_0 – реактивное сопротивление кабельной линии длиной 1м, R_0 – активное сопротивление кабельной линии длиной 1м, l – длина кабеля.

Сопротивления в схеме замещения приведены к номинальному напряжению стороны 0,4 кВ сетевого трансформатора ТДТН-25000/110.

Таблица 2.8. Результаты расчетов параметров схемы замещения

Наименование элемента системы электроснабжения	Обозначение на схеме	Напряжение, кВ	Активное сопротивление $R, \text{Ом}$	Реактивное сопротивление $X, \text{Ом}$
Воздушная линия электропередачи ВЛ-110 АС-185	ВЛ-110	110	0	3
Трехфазный трехобмоточный трансформатор ТДТН-25000	ТДТН-25000/110/35/6	110/35/6	ВН – 0,029 СН – 0,029 НН – 0,029	ВН – 0,057 СН – 0,001 НН – 0,036
Кабельная линия ЗАСБ-30185	ЗАСБ-30185	6	0,037	0,016
Кабельная линия КЛ1	КЛ1	6	0,007	0,013
Трехфазный трансформатор ТМЗ-1000	ТМЗ-1000/6/0,4	6/0,4	0,002	0,009
Кабельная линия КЛ2	КЛ2	0,4	0,001	0,0007

Так как источником высших гармоник тока и напряжения, генерируемых в систему электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465, является ТПЧ-800, то для оценки ЭМС необходимо составить его схему замещения, дополненную эквивалентной схемой замещения индуктора и нагреваемого тела, в которой система «индуктор - нагреваемое тело» представлена в виде эквивалентных активного $R_{\text{э}}$ и реактивного $x_{\text{э}}$ сопротивлений, определяемых следующим образом [5]:

$$R_{\text{э}} = R_1 + R_2', \quad x_{\text{э}} = x_{s1} + x_{2m}', \quad (2.4)$$

где R_1 – активное сопротивление провода индуктора; x_{s1} – первичная индуктивность рассеяния; R_2' и x_{2m}' – приведенное активное и внутреннее реактивное сопротивление трубы.

Различают два основных способа индукционного нагрева: одновременный, при котором индуктор охватывает всю поверхность детали, подлежащую термообработке; непрерывно-последовательный, при котором узкий индуктор перемещается вдоль нагреваемой детали. В технологическом процессе гибки

трубы применяется непрерывно-последовательный способ нагрева. Расчет параметров индуктора для такого нагрева имеет несколько особенностей [49].

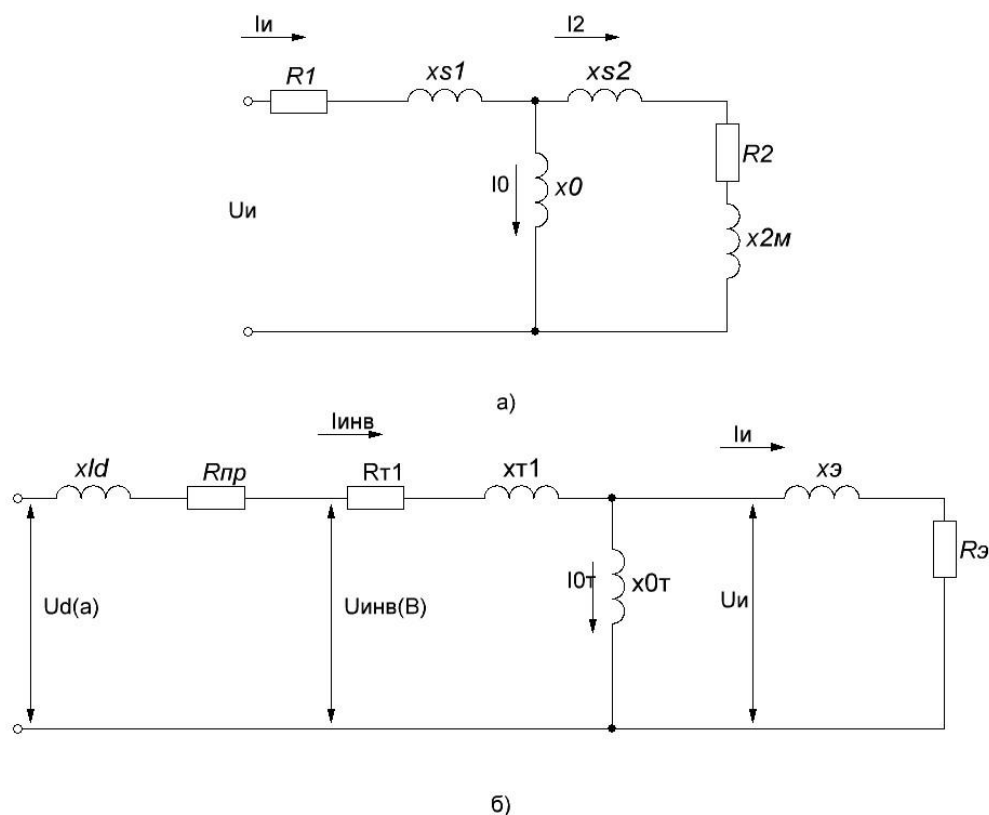


Рис. 2.7. Схемы замещения:

а) полная электрическая схема замещения системы «индуктор – нагреваемое тело»; б) упрощенная схема замещения индуктора с инвертором и закалочным трансформатором в составе преобразователя частоты; x_{S2} – вторичная индуктивность рассеяния; x_0 – реактивное сопротивление зазора между индуктором и трубой; R_2 и x_{2m} – активное и внутреннее реактивное сопротивление трубы; I_{II} – ток, протекающий через индуктор; U_{II} – напряжение на индукторе; I_0 – ток, протекающий в пространстве между индуктором и трубой; I_2 – ток в нагреваемой трубе; R_{T1} и x_{T1} – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки закалочного трансформатора ТМЗ-3200; R_{np} – активное сопротивление инвертора в прямом направлении; x_{LD} – индуктивное сопротивление дросселя звена постоянного тока, I_{0T} – ток, протекающий в воздушном зазоре закалочного трансформатора.

Время нагрева определяется исходя из скорости подачи трубы и длины индуктора. При этом принимается допущение о том, что ширина нагреваемой полосы равна длине индуктора. Горячая глубина проникновения тока, а значит и его частота на индукторе, меняются в зависимости от толщины стенки трубы. Это утверждение справедливо, если считать, что вся мощность выделяется в слое

детали с глубиной, равной горячей глубине проникновения тока, которая, в свою очередь, равна толщине стенки трубы. Для непрерывно-последовательного способа нагрева рекомендуется выделять несколько зон с различным потреблением мощности. Но поскольку длина индуктора довольно мала (0,02 м), и охлаждающая вода попадает на поверхность трубы сразу после индуктора, следует считать, что потребляемая мощность на всех участках нагрева одинакова.

Помимо этого при проведении расчета принимались следующие допущения:

1. Расчет сопротивлений производится для заключительной стадии нагрева – горячего режима, при котором вся поверхность трубы нагрета выше точки магнитных превращений.

2. Удельное электрическое сопротивление стальной трубы неизменно по всему сечению и равно $\rho_2 = 10^{-6}$ Ом·м.

3. Магнитная проницаемость стальной трубы также неизменна по всему сечению и равна $\mu_2 = 1$.

Исходными данными для расчета являются следующие величины: параметры индуктора (внутренний диаметр D_1 , длина L_1 , толщина стенки S_1), параметры трубы (внешний диаметр D_2 , толщина стенки S_2), скорость подачи трубы v , частота напряжения на выходе преобразователя частоты f , температура нагрева поверхности трубы T_1 , действующее значение фазного напряжения на входе преобразователя частоты U_ϕ .

Последовательность расчета сводится к определению следующих параметров [5,49].

Масса участка трубы, подвергаемого нагреву в каждый момент времени, и время нагрева:

$$G = \pi \cdot L_1 \cdot \frac{D_2^2 \cdot (D_2 \cdot 2 \cdot S_2)^2}{4} \cdot \rho, \quad t = \frac{L_1}{v}, \quad (2.5)$$

где ρ – плотность стали, $\rho = 7800$ кг/м³;

Поскольку при нагреве температура наружной поверхности трубы $T_1 = 950$ °С, а температура внутренней поверхности $T_2 = 750$ °С, то принимается средняя

температура нагреваемой трубы $T_{CP} = 850$ °С. Исходя из этого средняя полезная мощность нагрева:

$$P_1 = \frac{G \cdot 668 \cdot T_{CP}}{t}. \quad (2.6)$$

Тепловые потери мощности и средняя мощность в заготовке:

$$\Delta P_1 = 3,74 \cdot \frac{L_1}{\log\left(\frac{D_1}{D_2}\right)}; \quad P_2 = 1,05 \cdot (P_1 + \Delta P_1). \quad (2.7)$$

Глубина проникновения тока в нагреваемую трубу Δ и величина, характеризующая соотношение между глубиной проникновения тока и толщиной стенки трубы, m определяется как:

$$\Delta = \frac{0,5}{\sqrt{f}}; \quad m = \frac{D_2}{\sqrt{2} \cdot \Delta}. \quad (2.8)$$

Активное и внутреннее реактивное сопротивление трубы:

$$R_2 = X_2 = \frac{\pi \cdot 10^6 \cdot m \cdot \sqrt{2}}{L_1}. \quad (2.9)$$

Реактивное сопротивление отрезка пустого индуктора бесконечной длины:

$$X_{10} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \pi^2 \cdot D_1^2 \cdot 10^7}{L_1}. \quad (2.10)$$

Реактивное сопротивление пространства между индуктором и трубой:

$$X_0 = X_{10} \cdot \frac{k_1}{1 - k_1}. \quad (2.11)$$

Коэффициент k_1 определяется из графика зависимости $k_1 = f(D_1/L_1)$, представленного в [3].

Реактивность рассеяния индуктора определяется по следующей формуле:

$$X_s = \frac{2\pi \cdot f \cdot \pi^2 \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot 10^7}{L_1}. \quad (2.12)$$

Коэффициент приведения сопротивления трубы:

$$c = \frac{I}{\left(\frac{R_2}{X_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{(X_s + X_2)}{X_0}\right)^2}. \quad (2.13)$$

Приведенное активное и реактивное сопротивления трубы:

$$R_2' = c \cdot R_2; \quad X_{2m}' = c \cdot \left(X_s + X_2 + \frac{(X_s + X_2)^2 + R_2^2}{X_0} \right), \quad (2.14)$$

Далее следует определить активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода. Для этого, в первую очередь, необходимо найти сопротивление трубы индуктора постоянному току и коэффициент изменения внутреннего реактивного сопротивления для переменного тока:

$$R_{1П} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot \pi \cdot D_l}{L_l \cdot S_l}; \quad k_x = \frac{2 \cdot S_l^2}{3 \cdot D^2}. \quad (2.15)$$

Принимается коэффициент изменения активного сопротивления для переменного тока $k_r = 1$. Тогда активное и внутреннее реактивное сопротивления индуктирующего провода рассчитываются следующим образом:

$$R_l = R_{1П} \cdot k_r; \quad X_l = R_{1П} \cdot k_x. \quad (2.16)$$

В итоге эквивалентное активное, реактивное и полное сопротивление системы «индуктор – нагреваемая труба»:

$$R_e = R_l + R_2'; \quad X_e = X_l + X_{2m}'; \quad Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}. \quad (2.17)$$

Напряжение и ток на индукторе можно найти по известным соотношениям:

$$I_u = \sqrt{\frac{P_2}{R_2'}}; \quad U_u = I \cdot Z_e. \quad (2.18)$$

Далее, для возможности оценки влияния установки индукционного нагрева на электромагнитную совместимость с сетью в зависимости от режима нагрева, определяется угол управления выпрямителя α и угол опережения инвертора β [14, 33].

На основании схемы замещения (рис. 2.7 (а)) и с учетом того, что для схемы замещения трансформатора справедливо соотношение $X_{0m} \gg Z_{m1}$, напряжение на выходе инвертора определяется как:

$$U_{инв} = U_u + I_u (R_{m1} + X_{m1}). \quad (2.19)$$

Угол управления инвертора β определяется следующим образом:

$$\beta = \arccos \frac{U_{инв}}{U_{инв0}}, \quad (2.20)$$

где $U_{ИНВ0} = 1000$ В, - максимальное напряжение на выходе преобразователя частоты ТПЧ-800.

Напряжение на выходе управляемого выпрямителя определяется как:

$$U_d = U_{инв} + I_{инв} (R_{np} + X_{ld}), \quad (2.21)$$

где $I_{ИНВ}$ – значение тока на выходе инвертора. Необходимо отметить, что арифметическое сложение активного и индуктивного сопротивлений возможно по причине того, что U_D с учетом сглаживающего действия дросселя является постоянным.

Угол управления выпрямителя:

$$\alpha = \arccos \frac{U_d}{U_{d0}}, \quad (2.22)$$

где $U_{d0} = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{\pi} U_{\phi}$, - значение напряжения на выходе выпрямителя при $\alpha=0$.

Результаты расчетов сведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9. Результаты расчетов

Размеры трубы $D_1 \times S_1$	Рассчитанные величины						
	P_2 , кВт	R_3 , Ом	X_3 , Ом	U_u , В	I_u , А	α	β
219x28	98,45	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	38	20430	$35,6^\circ$	$32,5^\circ$
273x13	98,76	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	43,5	16270	$43,7^\circ$	42°
325x19	100	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	40,9	13520	$18,5^\circ$	$29,9^\circ$
273x11	63,5	$7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	35,5	12860	$40,7^\circ$	$35,6^\circ$
219x13	88,9	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	38,3	18470	$50,8^\circ$	41°

Как видно из таблицы 2.9, углы управления выпрямителя и инвертора изменяется в большом диапазоне, что позволяет производить качественную

обработку трубных заготовок широкой номенклатуры. С целью проведения вычислений углов управления для любого произвольного режима гибки была разработана и зарегистрирована соответствующая программа на основе вышеизложенного расчета. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613018 [50] и листинг программы приведены в приложении 2.

На рис. 2.11-2.12 представлена имитационная модель системы электроснабжения электроприемников трубогибочного стана составленная без учета фильтрокомпенсирующих устройств [42]. В качестве источника питания используется блок 3-Phase Source, включающий в себя три источника переменного напряжения, соединенных в звезду [51-52].

Блоки измерения однофазного и трехфазного тока и напряжения (*Voltage Measurement, Current Measurement, Three-Phase V-I Measurement*) выполняет измерение мгновенного значения тока (напряжения), протекающего через соединительную линию. Выходным сигналом является обычный сигнал Simulink, который далее выводится на осциллограф. Положительное направление тока (напряжения) задается знаками «+» и «-» на пиктограмме блока.

Двигатель постоянного тока M1 моделируется посредством блока *DC Machine*. В модели блока присутствуют порты для подключения якорной обмотки и обмотки возбуждения. Также имеется порт для подачи момента сопротивления движению. На выходном порту формируется векторный сигнал, состоящий из четырех элементов: скорости, тока якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента машины. Окно ввода параметров блока представлено на рис. 2.13.

Блок универсальный мост *Universal Bridge* моделирует работу выпрямителя и инвертора, входящего в состав ТПЧ, а также тиристорного преобразователя в системе ТП-Д. Модель позволяет выбирать количество плеч моста (от 1 до 3), вид полупроводниковых приборов (диоды, тиристоры, идеальные ключи, а также полностью управляемые тиристоры, *IGBT* и *MOSFET* транзисторы, шунтированные обратными диодами).

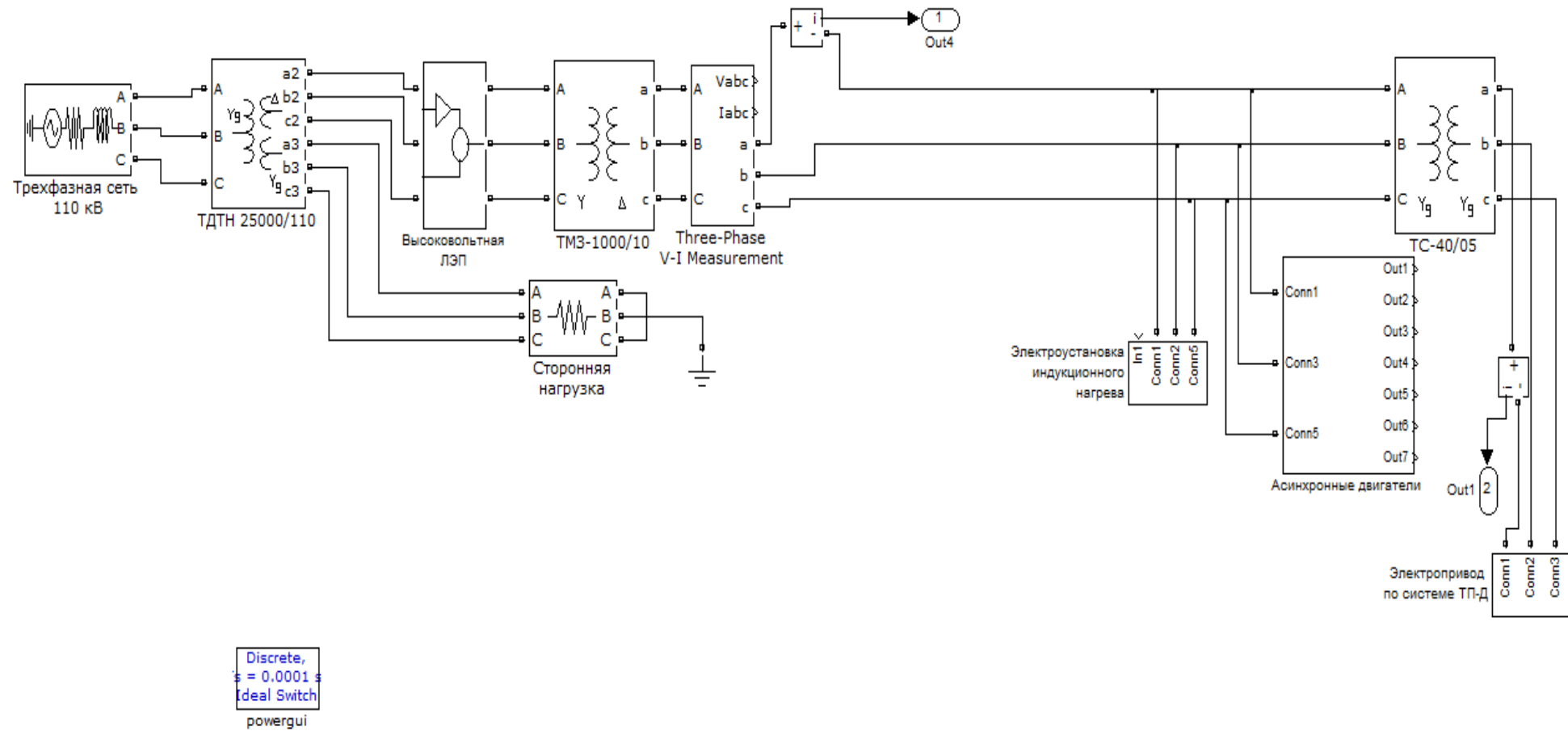
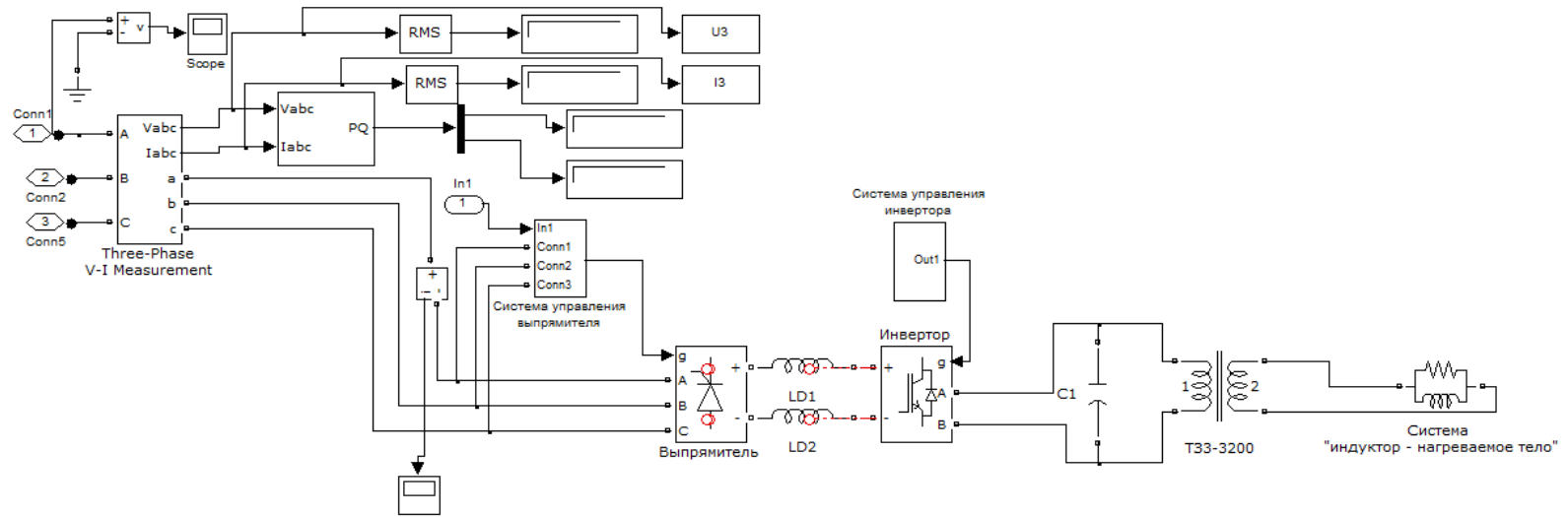
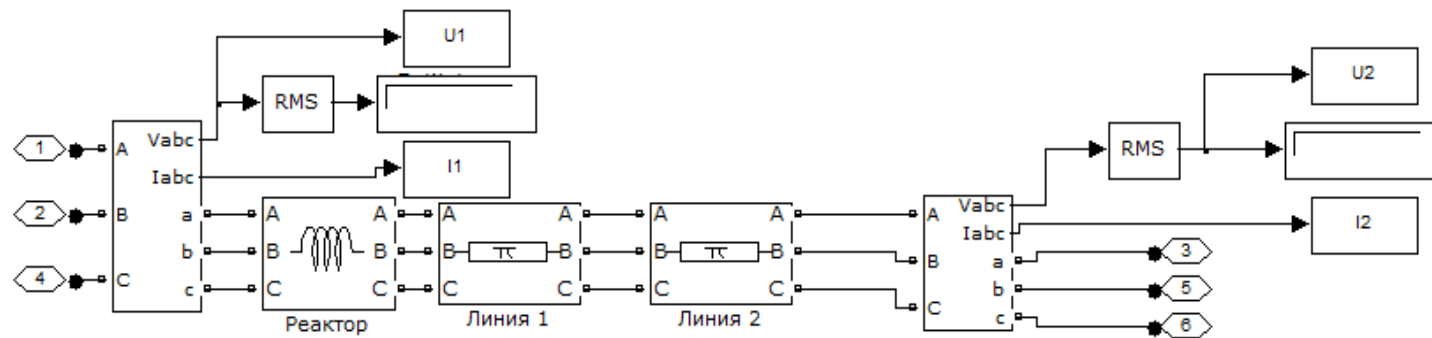


Рис. 2.11. Имитационная модель схемы электроснабжения трубогибочного стана



а)



б)

Рис. 2.12. Модели блоков ЭИН (а) и «Высоковольтная ЛЭП» (б)

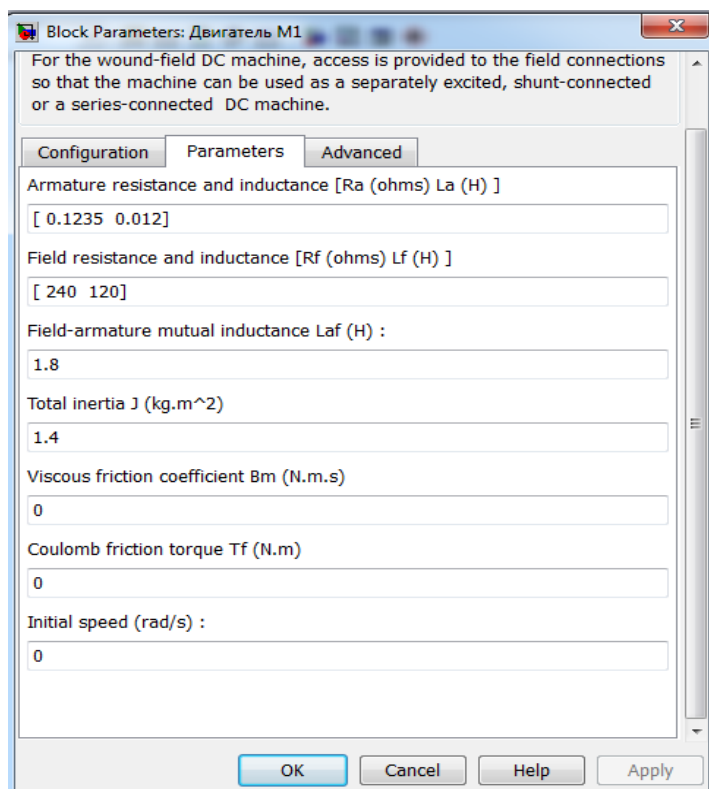


Рис. 2.13. Окно ввода параметров блока *DC Machine*

Блок *Linear Transformer* необходим для виртуального представления высокочастотного закалочного трансформатора ТЗЗ-3200. Его функция заключается в согласовании параметров преобразователя частоты и нагрузки. Окно ввода параметров блока *Linear Transformer* представлено на рис. 2.14.

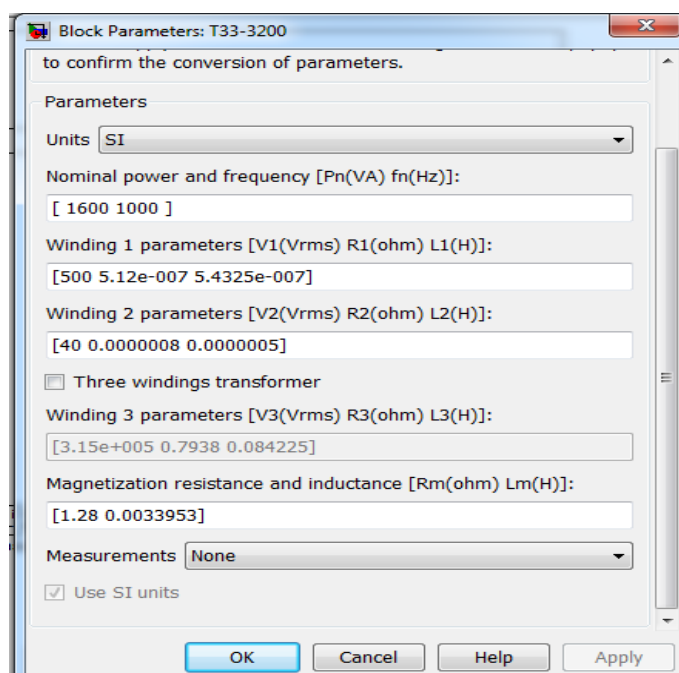


Рис. 2.14. Окно ввода параметров блока *Linear Transformer*

Моделирование работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов (ТС-40/05, ТМЗ-1000/10 и ТДТН-25000/110) осуществляется при помощи блока *Three-phase Transformer*, построенного на основе трех однофазных трансформаторов. Окно ввода параметров трехфазного двухобмоточных трансформаторов (ТС-40/05, ТМЗ-1000/10) представлено на рис. 2.15.

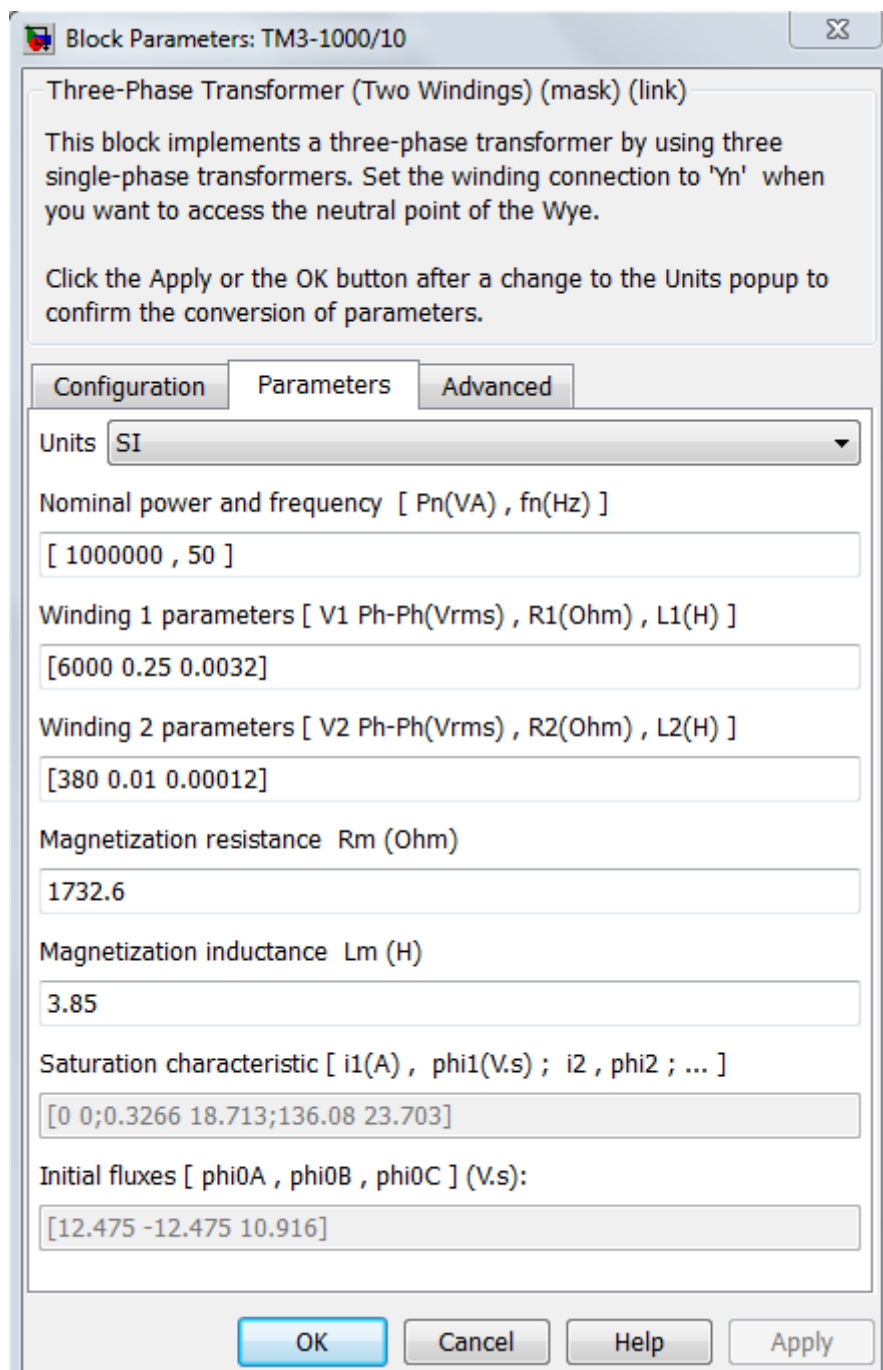


Рис. 2.15. Окно для ввода параметров трехфазного двухобмоточного трансформатора

Окно ввода параметров трехфазного трехобмоточного трансформатора (ТДТН-25000/110) представлено на рис. 2.16.

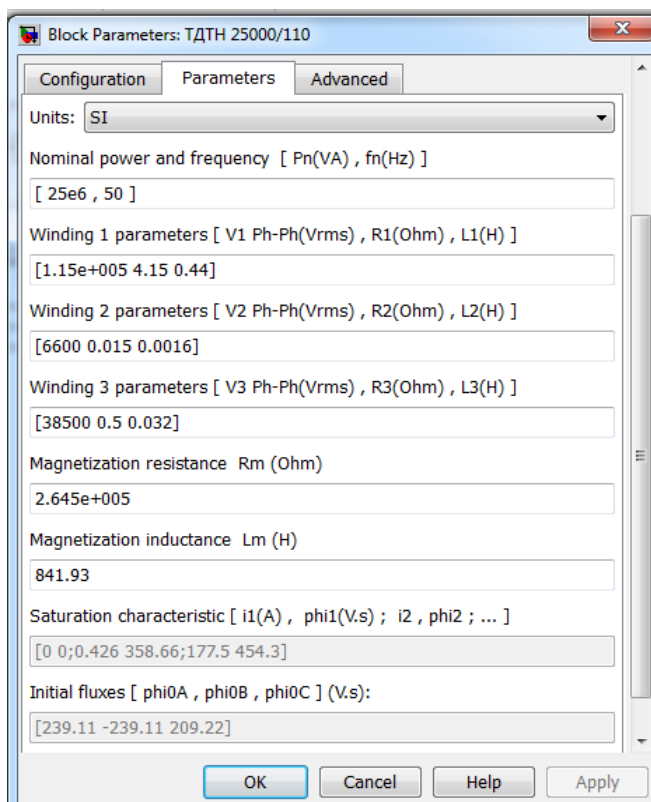


Рис. 2.16. Окно для ввода параметров трехфазного трехобмоточного трансформатора

Блок параллельная RLC -цепь моделирует работу батареи конденсаторов и активно-индуктивной нагрузки преобразователя частоты, представляющей собой индуктор и участок нагреваемого тела. Батарея конденсаторов применяется для компенсации реактивной мощности, выделяющейся при нагреве. Без ее использования коэффициент мощности установки составляет порядка 0,2, а вместе с ней – 0,7÷0,8.

Асинхронные двигатели моделируются блоками *Asynchronous Machine*, которые имеют входы для подключения статорной обмотки и роторной обмотки (если необходимо), а также порт для подачи момента сопротивления движению. На рис. 2.17 представлено окно для ввода параметров асинхронного двигателя. Расчет параметров осуществляется в соответствии с [53].

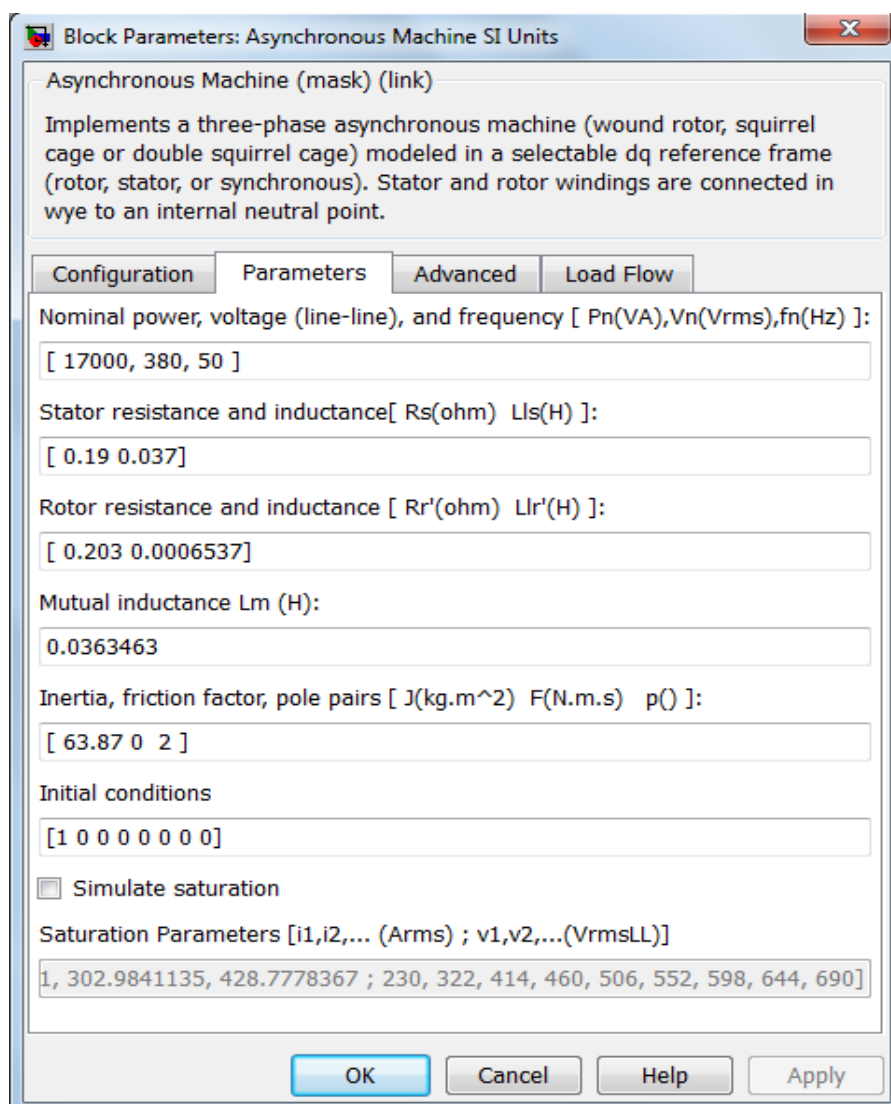


Рис. 2.17. Окно для ввода параметров асинхронного двигателя

Источник импульсного сигнала *Pulse Generator* является базовым блоком системы управления инвертором. Он формирует управляющие импульсы на открытие вентиля инвертора.

Синхронизированный шестипульсный генератор применяется для управления выпрямителем преобразователя частоты и тиристорным преобразователем в регулируемом электроприводе по системе ТП-Д. Синхронизированный шестипульсный генератор используется для открытия вентиля шестипульсного преобразователя. Выходом блока является вектор из шести импульсов, каждый из которых синхронизирован с напряжением на тиристорах. Импульсы генерируются после прохождения через ноль коммутирующего напряжения на тиристорах с учетом угла управления.

Результаты моделирования при гибке трубы № 2 (см. табл. 1.2) представлены на рис. 2.18-2.19.

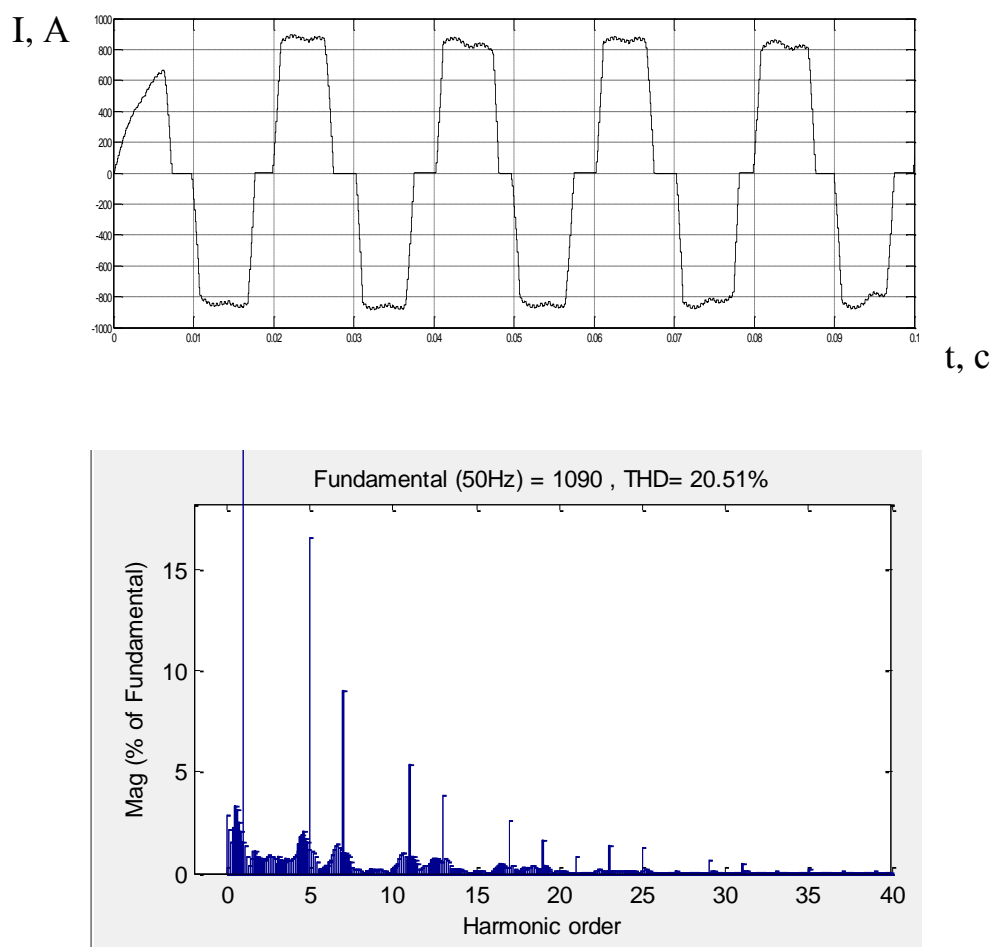


Рис. 2.18. Осциллограмма и спектр фазного тока на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

Для сравнения результатов имитационного моделирования при различных режимах гибки труб на рис. 2.20-2.21 приведены осциллограммы токов и напряжений на стороне 0,4 кВ при гибке трубы № 17 (табл. 1.2).

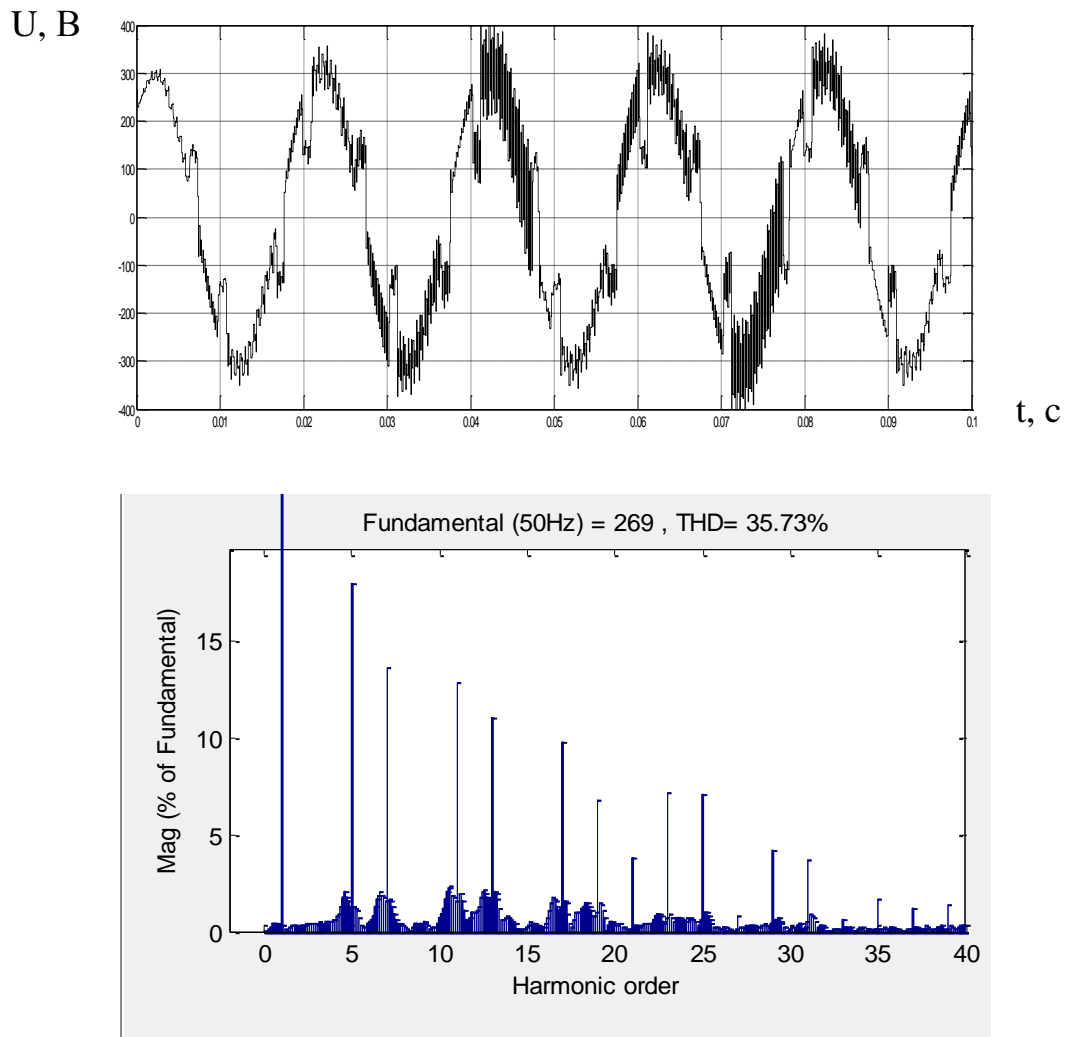


Рис. 2.19. Осциллограмма и спектр фазного напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10

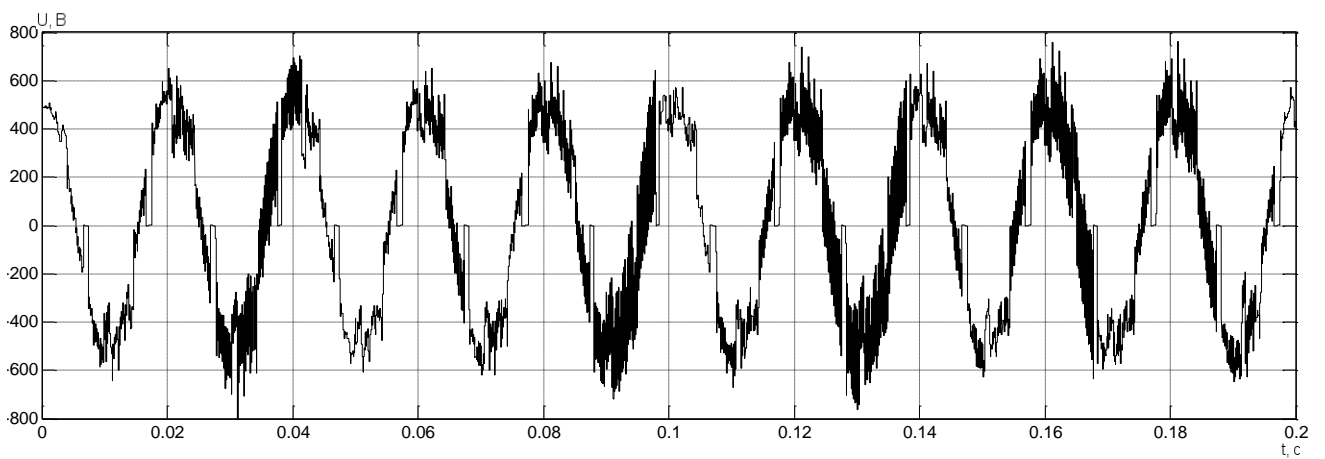


Рис. 2.20. Осциллограмма фазного напряжения на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10 при гибке трубы № 17, табл. 1.2

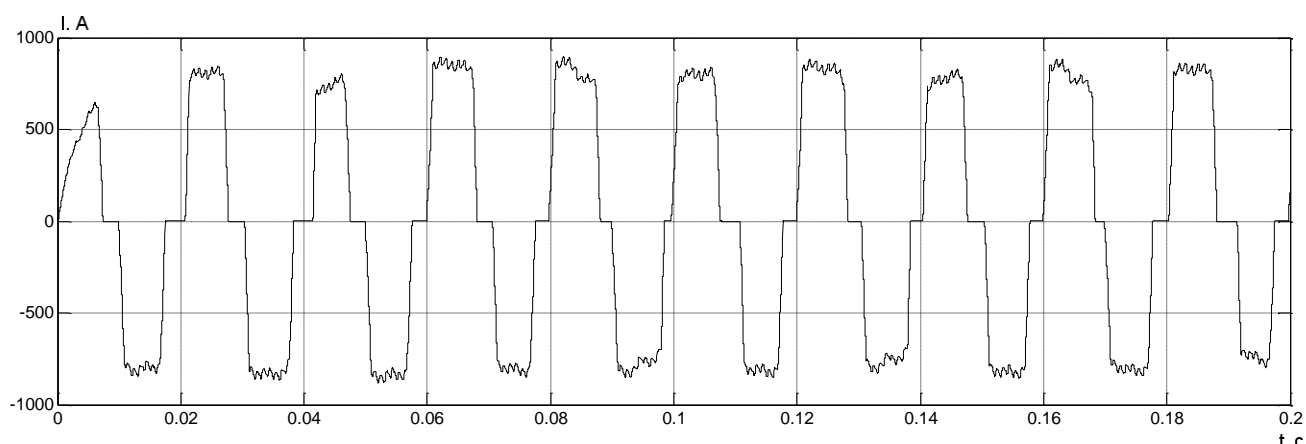


Рис. 2.21. Осциллограмма фазного тока на стороне 0,4 кВ трансформатора ТМЗ-1000/10 при гибке трубы № 17, табл. 1.2

Анализ представленных рисунков позволяет сделать вывод о том, что в узле нагрузки трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465 значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению $\text{THD} = 24,32\%$ (рис. 2.10) превышает максимально допустимое значение в соответствии стандарта ГОСТ 32144-2013 (8%).

2.3. Анализ результатов измерения, моделирования ПКЭ

Для более объективной оценки уровня высших гармоник напряжения в системе электроснабжения трубогибочного стана было проведено соответствующее измерение на общей шине ЦРП (точка И2, рис. 2.1). Результаты этого измерения представлены на рис. 2.22.

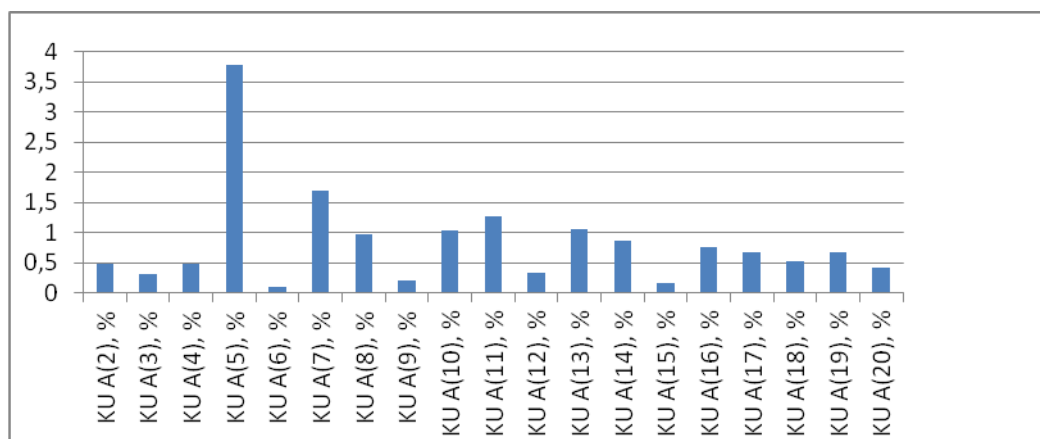


Рис. 2.22. Измеренный спектр напряжения на общей шине ЦРП

Было установлено, что суммарный коэффициент гармонических составляющих по напряжению на общей шине ЦРП превышает предельно допустимые показатели и составляет 5,5 – 6 % при допустимых в [30] 5%.

Результаты суточных измерений потребляемого тока и суммарных коэффициентов гармонических составляющих по току k_i и напряжению k_u представлены на рис. 2.23 – 2.25.

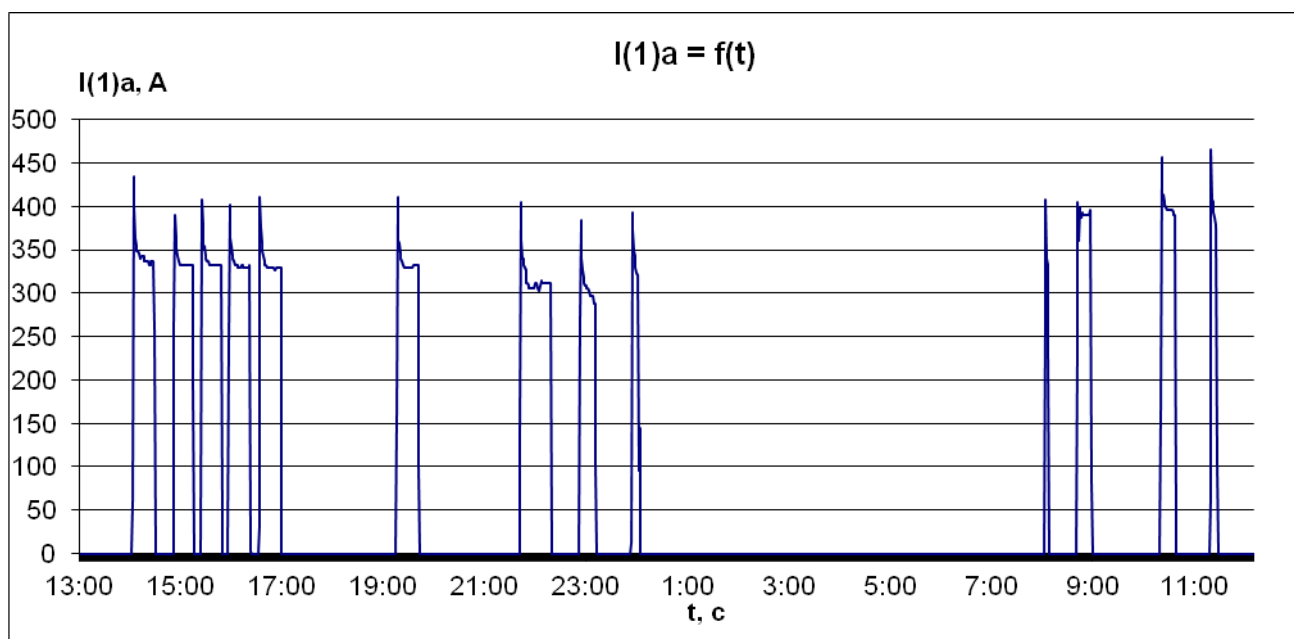


Рис. 2.23. График изменения потребляемого тока ТПЧ-800 в течение суток

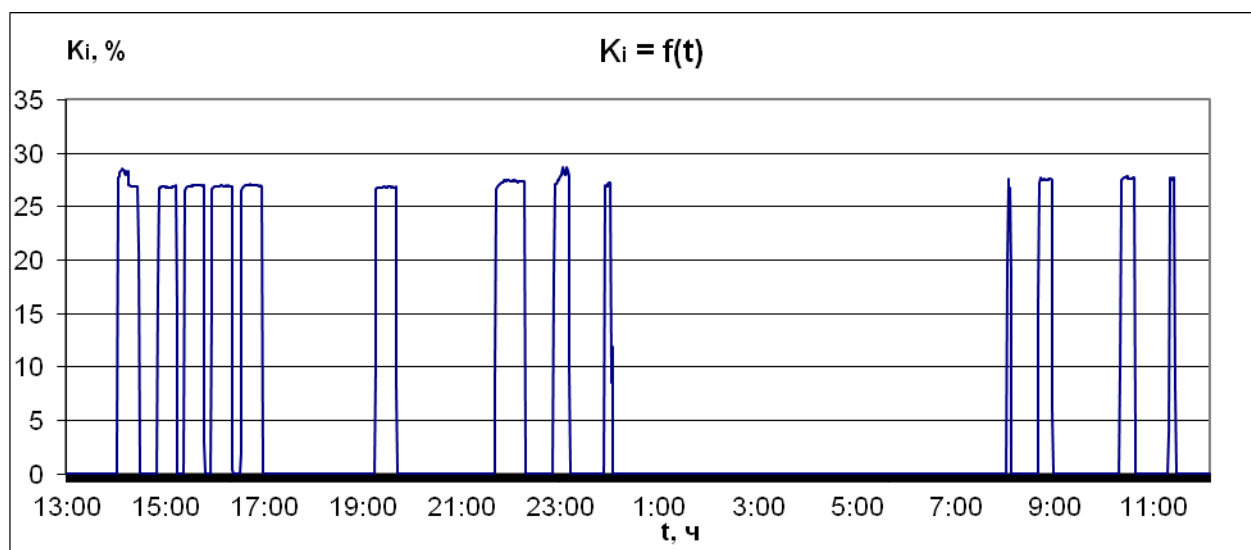


Рис. 2.24. График изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих по току в течение суток

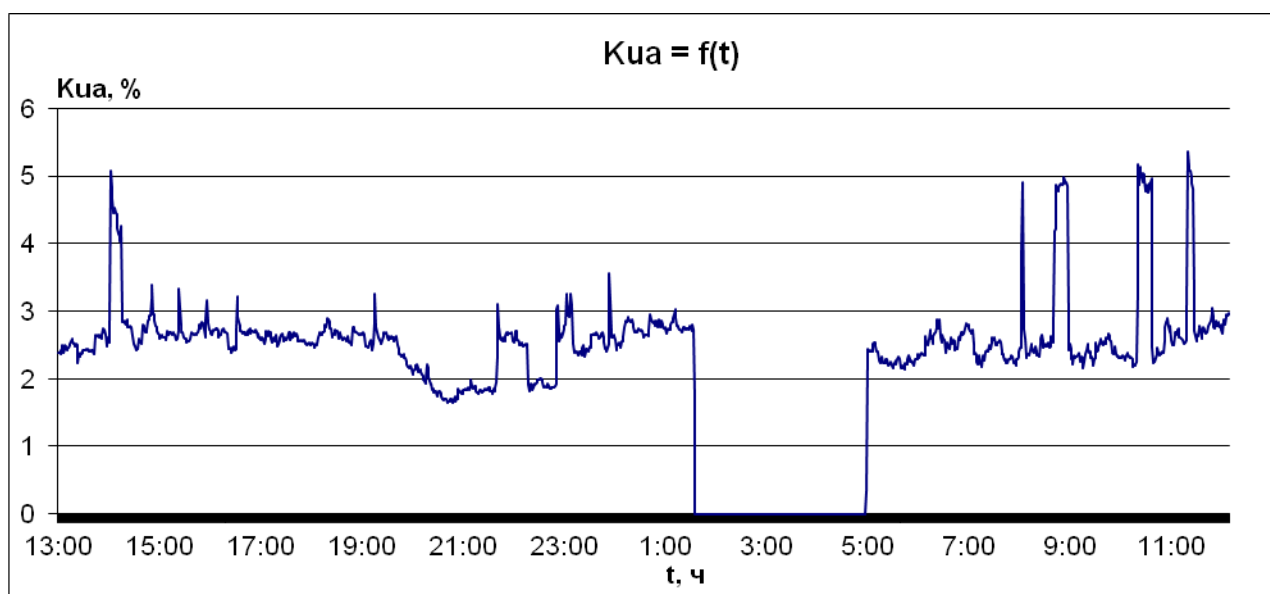


Рис. 2.25. График изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению в течение суток

Анализ проведенных измерений показывает, что имитационная модель достаточно близко воспроизводит динамические процессы, происходящие в реальной системе. K_I принимает одинаковые значения, K_U измеренный значительно ниже промоделированного. Это можно объяснить наличием измерительных трансформаторов, оказывающих сглаживающий эффект.

Расчетное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению определяется по формуле [54]:

$$K_U = \frac{S_{np}}{S_{кз}} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \sin \frac{9}{\pi^2}}{\pi \cdot \left(\frac{S_{np}}{S_{кз}} + x_{np} \right)}}, \quad (2.23)$$

где x_{np} – реактивное сопротивление преобразователя частоты, которое

определяется по формуле $x_{np} = \frac{U_k \cdot S_{np}}{S_{mp} \cdot 100}$, S_{np} – полная мощность

преобразователя частоты ($S_{np} = 235$ кВА), S_{mp} – полная мощность согласующего трансформатора, U_k – напряжение короткого замыкания согласующего трансформатора ($U_k = 4,7$ %), $\cos \varphi = 0,9$, $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в точке подключения преобразователя частоты ($S_{кз} = 5000$ кВА).

Результаты моделирования, измерений и расчетов представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Значения параметров энергопотребления СЭПП с ЭИН

Размеры трубы ($D \times S$, мм)	Значения параметров, полученные в результате:								
	измерений/ моделирования						расчетов		
	$U_L, В$	$I_A(1), А$	$P, кВт$	$Q, квар$	$k_U, \%$	$k_I, \%$	k_M	$I, А$	$k_U, \%$
219x13	397/ 365	720/ 660	273/ 394	390/ 530	11,5/ 24,5	30,5/ 36	0,6/ 0,596	144	17,2
273x24	397/ 376	729/ 683	366/ 442	339/ 548	9,4/ 22,7	28/ 37	0,73/ 0,63	149	17,5
325x38	397/ 363	777/ 723	438/ 553	408/ 423	6,5/ 20,7	27,7/ 37	0,88/ 0,79	155	18,8
426x19	396/ 370	612/ 610	381/ 341	165/ 206	4,8/ 26,3	28/ 34	0,95/ 0,86	122	14,8
530x25	396/ 378	651/ 637	429/ 410	131/ 163	5/ 25,4	28/ 36	0,95/ 0,93	130	15,7

Примечание: в таблице 2.7 представлены максимальные значения электроэнергетических величин для каждого режима гибки трубы.

Анализ таблицы 2.7 показывает, что для больших труб коэффициент мощности довольно высок [55]. Это объясняется меньшим зазором между индуктором и нагреваемой трубой и неточностями при выборе частоты тока. Таким образом, в результате технологического процесса гибки труб в установке индукционного нагрева уровень гармоник тока и напряжения в СЭПП превышает значения установленные стандартом ($K_U = 9,4\% - 11,5\%$ и $K_I = 27,7\% - 30,5\%$). Таким образом влияние высших гармоник на элементы системы электроснабжения значительно, что негативно сказывается на энергетических показателях, уровне надежности и помехоустойчивости системы. Для достижения регламентированного отраслевыми нормативными документами уровня ЭМС в СЭПП с ЭИН целесообразно использовать фильтрокомпенсирующее устройство. Обоснование его структуры производится в главе 3.

Выводы:

1. Измерения основных показателей качества электроэнергии, определяющих электромагнитную совместимость, и энергетических величин СЭПП с ЭИН, проведенные с помощью сертифицированных приборов Энергомонитор – 3.3 Т1 и *Chavin Arnoux SA 8335*, показали наличие высших гармоник, уровень которых превышает допустимые значения. При этом уровень

высших гармоник тока и напряжения зависит от показателей технологического процесса гибки труб.

2. Имитационная модель СЭПП с ЭИН, построенная в среде *Matlab 7* при помощи пакетов *Simulink* и *SimPowerSystem*, позволила определить показатели качества электроэнергии, определяющих электромагнитную совместимость, и энергетические величины СЭПП с ЭИН для всего возможного сортамента труб, подлежащего «горячей» гибке.

3. С помощью разработанной имитационной модели возможно измерение уровня высших гармоник и энергетических величин на участках системы электроснабжения при различном уровне напряжения и при подключении дополнительных электроприемников.

4. Экспериментальные измерения и результаты имитационного моделирования показали хорошую корреляцию между собой, что подтверждает достоверность результатов измерения и моделирования.

5. Для снижения влияния высших гармоник, вызванных использованием преобразователя частоты ТПЧ-800 в составе ЭИН, предпочтительно использовать фильтрокомпенсирующее устройство. При этом, учитывая значительные токи 5-й гармоники (порядка 70 – 150 А), предпочтительно использовать гибридный фильтр в составе резонансного пассивного фильтра, настроенного на частоту 5-й гармоники, и активного параллельного фильтра.

3. Построение фильтрокомпенсирующего устройства для систем электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева

3.1. Гибридный фильтр как средство снижения уровня высших гармоник тока и напряжения

Для обеспечения ЭМС и подавления высших гармоник тока и напряжения в узле нагрузки с ЭИН в первую очередь необходимо воспользоваться пассивными ФКУ. Анализ спектрального состава потребляемого тока и напряжения в узле нагрузки с ЭИН позволяет сделать вывод о том, что доминирующее положение занимает 5-я гармоника. Для ее подавления рационально синтезировать резонансный L-С фильтр. Данный фильтр представляет собой последовательную цепочку, состоящую из емкостного и индуктивного элементов, которая подключается параллельно питающей сети [33].

Проведенные исследования показали, что уровень высших гармоник, начиная с седьмой и выше, составляет не менее 75 % от величины тока искажения. Для их компенсации целесообразно использовать активные фильтры.

Основные преимущества активных фильтров выражаются в следующем [32]:

- эффективная работа фильтров в режиме реального времени;
- возможность одновременной компенсации нескольких высших гармоник;
- возможность полной компенсации высших гармоник напряжения или тока независимо от амплитуд и начальных фаз гармоник;
- отсутствие резонанса с какой-либо гармонической частотой;
- отсутствие дополнительных настроек фильтра.

В составе активных фильтров принято выделять две основных части: силовая часть и система управления [56-58]. Силовая часть включает в себя трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения (АИН) на базе IGBT-транзисторов и накопительный элемент. Поскольку целью работы активного фильтра является подавление высших гармоник тока, он обязан обладать свойствами источника

несинусоидального тока. В связи с этим в качестве накопительного элемента используется конденсатор, включенный на стороне постоянного тока инвертора.

На рис. 3.1 представлена укрупненная принципиальная схема подключения к системе электроснабжения гибридного фильтра [37].

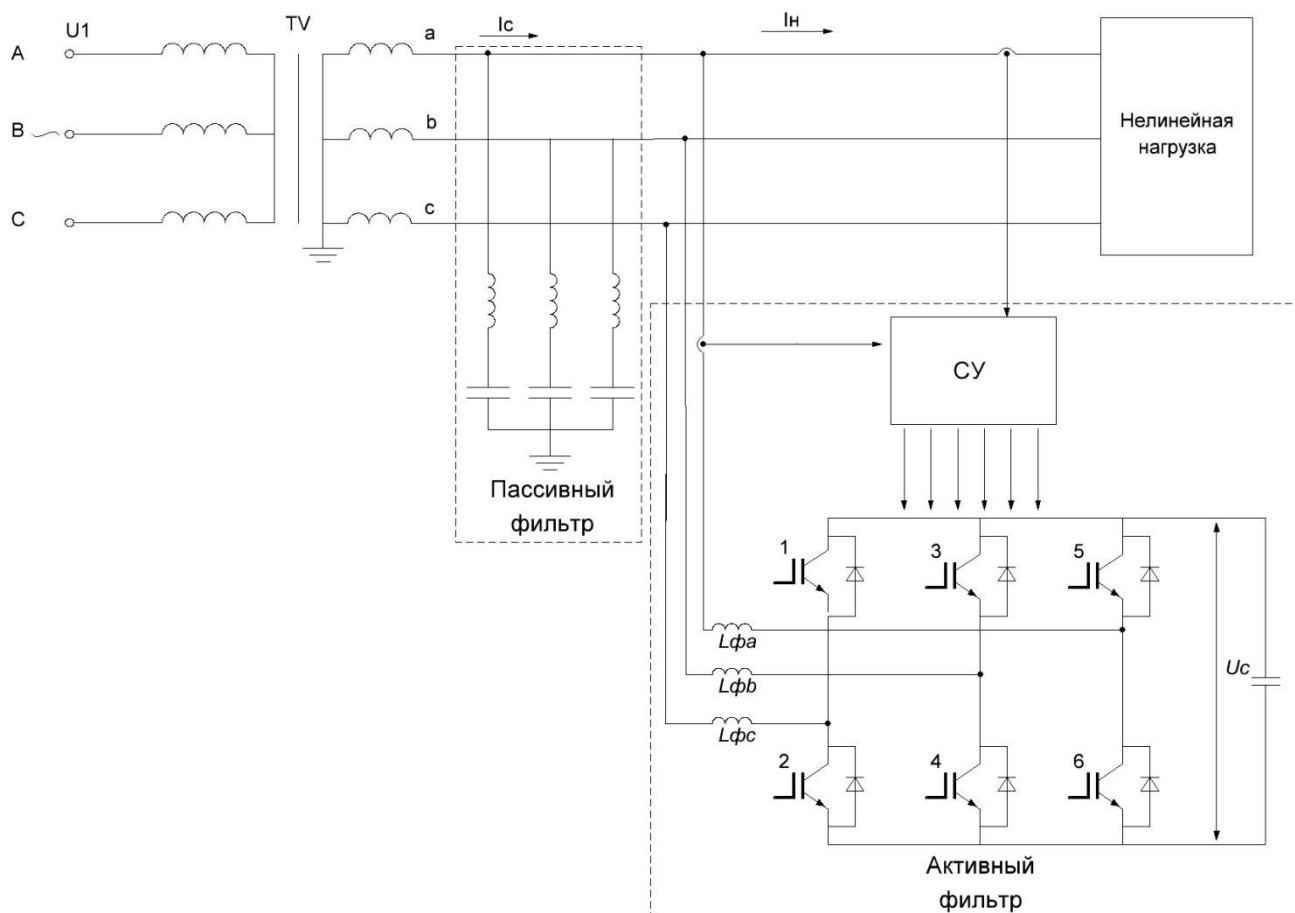


Рис. 3.1. Укрупненная принципиальная схема подключения гибридного фильтра

Одновременно с функцией фильтрации высших гармонических составляющих тока и напряжения, активный фильтр может компенсировать реактивную мощность основной гармоники тока нелинейного электроприемника.

3.2. Анализ алгоритмов формирования управляющего воздействия для силовой части активных фильтров

Система управления (СУ) активным фильтром (АФ) во многом определяет его эффективность работы. Управление АФ можно разделить на три основных этапа [60-67]. На первом этапе осуществляется считывание необходимых

значений токов и напряжений. На втором этапе на основании полученных значений формируется управляющее воздействие для системы управления силового полупроводникового преобразователя в составе АФ. На третьем этапе с учетом полученного управляющего сигнала методами широтно-импульсной модуляции, гистерезисного управления, модуляции пространственного вектора напряжения и др. формируются сигналы включения и отключения силовых ключей полупроводникового преобразователя.

Формирование управляющего воздействия для системы управления активного фильтра может осуществляться путем преобразования измеренных значений токов и напряжений либо во временной, либо в частотной области [62-67]. Классификация методов формирования управляющего воздействия представлена на рис. 3.2.

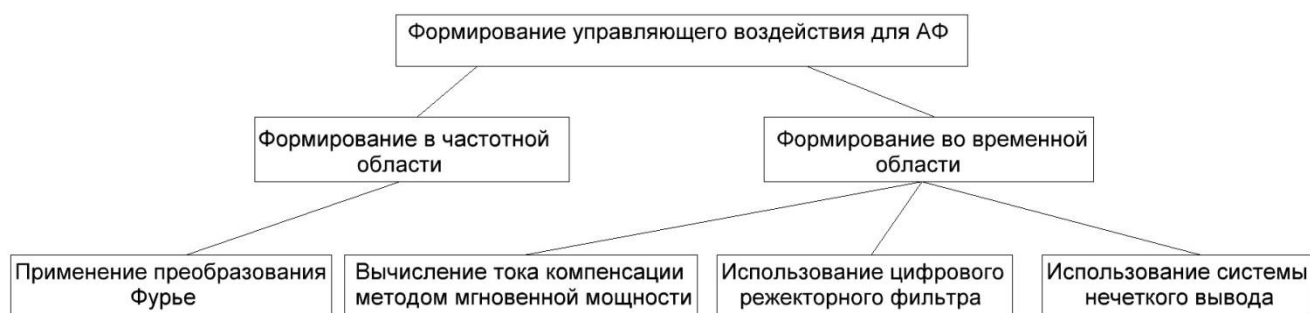


Рис. 3.2. Классификация методов формирования управляющего воздействия для системы управления инвертора

Стратегии управления в частотной области основаны на использовании в том или ином виде преобразования Фурье для несинусоидальных кривых токов и напряжений.

Применяя дискретное преобразование Фурье (ДПФ), отсчеты периодического входного сигнала (несинусоидального тока или напряжения) $x(n)$ можно представить в виде комплексного ряда [59]:

$$Z_k = \sum_{n=0}^{N-1} [x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + jx(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)] = a_k + jb_k. \quad (3.1)$$

где N – число отсчетов на период основной гармоники.

Амплитуды и начальные фазы гармоник определяются следующим образом:

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \psi_k = \arctg\left(\frac{b_k}{a_k}\right). \quad (3.2)$$

На основании рассчитанных амплитуд и начальных фаз гармоник формируется управляющее воздействие для силового преобразователя в составе АФ. При этом для вычисления N-точечного ДПФ требуется N^2 операций. Следовательно, при работе в частотной области необходимо проводить громоздкие вычислительные операции, и возникает проблема, связанная с низким быстродействием процесса формирования управляющего сигнала. Кроме того, опорная частота переключения силовых ключей должна по крайней мере в два раза превышать частоту компенсируемой гармоники наивысшего порядка.

Общий недостаток методов формирования управляющих сигналов в частотной области заключается в том, что требуется предварительная аналоговая фильтрация для того, чтобы исключить наложение спектров сигналов. Включение фильтра вносит дополнительные амплитудные и фазовые искажения. Кроме того, необходима синхронизация между частотой дискретизации и частотой основной гармоники. И, наконец, анализируемый сигнал должен быть стационарным, что на практике выполняется не всегда.

Стратегии управления АФ во временной области обеспечивают мгновенное генерирование управляющих сигналов тока и напряжения, параметры которых зависят от несинусоидальных токов и напряжений. К настоящему моменту имеет место большое разнообразие подходов к формированию управляющих сигналов АФ во временной области [59, 62, 66, 68].

Метод мгновенной мощности. В его основе лежит представление мгновенной активной мощности в трехфазной сети в виде суммы двух составляющих: средней и пульсирующей (\bar{p} и \tilde{p} , соответственно). То же самое справедливо для реактивной мощности с обозначением средней и пульсирующей составляющей как \bar{q} и \tilde{q} соответственно.

Для определения составляющих мгновенной мощности необходимо осуществить преобразование Кларка для трансформации напряжения и токов из трехфазной системы координат a, b, c в систему координат $\alpha\text{-}\beta$ на комплексной

плоскости. Прямое преобразование Кларка для напряжений и токов трехфазной трехпроводной сети имеет следующий вид [52]:

$$\begin{vmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{vmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} [M] \begin{vmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{vmatrix}; \quad (3.3)$$

$$\begin{vmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{vmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} [M] \begin{vmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{vmatrix}; \quad (3.4)$$

где $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ - токи и напряжения в системе координат α - β ; $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ – фазные токи и напряжения в трехфазной системе координат, $[M]$ - матрица преобразования.

$$[M] = \begin{vmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{vmatrix}. \quad (3.5)$$

Мгновенная реальная и мнимая мощности вычисляются следующим образом:

$$p = u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta; \quad q = u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta. \quad (3.6)$$

Из выражений 3.6 можно найти токи в координатах α - β , зависящие от напряжения и мощностей p и q :

$$\begin{vmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{vmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{vmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\alpha & -u_\beta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p \\ q \end{vmatrix}. \quad (3.7)$$

Представляя p и q в виде суммы средней и пульсирующей составляющей, можно получить выражения зависимостей токов i_α, i_β от этих составляющих. После этого построение системы компенсации осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом. С помощью фильтра низких частот выделяются средние и пульсирующие составляющие реальной и мнимой мощности. Далее выбираются нежелательные составляющие реальной и мнимой мощностей нагрузки p^* и q^* , которые должны быть скомпенсированы. По уравнениям (3.7) рассчитываются соответствующие токи i_α^*, i_β^* и по обратному преобразованию Кларка – токи

i_a^*, i_b^*, i_c^* . Затем из реальных токов нагрузки вычитаются вычисленные токи, полученные разности подаются на релейные регуляторы для сравнения с измеренными токами сети i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} .

Преимуществом данного метода является относительно высокое быстродействие системы управления АФ. Также можно отметить простоту используемого математического аппарата.

Основным недостатком метода мгновенной реактивной мощности является то, что он применим только для трехфазных цепей. Помимо этого, для его реализации требуется измерение токов нагрузки, питающей сети и фильтра во всех трех фазах. Это приводит к значительному увеличению капитальных затрат на установку АФ, в особенности при условии наличия нескольких нелинейных потребителей в узле нагрузки. Кроме того, выделение переменной составляющей с помощью фильтра верхних частот неизбежно вносит амплитудные и фазовые искажения в компенсирующий сигнал.

Использование цифрового режекторного фильтра. Для получения спектра компенсирующего сигнала, совпадающего со спектром тока искажения, можно использовать цифровой режекторный фильтр (ЦРФ), настроенный на частоту основной гармоники. ЦРФ является адаптивным устройством, что позволяет изменять характеристики АФ в режиме реального времени при изменении несинусоидального режима в сети.

Алгоритм формирования управляющих сигналов с применением ЦРФ включает в себя следующие операции.

1. Получение цифровых сигналов, пропорциональных несинусоидальному току нагрузки i_n и напряжению сети u_c .

2. Формирование компенсирующего сигнала на выходе адаптивного цифрового фильтра.

3. Формирование сигнала управления ключами инвертора методами широтно-импульсной модуляции, гистерезисного управления, модуляции пространственного вектора напряжения и др.

Классическим вариантом ЦРФ, который используется в блоке управления АФ, является фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр). Структура системы управления АФ на базе КИХ-фильтра представлена на рис. 3.3 [59].

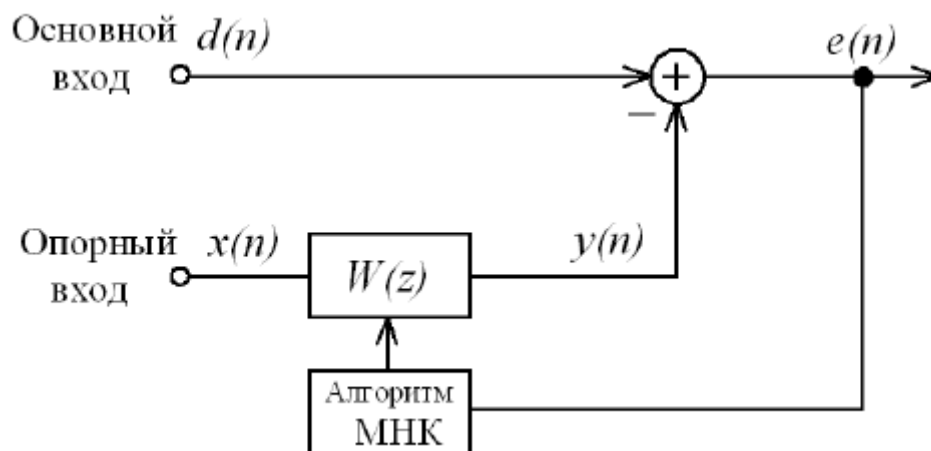


Рис. 3.3. Структурная схема ЦРФ на базе адаптивного фильтра с КИХ

$W(z)$ – передаточная функция адаптивного фильтра с КИХ.

На основной вход сумматора подаются отсчеты сигнала $d(n)$, которые пропорциональны току или напряжению сети. На опорный вход подается синусоида $x(n)$ с частотой, равной частоте основной гармоники. Далее происходит сравнение сигнала с основного входа и сигнала $y(n)$, полученного путем преобразования $x(n)$ с помощью КИХ-фильтра. На выходе фильтра формируются отсчеты компенсирующего сигнала $e(n)$.

Адаптивный фильтр на рис. 3.3 рассматривают как устройство предсказания для входной последовательности $x(n)$, а выходной сигнал $e(n)$ – как ошибку предсказания. Подстройка весовых коэффициентов цифрового фильтра осуществляется таким образом, чтобы минимизировать ошибку предсказания на выходе. Для этой цели используется алгоритм метода наименьших квадратов (МНК) Уидроу-Хоффа. Недостаток таких фильтров заключается в том, что для обеспечения требуемой селективности необходим фильтр высокого порядка. Другой недостаток – невысокая скорость сходимости.

В работе [68] для выделения тока искажения из несинусоидального сигнала предлагается использовать ЦРФ с бесконечной импульсной характеристикой

(БИХ-фильтр). Структура системы управления АФ на базе БИХ-фильтра представлена на рис. 3.4.

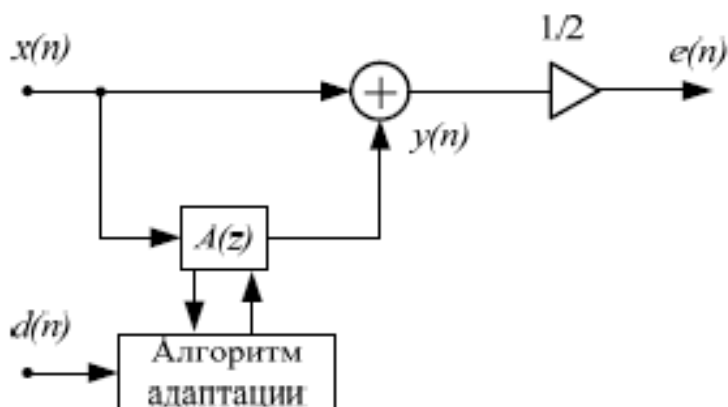


Рис. 3.4. Структурная схема ЦРФ на базе БИХ-фильтра

$A(z)$ – передаточная функция фазового БИХ-фильтра второго порядка, $d(n)$ – эталонный сигнал, используемый для настройки фильтра, $e(n)$ – компенсирующий сигнал

Модуль передаточной функции фазового фильтра $A(z)$ равен 1 на всем диапазоне частот. Значение фазочастотной характеристики на частоте основной гармоники должно быть равно $-\pi$. Настройка передаточной функции режекторного БИХ-фильтра осуществляется с использованием алгоритма адаптации дуального решетчатого фильтра с конечной импульсной характеристикой, что позволяет упростить процедуру настройки и избежать проблем, возникающих в процессе адаптации коэффициентов БИХ-фильтра (контроль устойчивости, наличие локальных минимумов целевой функции).

Использование системы нечеткого вывода. В последние годы наметилась тенденция к проектированию систем управления сложных динамических объектов и процессов в условиях неопределенности возмущающих воздействий [69-70]. Построение математических моделей таких объектов сопряжено со значительными сложностями. Главным образом они связаны со стремлением повысить адекватность модели посредством учета максимального количества факторов, влияющих на работу объекта и, как следствие, на процесс принятия решения системой управления. Зачастую получение исчерпывающей информации

об объекте просто невозможно или нецелесообразно с экономической точки зрения.

Активный фильтр высших гармоник тока и напряжения является примером объекта управления с неопределенными входными данными. В условиях использования его с целью обеспечения электромагнитной совместимости в узле нагрузки с ЭИН в качестве нелинейного потребителя эта неопределенность только усугубляется. На уровень высших гармонических составляющих тока и напряжения, генерируемых в сеть таким потребителем, оказывает влияние комплекс факторов: изменение мощности нагрева в процессе гибки одной трубы, параметров колебательного контура нагрузки и, как следствие, колебания частоты тока индуктора, углы управления выпрямителя и инвертора в составе преобразователя частоты, уровень гармоник в питающей сети. Очевидно, что без адекватного учета всех этих факторов говорить об обеспечении электромагнитной совместимости в данном узле нагрузки невозможно.

Как показывает практика, классические методы построения систем управления не приводят к удовлетворительным результатам в условиях неполноты или недостоверности исходных данных. В этой ситуации целесообразно обратиться к способам построения систем управления, изначально рассчитанным на неопределенность входящей информации. Одним из наиболее популярных решений является использование системы управления, имеющей в своем составе регулятор на базе нечеткой логики [71-75]. Такой регулятор способен на основе входной качественной информации об объекте, используя заранее заложенные в него правила нечеткой продукции, сгенерировать результаты вычислений на выходе в количественной форме. Это способствует тому, что даже сложные стратегии управления, используемые операторами и инженерами-технологами, полученные ими в результате экспериментов или своей профессиональной деятельности, могут быть интерпретированы понятным образом.

Теория нечетких множеств, основные идеи которой были предложены американским ученым Л. Заде, позволяет описывать качественные неточные

понятия и знания об окружающем мире и оперировать этими знаниями с целью получения новой информации.

Говоря о теории нечетких множеств, чаще всего имеют в виду системы нечеткого вывода, которые широко используются для управления техническими устройствами и процессами [69]. Таким образом, учитывая особенности нелинейных электроприемников трубогибочного стана, целесообразно построение системы управления активным фильтром на базе нечеткого вывода. С этой целью необходимо разработать фаззи-регулятор в составе системы управления активным фильтром.

Использование теории нечеткого вывода позволяет сократить количество датчиков, необходимых для корректной работы системы управления АФ: вместо измерения параметров для каждой из трех фаз достаточно сделать это только лишь для одной фазы. Используя нечеткие множества, становится возможным спроектировать систему управления с управляющим воздействием, отслеживающим ток искажения независимо от того, является ли он синусоидальным или содержит значительные всплески.

3.3. Разработка системы управления активного фильтра на базе системы нечеткого вывода

Основные задачи системы управления АФ - выделение из тока нелинейной нагрузки составляющей, характеризующей содержание гармоник в токе сети и управление АИН с целью генерирования тока фильтра, способствующего снижению уровня высших гармоник тока [60]. Для решения поставленных задач принимаем структуру системы управления АФ, представленную на рис. 3.5.

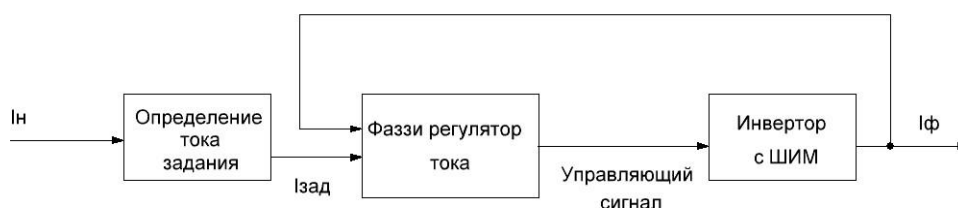


Рис. 3.5. Структура системы управления АПФ

I_n – ток нагрузки; $I_{зад}$ – ток задания; I_f – ток фильтра.

Ток задания представляет собой разность между током нагрузки и основной гармоникой тока нагрузки и определяется следующим образом:

$$i_{зад} = i_H - I(I)_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \Psi_I), \quad (3.8)$$

где I_I и Ψ_I – амплитуда и начальная фаза первой гармоники тока нагрузки соответственно, $\omega = 2\pi f_1$, где f_1 – частота тока в сети. Амплитуда и фаза первой гармоники вычисляется в результате разложения в ряд Фурье тока нагрузки. Как уже было отмечено выше, в системе управления АФ используются переменные, связанные с фазой А, что значительно снижает объем измерений и вычислительных операций. Нечеткая система управления активным фильтром, по существу, состоит из первой части, которая генерирует входные сигналы для формирования входных переменных фаззи-регулятора, нечеткого ядра, и третьей части, которая преобразует выходные сигналы в сигналы управления для инвертора.

Разработка и применение систем нечеткого вывода включает в себя ряд этапов, реализация которых выполняется с помощью основных положений нечеткой логики [70].

1. Фаззификация: разработка процедуры перехода от четких значений входных переменных к нечетким. Выбор вида и взаимного расположения функций принадлежности (ФП) входных лингвистических переменных.

2. Формирование структуры базы правил: разработка согласованного множества связей входы-выход регулятора.

3. Агрегирование: разработка процедуры определения степени истинности условий по каждому из правил.

4. Активизация: разработка процедуры определения степени истинности заключений по каждому из правил.

5. Аккумуляция: разработка процедуры объединения степеней истинности заключений по всей базе правил.

6. Дефаззификация: разработка процедуры перехода от нечеткого значения выходной переменной к четкому.

Лингвистическая переменная считается заданной, если для нее определено базовое терм-множество с соответствующими функциями принадлежности каждого термина.

Приняты три входных лингвистических переменных для фаззи-регулятора, образующих входной вектор $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]$, и одна выходная лингвистическая переменная β_4 , где β_1 – разность между током задания ЭИН и током АФ; β_2 – производная тока задания ЭИН; β_3 – ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д; выходная переменная β_4 – значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ [76, 77].

Для предполагаемой системы нечеткого вывода целесообразно использовать функции принадлежности (ФП) нечетких лингвистических переменных в виде трапеций или треугольников. Этот выбор обусловлен простотой расчета таких функций принадлежности и высокой эффективностью программной реализации [78]. Трапециевидные ФП используются для характеристики лингвистических переменных на границах диапазона ее изменения. В остальных случаях используются треугольные ФП. Каждая трапециевидная ФП задается вектором из четырех значений, которые соответствуют абсциссам вершин трапеции. Например, ФП $F_2 = [f_1, f_2, f_3, f_4]$. По аналогии треугольная ФП $F_1 = [f_5, f_6, f_7]$. Пример реализации треугольной и трапециевидной ФП представлен на рис. 3.6.

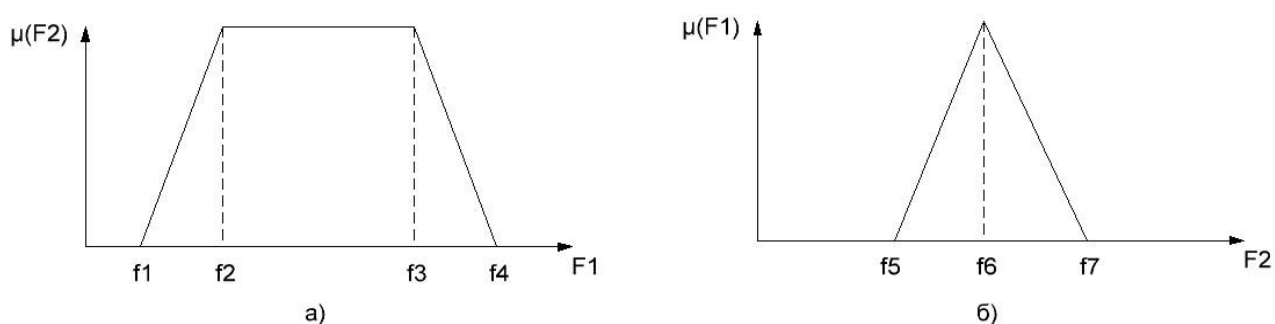


Рис. 3.6. Трапециевидная (а) и треугольная (б) функции принадлежности.

Для построения функций принадлежности входных переменных проведен расчет тока задания ЭИН и его производной на основании результатов измерений энергетических показателей процесса гибки трубы №2 (см. таблицу 1.2). Результаты измерений получены на основании анализа осциллограммы,

представленной на рис. 2.4. Производная тока задания определяется следующим образом:

$$\frac{di_{\text{зад}}}{dt} = \frac{i_{\text{тек}} - i_{\text{пред}}}{\Delta t}, \quad (3.9)$$

где $i_{\text{тек}}$ – значение тока задания в текущий момент времени, $i_{\text{пред}}$ – значение тока задания в предыдущий момент времени, $\Delta t = 0,002$ с – период измерения мгновенных значений тока. Мгновенные значения основной гармоники тока определяются в соответствии со следующим выражением:

$$i(I)_A = I_m(I)_A \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3.10)$$

где $I_m(I)_A$ – амплитудное значение тока первой гармоники в фазе А.

Результаты расчетов для десяти значений мгновенного тока, потребляемого ЭИН, представлены в таблице 3.1. Остальные расчеты для полного периода тока при частоте f_I представлены в приложении 4.

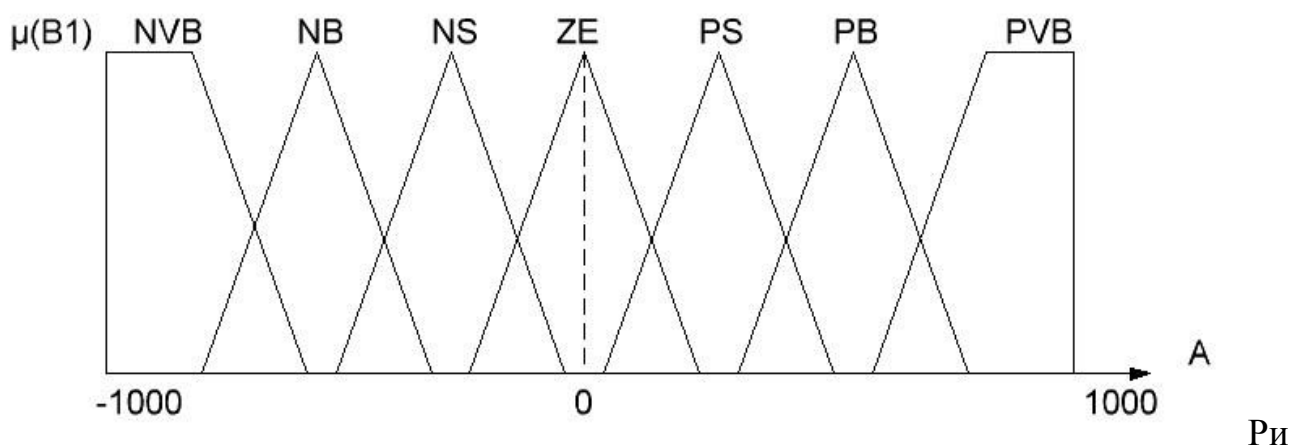
Таблица 3.1. Результаты расчетов производной тока задания

№ п/п	Мгновенное значение тока, потребляемого ЭИН $i_{\text{ЭИН}}, \text{ А}$	Мгновенные значения основной гармоники тока, потребляемого ЭИН $i(I), \text{ А}$	Ток задания ЭИН $i_{\text{зад}}, \text{ А}$	Производная тока задания $\frac{di_{\text{зад}}}{dt}, \text{ А/с}$
1	102	64	38	_____
2	825	128	697	3295000
3	957	191	766	345000
4	918	253	665	-505000
5	1014	314	700	175000
6	1014	374	640	-300000
7	1065	433	632	-40000
8	1011	490	521	-555000
9	1062	545	517	-20000
10	1074	598	476	-205000

Как следует из результатов вычислений, диапазон изменения амплитуд тока задания составляет от -1000 до 1000 А. Принимаем диапазон изменения первой лингвистической переменной $\Delta\beta_I = [-1000; 1000]$. Для описания переменной β_I вводятся 7 ФП, равномерно распределенных по всему диапазону изменения:

- NVB (Negative Very Big) – «отрицательное очень большое» [-1000, -750];
- NB (Negative Big) – «отрицательное большое» [-900, -675, -450];
- NS (Negative Small) – «отрицательное малое» [-600, -350, -100];
- Z (Zero) – «нулевое» [-250, 0, 250];
- PS (Positive Small) – «положительное малое» [100, 350, 600];
- PB (Positive Big) – «положительное большое» [450, 675, 900,];
- PVB (Positive Very Big) – «положительное очень большое» [750, 1000].

На рис. 3.7 представлены функции принадлежности для лингвистической переменной β_1 «Разность между током задания ЭИН и током АФ».



с. 3.7. Функции принадлежности для лингвистической переменной β_1 «Разность между током задания ЭИН и током АФ»

Область значений лингвистической переменной β_2 «Производная тока задания ЭИН» разобьем на пять диапазонов, присвоив каждому из них качественную характеристику (терму):

- NB (Negative Big) – «отрицательная большая» $[-4 \cdot 10^6; -2 \cdot 10^6]$;
- NS (Negative Small) – «отрицательная малая» $[-3,2 \cdot 10^6; -1,8 \cdot 10^6; -0,4 \cdot 10^6]$;
- Z (Zero) – «нулевая» $[-2 \cdot 10^6; 0; 2 \cdot 10^6]$;
- PS (Positive Small) – «положительная малая» $[0,4 \cdot 10^6; 1,8 \cdot 10^6; 3,2 \cdot 10^6]$;
- PB (Positive Big) – «положительная большая» $[2 \cdot 10^6; 4 \cdot 10^6]$.

Для получения формы нечетких терм, характеризующих лингвистическую переменную β_2 «Производная тока задания ЭИН», по расчетным данным из

таблицы 3.1 формируется таблица 3.2, содержащая статистические величины [79].

Все значения, принимаемые производной тока задания ЭИН $\frac{di_{зад}}{dt}$, разбиты на 7 интервалов – такое количество интервалов выбрано исходя из попадания в каждый интервал хотя бы одной расчетной точки. В каждой из пяти строк, соответствующих каждому из диапазонов, содержится количество попаданий расчетных значений в один из интервалов, вместе они образуют матрицу (v_{ij}) , $i=1\div 5$, $j=1\div 7$.

В последней строке таблицы 3.2 приведены элементы, равные $v_{\Sigma j} = \sum_{i=1}^4 v_{ij}$. В этой строке выбирается максимальный элемент $v_{\Sigma max} = \max v_{\Sigma j}$. В нашем примере $v_{\Sigma max} = 37$.

Таблица 3.2. Статистические данные расчета производной тока искажения $\frac{dI_{зад}}{dt}$

Лингвистический терм	Количество значений $\frac{di_{зад}}{dt}$, попадающих в соответствующий интервал						
	$(-4*10^6; -10^6)$	$(-10^6; -0,6*10^6)$	$(-0,6*10^6; -0,2*10^6)$	$(-0,2*10^6; 0,2*10^6)$	$(0,2*10^6; 0,6*10^6)$	$(0,6*10^6; 10^6)$	$(10^6; 4*10^6)$
NB	2	0	0	0	0	0	0
NS	3	2	8	0	0	0	0
ZE	1	5	24	37	24	4	3
PS	0	0	0	0	11	4	2
PB	0	0	0	0	0	0	2
v_{Σ}	6	7	32	37	35	8	7

Далее все элементы v_{ij} таблицы (кроме последней строки) преобразуются по формуле [79]:

$$v_{ij} = \frac{v_{ij} \cdot v_{\Sigma max}}{v_{\Sigma j}}. \quad (3.11)$$

Для построения функций принадлежности лингвистической переменной находятся максимальные элементы в строке преобразованной таблицы 3.3

$$v_{i max} = \max v_{ij}.$$

Таблица 3.3. Преобразованные статистические данные расчета производной

тока искажения $\frac{di_{зад}}{dt}$

Лингвистический терм	Преобразованные значения v_{ij}							v_{imax}
	$(-4 \cdot 10^6; -10^6)$	$(-10^6; -0,6 \cdot 10^6)$	$(-0,6 \cdot 10^6; -0,2 \cdot 10^6)$	$(-0,2 \cdot 10^6; 0,2 \cdot 10^6)$	$(0,2 \cdot 10^6; 0,6 \cdot 10^6)$	$(0,6 \cdot 10^6; 10^6)$	$(10^6; 4 \cdot 10^6)$	
NB	12,3	0	0	0	0	0	0	12,3
NS	18,5	10,6	9,25	0	0	0	0	18,5
ZE	6,17	26,4	27,75	37	25,4	18,5	15,9	37
PS	0	0	0	0	11,6	18,5	10,6	18,5
PB	0	0	0	0	0	0	10,6	10,6

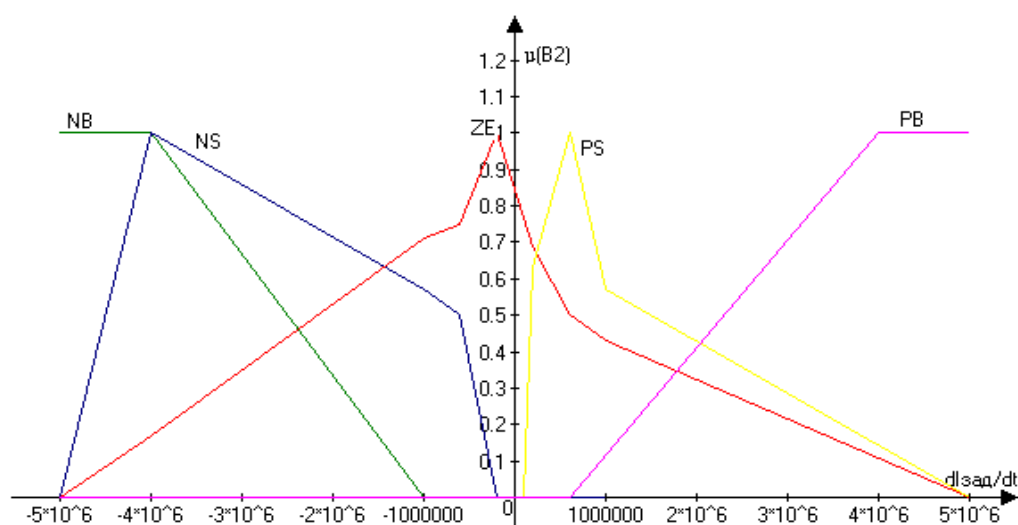
Значения функций принадлежности вычисляются по формуле [79]:

$$\mu_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_{imax}}. \quad (3.12)$$

В результате построена таблица 3.4 значений ФП лингвистической переменной β_2 и график ФП представлен на рис. 3.8.

Таблица 3.4. Таблица расчетных значений ФП лингвистической переменной β_2

Лингвистический терм	Значения ФП μ_{ij}						
	$(-4 \cdot 10^6; -10^6)$	$(-10^6; -0,6 \cdot 10^6)$	$(-0,6 \cdot 10^6; -0,2 \cdot 10^6)$	$(-0,2 \cdot 10^6; 0,2 \cdot 10^6)$	$(0,2 \cdot 10^6; 0,6 \cdot 10^6)$	$(0,6 \cdot 10^6; 10^6)$	$(10^6; 4 \cdot 10^6)$
NB	1	0	0	0	0	0	0
NS	1	0,57	0,5	0	0	0	0
ZE	0,17	0,71	0,75	1	0,69	0,5	0,43
PS	0	0	0	0	0,63	1	0,57
PB	0	0	0	0	0	0	1

Рис. 3.8. ФП лингвистической переменной β_2 .

При построении графика каждая величина μ_{ij} откладывалась для начального

значения j -го интервала, затем отмеченные точки были соединены прямыми линиями и приняли вид многоугольных функций принадлежности.

На рис. 3.9 представлены функции принадлежности для лингвистической переменной β_2 «Производная тока задания ЭИН», интерполированные относительно графика на рис. 3.8.

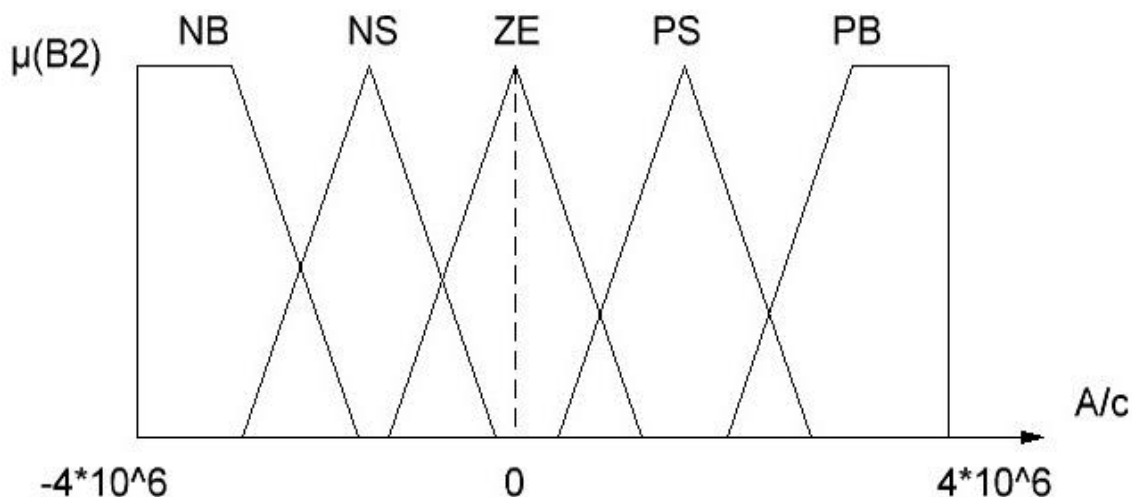


Рис. 3.9. ФП для лингвистической переменной β_2 «Производная тока задания ЭИН»

Для характеристики переменной β_3 «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д» диапазон изменения потребляемого двигателем постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ с НВ) составляет от -200 до 200 А.

С учетом этого принимаем область значения лингвистической переменной β_3 «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д» $D(\beta_3) = [-200; 200]$ А. Для описания лингвистической переменной β_3 вводится 3 ФП, распределенных по всему диапазону значений переменной:

- NB (Negative Big) – «отрицательное большое» [-200, 75];
- Z (Zero) – «нулевое» [-150, 0, 150];
- PB (Positive Big) - «положительное большое» [75, 200].

На рис. 3.10 представлены функции принадлежности для лингвистической переменной β_3 «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д».

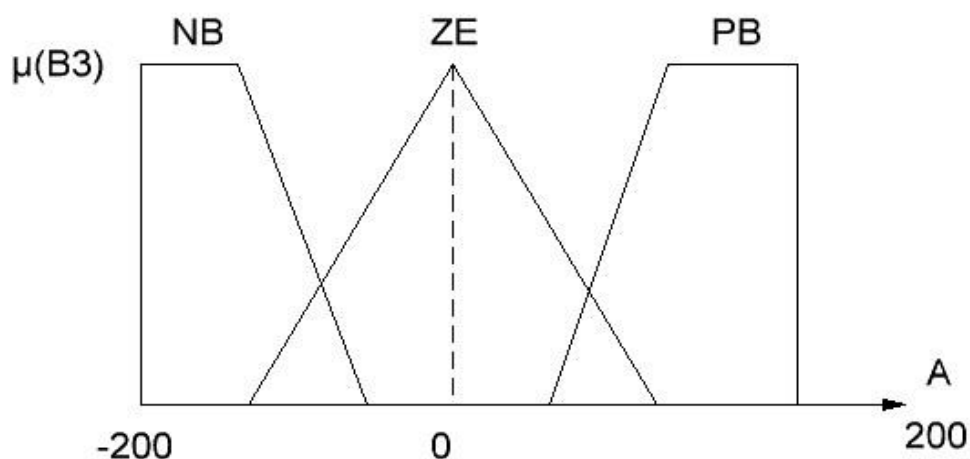


Рис. 3.10. ФП для лингвистической переменной β_3 «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д»

Исходя из условий формирования управляющих сигналов на открытие/закрытие вентилей АИН с ШИМ диапазон значений переменной β_4 «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ» $\Delta\beta_4 = [0; 1]$. Для описания переменной β_4 вводятся 7 ФП, равномерно распределенных по всему диапазону изменения:

- VH (Very High) – «очень высокое» $[0,833; 0,95; 1; 1]$;
- H (High) – «высокое» $[0,667; 0,833; 1]$;
- EH (Enough High) – «достаточно высокое» $[0,5; 0,667; 0,833]$;
- M (Medium) – «среднее» $[0,333; 0,5; 0,667]$;
- EL (Enough Low) – «достаточно низкое» $[0,167; 0,333; 0,5]$;
- L (Low) – «низкое» $[0; 0,167; 0,333]$;
- VL (Very Low) – «очень низкое» $[0,833; 0,95; 1; 1]$.

На рис. 3.11 представлены ФП для лингвистической переменной β_4 «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ».

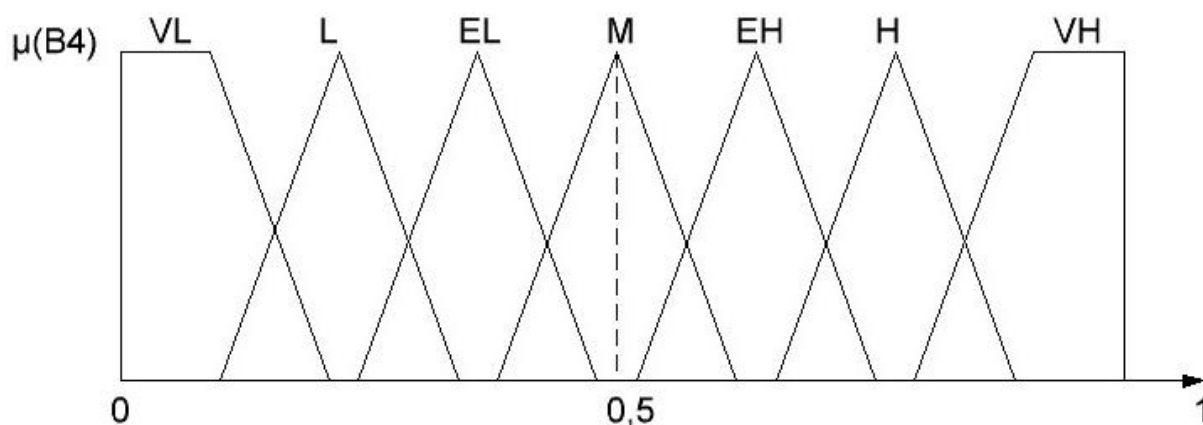


Рис. 3.11. ФП для лингвистической переменной β_4 «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ»

Существуют различные способы построения нечетких правил для создания фаззи-регулятора. Наиболее быстрый и легкий способ основан на изучении опыта эксплуатации системы управления и моделирования действий оператора для достижения поставленных целей, т.е. не требуется проводить аналитические вычисления для выработки управляющего воздействия.

Ниже представим результаты исследования оптимального управления током активного фильтра [60]:

1. Состояние системы определяет разность между током задания и током фильтра (его величину и знак): если оно велико (мало), это означает, что ток фильтра сильно отличается (совпадает) от тока искажения; если оно положительно (или отрицательно), это означает, что ток фильтра меньше (или больше) тока искажения.
2. Основная задача управления током фильтра – максимальное совпадение тока фильтра и тока искажения по амплитуде. При этом сдвиг по фазе между ними должен составлять 180° . Управляющее воздействие должно обеспечивать уменьшение рассогласования по току посредством приложения положительного (или отрицательного) напряжения, вызывающего повышение (или понижение) тока фильтра по сравнению с током искажения. В то же время управляющее воздействие должно быть

ограничено с целью недопущения рассогласования с противоположным знаком.

3. Кривая тока фильтра должна совпадать с инвертированной кривой тока задания, которая характеризуется значительными изменениями своего угла наклона, следовательно, режим работы фильтра определяется также производной тока задания.
4. Управляющее воздействие выражается в выборе управляющих сигналов для каждого из шести ключей инвертора.

Лингвистическая переменная β_3 оказывает влияние на формирование выходного сигнала регулятора только в том случае, когда ток искажения ЭИН принимает небольшие значения. Это связано с тем, что область значений переменной β_3 в пять раз меньше области значений переменной β_1 , и использовать ее в каждом правиле нецелесообразно.

Для системы управления АФ составлены 45 правил нечеткой продукции на основе статистических данных, полученных в результате измерений и опыта эксплуатации установки индукционного нагрева. Все правила используются с весовым коэффициентом $k_6 = 1$ и приведены в таблице 3.6.

В качестве примера приведем пять характерных правил нечеткого вывода:

- 1) ЕСЛИ $\beta_1 = NVB$ И $\beta_2 = ZE$ И $\beta_3 = NB$ ТО $\beta_4 = VL$;
- 2) ЕСЛИ $\beta_1 = NB$ И $\beta_2 = PB$ ТО $\beta_4 = EL$;
- 3) ЕСЛИ $\beta_1 = ZE$ И $\beta_2 = ZE$ ТО $\beta_4 = M$;
- 4) ЕСЛИ $\beta_1 = PVB$ И $\beta_2 = NS$ И $\beta_3 = PB$ ТО $\beta_4 = H$;
- 5) ЕСЛИ $\beta_1 = PS$ И $\beta_2 = PS$ ТО $\beta_4 = H$.

Первое правило может быть интерпретировано на естественном языке следующим образом: если «Производная тока задания ЭИН» β_1 – «очень большая отрицательная» (NVB – *Negative Very Big*) И «Разность между током задания ЭИН и током АФ» β_2 – «ноль» (ZE – *Zero*) И «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д» β_3 – «отрицательный большой» (NB – *Negative Big*), то «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ» β_4 – «очень низкое» (VL – *Very Low*).

Таблица 3.6. Правила системы нечеткого вывода

Номер правила	Входные переменные			Выходная переменная
	β_1	β_2	β_3	β_4
1	2	3	4	5
1	NVB	PB	-	H
2	NVB	PS	-	EL
3	NVB	ZE	-	L
4	NVB	NS	-	VL
5	NVB	NB	-	VL
6	NB	PB	-	EL
7	NB	PS	-	EL
8	NB	ZE	-	L
9	NB	NS	-	VL
10	NB	NB	-	VL
11	NS	PB	-	EL
12	NS	PS	-	EL
13	NS	ZE	-	EL
14	NS	NS	-	EL
15	NS	NB	-	L
16	ZE	PB	-	VH
17	ZE	PS	-	H
18	ZE	ZE	-	M
19	ZE	NS	-	L
20	ZE	NB	-	VL
21	PS	PB	-	H
22	PS	PS	-	H
23	PS	ZE	-	EH
24	PS	NS	-	EH
25	PS	NB	-	EH
26	PB	PB	-	VH
27	PB	PS	-	VH
28	PB	ZE	-	H
29	PB	NS	-	EH
30	PB	NB	-	EH
31	PVB	PB	-	VH
32	PVB	PS	-	VH
33	PVB	ZE	-	H
34	PVB	NS	-	EH
35	PVB	NB	ZE	EH
36	PVB	NB	NB	M
37	PVB	NB	PB	H
38	NVB	PB	ZE	EL

Продолжение таблицы 3.6.

1	2	3	4	5
39	NVB	PB	NB	L
40	NVB	PB	PB	M
41	NVB	ZE	NB	VL
42	ZE	NS	NB	VL
43	ZE	PS	PB	VH
44	PVB	NS	PB	H
45	NVB	PS	NB	L

Формирование поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели β_4 «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ» проведем в системе *Matlab*.

3.4. Реализация системы нечеткого вывода в среде *Matlab* для формирования управляющего сигнала активного фильтра

Формирование поверхности нечеткого вывода для разработанной модели на базе правил системы управления АФ применен алгоритм Мамдани [70]. Такой выбор является целесообразным с точки зрения простоты настройки регулятора и качества реализации алгоритмов управления.

Последовательность алгоритма сводится к выполнению основных этапов нечеткого вывода. Этапы процесса нечеткого вывода описываются следующим образом. В процессе фаззификации для каждого из подусловий базы нечетких правил « $G_j = a_{ji}$ » находятся степени истинности соответствующих высказываний по формулам [80]:

$$b_{ij} = \mu_{a_{ij}}(G_j), \quad (3.13)$$

где $i = 1 \div n$, $n = 45$ – количество правил системы нечеткого вывода, $j = 1 \div k$, $k = 3$ – количество входных лингвистических переменных, $\mu_{a_{ij}}(\beta_k)$ – ФП терма входной нечеткой лингвистической переменной β_k .

Определение степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода осуществляется с применением процедуры агрегирования. В

предлагаемой базе правил каждое условие состоит из нескольких подусловий, связанных операций нечеткой конъюнкции или связки «И». Исходя из этого, степень истинности всего условия i -го правила рассчитывается по формуле [78]:

$$b_i = \max(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}), \quad (3.14)$$

где m - количество подусловий для i -го правила.

Целью процедуры активизации является нахождение степени истинности и значения ФП заключения правил системы нечеткого вывода. При условии что весовые коэффициенты правил системы нечеткого вывода приняты равными 1, степень истинности c_i заключения равна соответствующей степени истинности i -го условия, где i – номер правила. Определение значения ФП заключения i -го правила системы нечеткого вывода для выходной лингвистической переменной β_4 , осуществляется методом min-активации [80]:

$$\mu_{di} = \min(c_i, \mu_{di}). \quad (3.15)$$

Для нахождения ФП для выходной лингвистической переменной β_4 применяется процедура аккумуляции, состоящая в объединении всех степеней истинности заключений правил системы нечеткого вывода. Аккумуляция осуществляется в соответствии с выражением [80]:

$$\mu(\beta_4) = \max(\mu_{di}(\beta_4), \mu_{du}(\beta_4)), \quad (3.16)$$

где $u = 1 \div n$ и $u \neq i$.

Дефаззификация выходной переменной β_4 осуществляется с помощью метода центра площади из уравнения [80]:

$$\int_{Min}^u \mu(\beta_4) d\beta_4 = \int_u^{Max} \mu(\beta_4) d\beta_4, \quad (3.17)$$

где Min и Max – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества лингвистической переменной β_4 , u – результат дефаззификации.

Для реализации системы нечеткого вывода в среде *Matlab* имеется специальный пакет *Fuzzy Logic Toolbox*. В его состав входят следующие графические средства редактирования элементов систем нечеткого вывода:

1. Редактор систем нечеткого вывода *FIS*.

2. Редактор ФП систем нечеткого вывода (*Membership Function Editor*).
3. Редактор правил системы нечеткого вывода (*Rule Editor*).
4. Программа просмотра правил системы нечеткого вывода (*Rule Viewer*).
5. Программа просмотра поверхности системы нечеткого вывода (*Surface Viewer*).

Редактор *FIS* является основным средством создания и редактирования систем нечеткого вывода в графическом режиме. Графический интерфейс редактора *FIS* представлен на рис. 3.12.

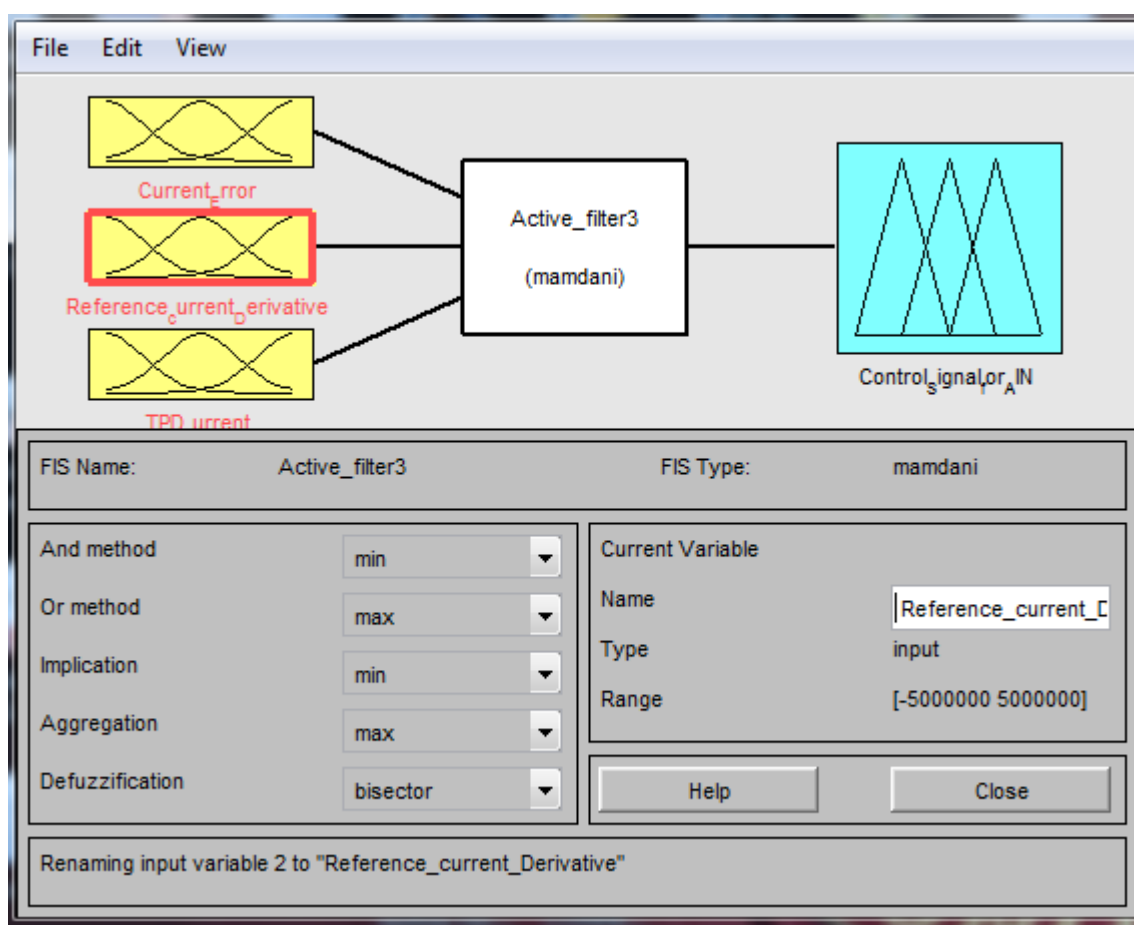


Рис. 3.12. Графический интерфейс редактора *FIS*.

Для построения СУ АФ определим три входные переменные для фаззи-регулятора:

- *Reference current derivative*, соответствующая лингвистической переменной β_1 «Производная тока задания ЭИН»;

- *Current error*, соответствующая лингвистической переменной β_2 «Разность между током задания ЭИН и током АФ»;
- *TPD current*, соответствующая лингвистической переменной β_3 «Ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д».

Зададим одну выходную переменную *Control signal for AIN*, соответствующую лингвистической переменной β_4 «Значение управляющего сигнала в системе управления АИН с ШИМ».

В нижней части окна редактора FIS необходимо выбрать алгоритмы выполнения нечеткого логического умножения и сложения. Определим алгоритм *min* для нечеткого логического умножения и алгоритм *max* для нечеткого логического сложения.

Далее с помощью редактора *Matlab* следует определить ФП термов для каждой из переменных системы нечеткого вывода. Графический интерфейс редактора ФП для входных и выходных переменных представлен на рис. 3.13 – 3.16.

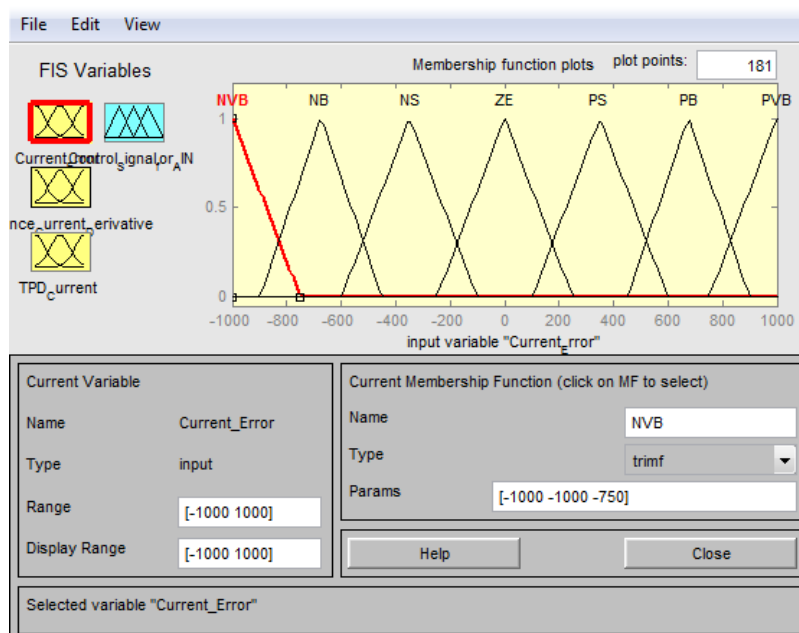


Рис. 3.13. Графический интерфейс редактора ФП для входной переменной *Current error*

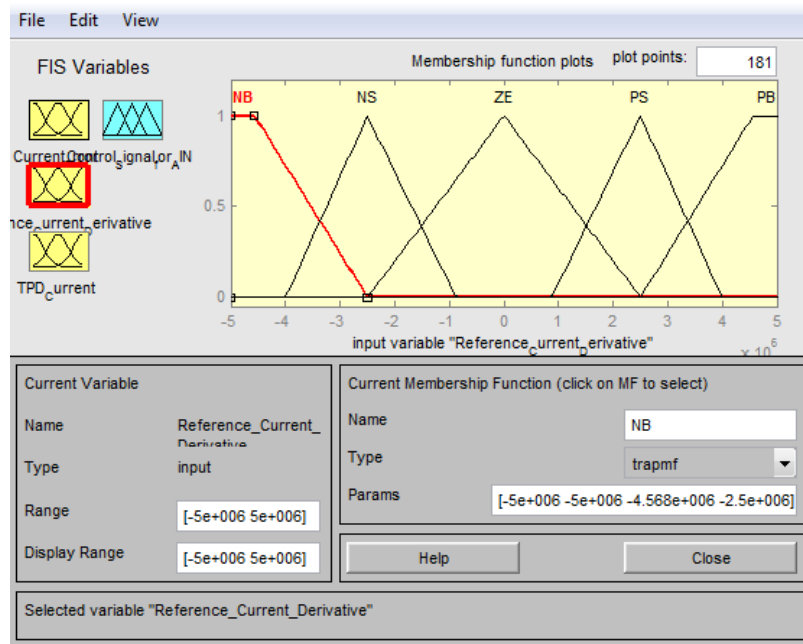


Рис. 3.14. Графический интерфейс редактора ФП для входной переменной *Reference Current Derivative*

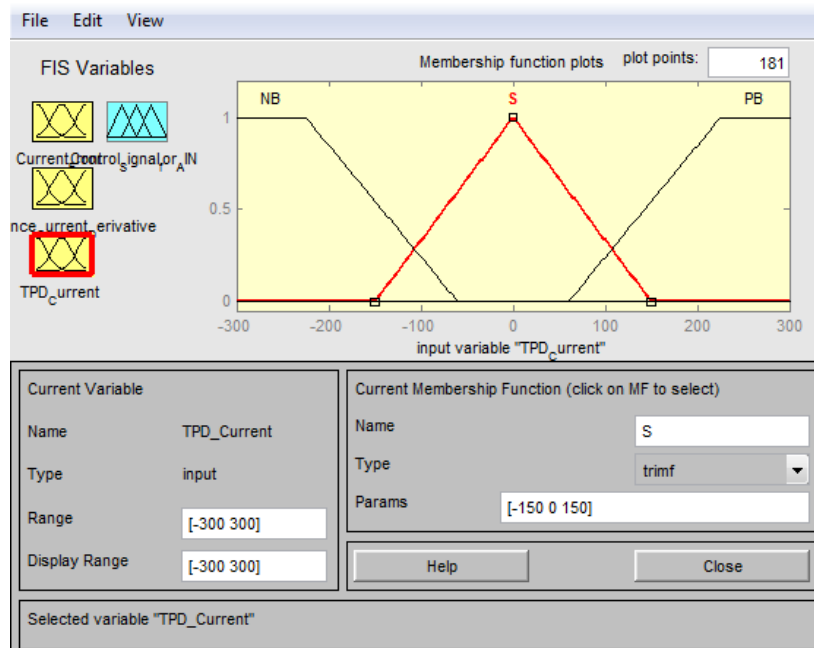


Рис. 3.15. Графический интерфейс редактора ФП для входной переменной *TPD Current*

В нижней части окна редактора необходимо указать имя нечеткой переменной, ее тип (входная или выходная) и диапазон изменения. Те же параметры необходимо указать для каждой из лингвистических термов. Как было сказано выше, в рассматриваемой системе нечеткого вывода используются

функции принадлежности лингвистических термов треугольного и трапециевидного типа.

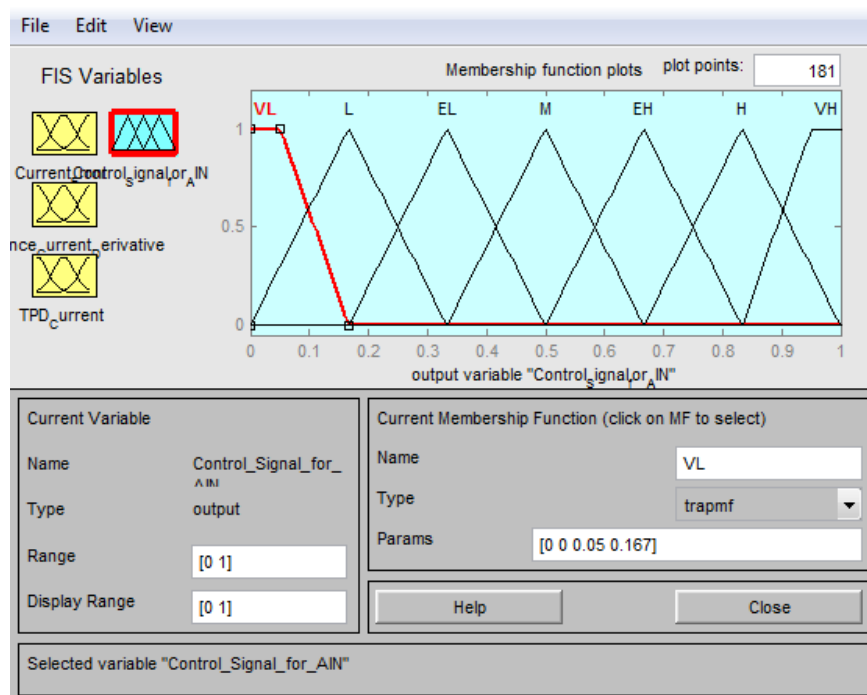


Рис. 3.16. Графический интерфейс редактора ФП для выходной переменной *Control signal for AIN*

Для задания 45 правил разрабатываемой системы нечеткого вывода воспользуемся редактором правил системы *Matlab*. Весовой коэффициент для каждого правила равен единице. Связь подусловий в правилах нечеткой продукции осуществляется с помощью операции логического умножения.

С целью оценки работы построенной системы нечеткого вывода для автоматического управления АПФ необходимо открыть программу просмотра правил системы *Matlab* и ввести значения входных переменных.

Результат расчета сигнала управления на основании нечеткого вывода проиллюстрирован на примере: производная тока искажения $\beta_1 = -1,44 \cdot 10^6$ – это свидетельствует о том, что ток задания носит быстро возрастающий характер; $\beta_2 = -199$ – ток АПФ больше чем ток задания; $\beta_3 = 33,8$ – значения тока задания системы электропривода ТП-Д. В результате процесса нечеткого вывода получили, что $\beta_4 = 0,38$ – сигнал управления, подающий импульсы на силовые ключи АПФ. Графический интерфейс программы просмотра правил после выполнения процедуры нечеткого вывода представлен на рис. 3.17.

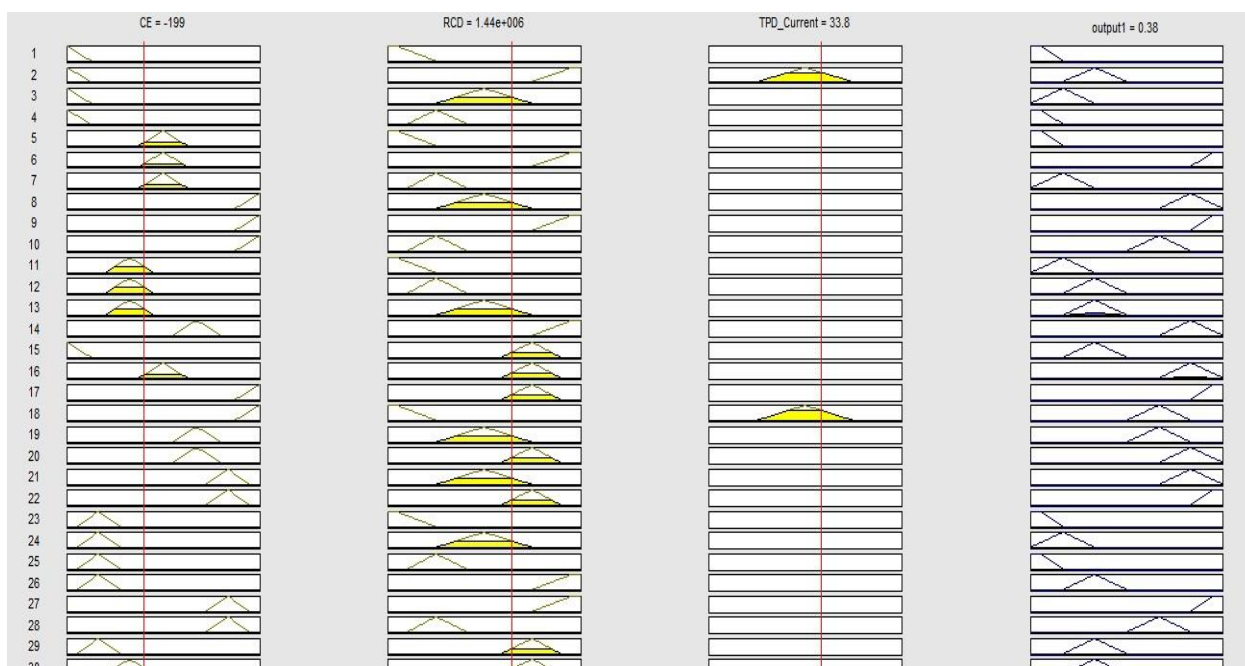


Рис. 3.17. Графический интерфейс программы просмотра правил после выполнения процедуры нечеткого вывода

Для общего анализа разработанной нечеткой модели СУ АФ полезна визуализация соответствующей поверхности нечеткого вывода (рис. 3.18).

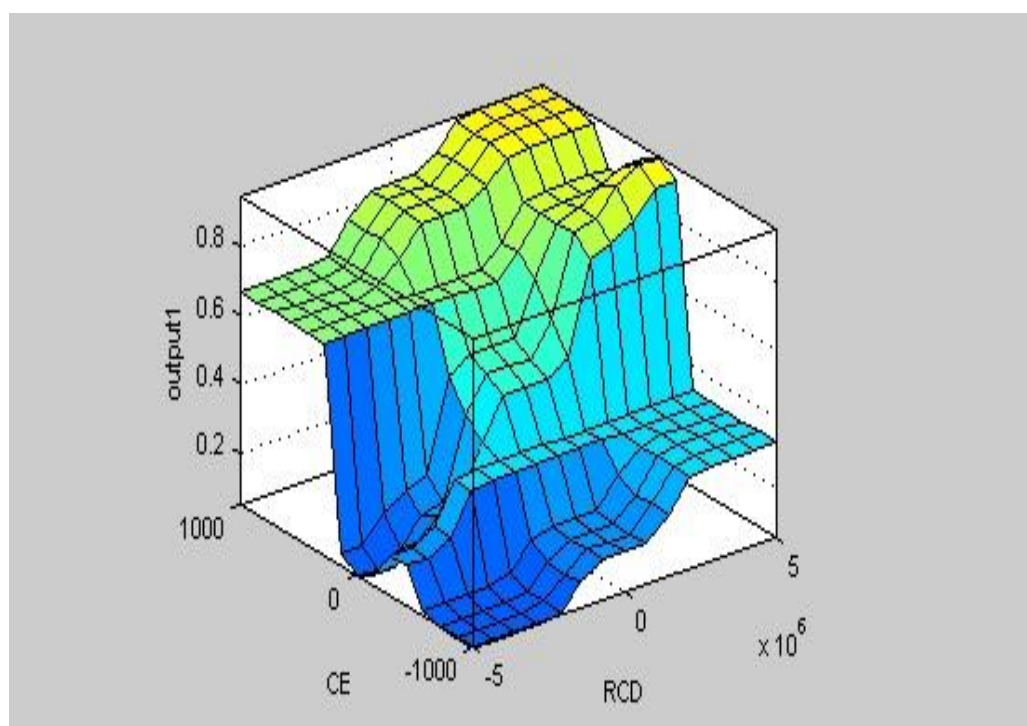


Рис. 3.18. Поверхность нечеткого вывода

Данная поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значения выходной переменной β_4 от значений входных переменных β_1 и β_2 нечеткой модели СУ АФ. Эта зависимость может послужить основой для

программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма управления в форме таблицы решений. Таким образом, задачу получения управляющего сигнала для АФ можно решить, используя систему нечеткого вывода.

Выводы:

1. Использование мощных преобразователей частоты в установках индукционного нагрева обуславливает генерирование высших гармоник тока в систему электроснабжения соизмеримых с основной гармоникой. При этом ток искажения может достигать сотни ампер. Для компенсации их негативного воздействия целесообразно использовать гибридные фильтры в сочетании пассивный резонансный фильтр пятой гармоники и активный фильтр.

2. Анализ факторов, влияющих на процесс генерирования высших гармоник тока нелинейными электроприемниками ЭИН, и систем управления АФ показывает целесообразность применения методов нечеткого вывода для построения нечеткого регулятора в системе управления АФ. При этом сокращается число датчиков без снижения информативности системы управления.

3. Приняты три входных лингвистических переменных для фаззи-регулятора, образующих входной вектор $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]$, и одна выходная лингвистическая переменная β_4 . Выполнено обоснование вида ФП для входных и выходных лингвистических переменных. В рассматриваемой системе нечеткого вывода приняты к использованию треугольные и трапециевидные ФП. Приведено описание алгоритма принятия решений в процессе управления АФ. Разработана база правил, имеющая в своем составе 45 правил нечеткой продукции.

4. Представлена реализация разработанной системы нечеткого вывода в пакете Fuzzy Logic Toolbox среды Matlab. Для оценки работоспособности предлагаемой системы нечеткого вывода проведен анализ графического интерфейса программы просмотра правил и поверхности нечеткого вывода для построения фаззи-регулятора в системе управления АФ.

4. Оценка эффективности использования гибридного параллельного фильтра в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева

4.1. Выбор элементов и обоснование структуры гибридного параллельного фильтра

Для обеспечения ЭМС в системе электроснабжения с ЭИН в первую очередь необходимо воспользоваться пассивными ФКУ. Их синтез осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в [59]. Анализ спектрального состава потребляемого тока и напряжения в узле нагрузки с ЭИН позволяет сделать вывод о том, что доминирующее положение занимает 5-я гармоника. Для ее подавления необходимо синтезировать резонансный L-C фильтр. Данный фильтр представляет собой последовательную цепочку, состоящую из емкостного и индуктивного элементов, которая подключается параллельно питающей сети.

Расчет выполняется для одной фазы. В первую очередь необходимо определить функцию входного сопротивления фильтра [59]:

$$Z(s) = K \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)}{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_j^2)}, \quad (4.1)$$

где K – постоянный множитель ω_i и ω_j – частоты нулей и полюсов, соответственно. Под нулем функции $Z(s)$ понимают значение частоты, при котором функция принимает нулевое значение. Под полюсом функции $Z(s)$ понимают значение частоты, при котором функция принимает значение ∞ . Поскольку задача пассивного фильтра – подавление 5-й гармоники, то принимаем значение нуля $\omega_i = 5$, а значение полюсов $\omega_j = 0$, $\omega_j = 6$. Таким образом, функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте основной гармоники, может быть представлена в следующем виде [59]:

$$Z(s) = \frac{(s^2 + 25)}{s \cdot (s^2 + 36)}.$$

Коэффициент K определяется как [59]:

$$K = \frac{U_{\phi}^2}{Q \cdot Z(j1)}, \quad (4.2)$$

где U_{ϕ} – действующее значение фазного напряжения сети, Q – дефицит реактивной мощности фильтра на одну фазу в размере 408 квар (это максимальное зарегистрированное значение реактивной мощности, потребляемое ЭИН), $Z(j1)$ – значение входного сопротивления фильтра при $s = j1$. Функция входной проводимости фильтра [59]:

$$Y(s) = \frac{I \prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_j^2)}{K \prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_i^2)} = \frac{s \cdot (s^2 + 36)}{543 \cdot (s^2 + 25)}. \quad (4.3)$$

Вычет функции входной проводимости определяется как [59]:

$$v = (s^2 + \omega_i^2) \frac{Y(s)}{s} \Big|_{s^2 = \omega_i^2}. \quad (4.4)$$

Нормированные значения параметров элементов пассивного фильтра находятся по формулам [59]:

$$L = \frac{I}{v}; \quad C = \frac{v}{\omega_i^2}.$$

В результате расчетов получено, что коэффициент $K = 543$, значение вычета входной проводимости $v = 0,016$; нормированное значение индуктивности фильтра $L_{\phi} = 62,5$ Гн, нормированное значение емкости фильтра $C_{\phi} = 640$ мкФ.

Денормированные значения параметров определяются как [59]:

$$L' = L / 314; \quad C' = C / 314.$$

В результате расчетов получено денормированное значение индуктивности фильтра $L_{\phi} = 0,2$ Гн, денормированное значение емкости фильтра $C_{\phi} = 2$ мкФ.

На основе представленного расчета принимается к установке пассивный фильтр Danfoss AHF-DA-171-400-50-20-A [81], обеспечивающий компенсацию тока искажения $I_n = 144$ А и снижение коэффициента 5-ой гармонической составляющей по току до 5 %. Внешний вид пассивного фильтра и схема подключения к питающей сети представлены на рис. 4.1.

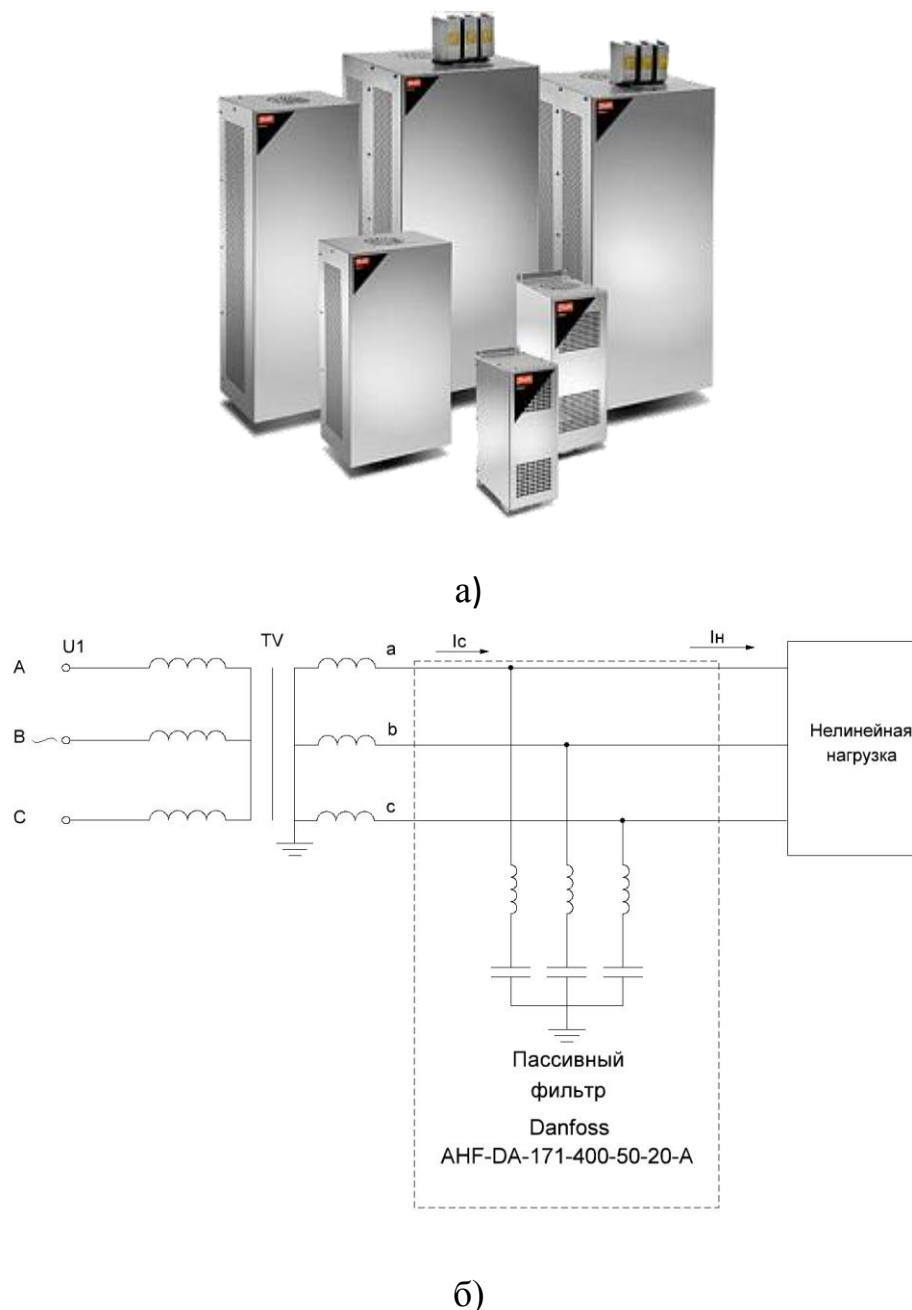


Рис. 4.1. Внешний вид пассивного фильтра Danfoss AHF-DA-171-400-50-20-A (а) и схема подключения к питающей сети (б)

Оценку эффективности использования LC-фильтра с указанными денормированными значениями емкости и индуктивности проведем в пакете Matlab с помощью имитационной модели, изображенной на рис. 2.4. Испытания

фильтра проведены для пяти различных режимов гибки трубы. Эти режимы соответствуют следующим строкам таблицы 1.2: №2, действующее значение тока нагрузки $I_H = 756$ А; №8, $I_H = 777$ А; №11, $I_H = 819$ А; №17, $I_H = 639$ А; №19, $I_H = 675$ А. Результаты испытаний фильтра представлены на рис. 4.2, на котором изображен график зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току K_I от действующего значения тока нагрузки ЭИИ.

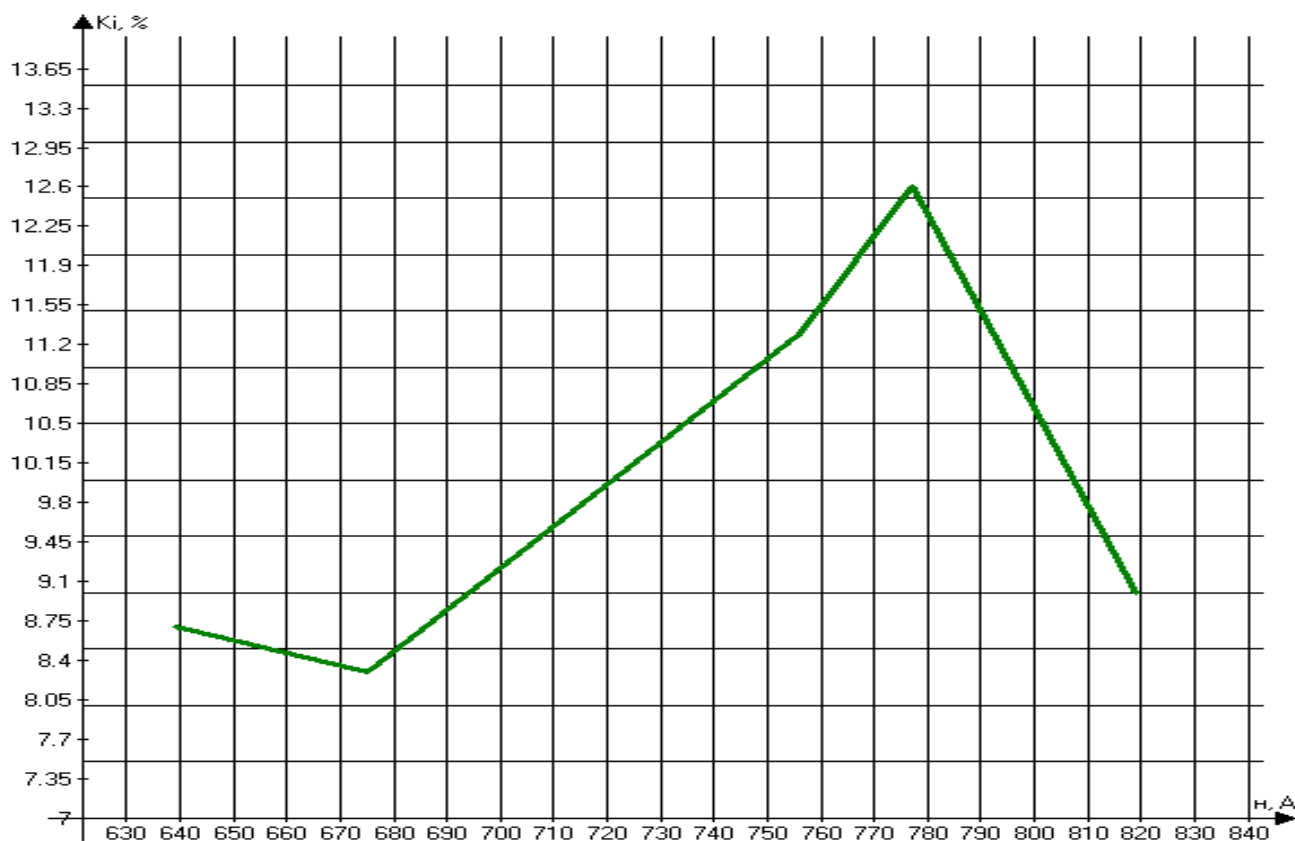


Рис. 4.2. График зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току от действующего значения тока нагрузки ЭИИ

Приведенный график показывает, что эффективность подавления высших гармоник тока при помощи пассивного фильтра меняется в диапазоне от 8,3 % до 12,7 % в зависимости от тока нагрузки. Исходя из этого, для дальнейшего снижения K_I на всем диапазоне изменения тока нагрузки необходимо использовать АПФ, который совместно с предлагаемым пассивным фильтром образует ГПФ.

В составе активных фильтров принято выделять две основные части: силовая часть и система управления. Силовая часть включает в себя трехфазный мостовой

автономный инвертор напряжения (АИН) на базе IGBT-транзисторов и накопительный элемент [82]. Поскольку целью работы активного фильтра является подавление высших гармоник тока, он обязан обладать свойствами источника несинусоидального тока. В связи с этим в качестве накопительного элемента используется конденсатор, включенный на стороне постоянного тока инвертора [35-39].

Укрупненная схема подключения ГПФ к питающей сети в узле нагрузки с ЭИН представлена на рис. 4.3.

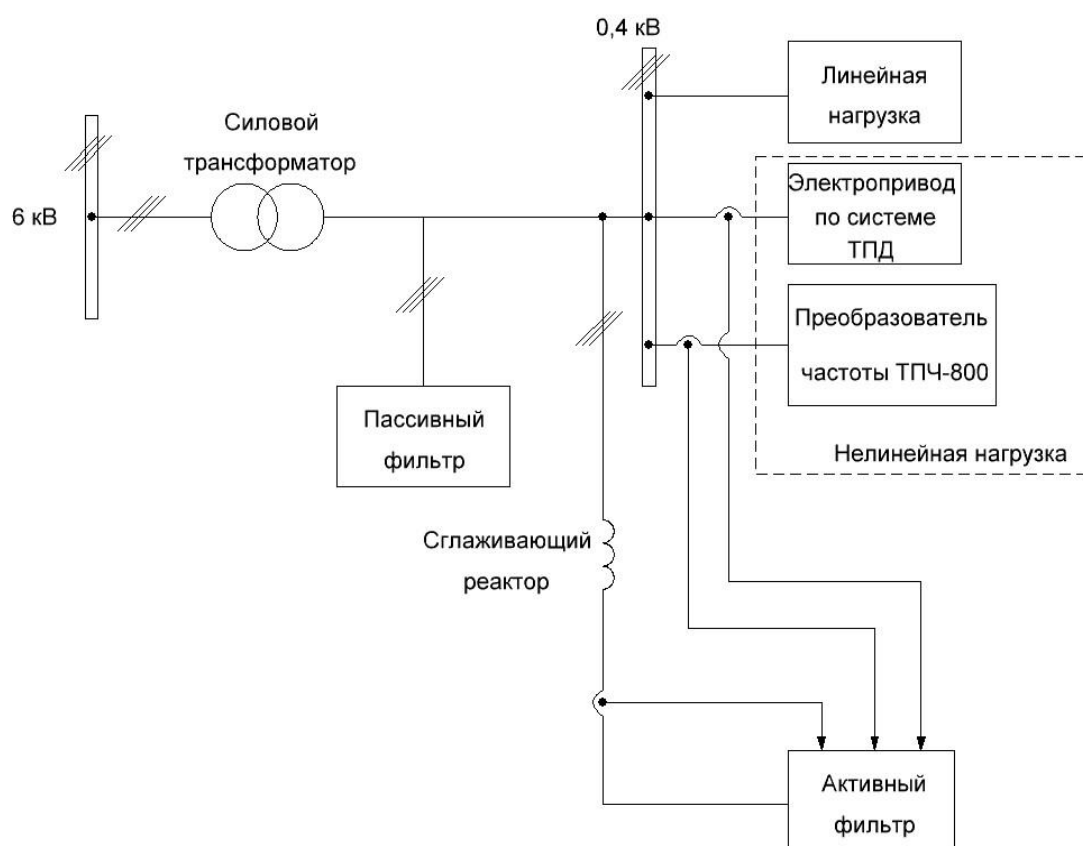


Рис. 4.3. Схема подключения ГПФ к питающей сети узла нагрузки с ЭИН

Основными параметрами, оказывающими влияние на выбор активного фильтра, являются мощность фильтра S_{ϕ} , подлежащая компенсации, и ток искажения I_n . Известно, что полная мощность в электрической сети с нелинейными электроприемниками определяется из следующего соотношения [29]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + Q_a^2 + D_0^2}, \quad (4.5)$$

где P – активная полезная мощность, Q_a – реактивная мощность преобразователя частоты, D_0 – мощность искажения

Для расчета мощности искажения необходимо определить угол сдвига между кривой тока и напряжения в узле нагрузки с ЭИН. Коэффициент сдвига при идеальном сглаживании выпрямленного тока без учета влияния намагничивающего тока питающего трансформатора и коммутации вентилей равен [29]:

$$\cos \varphi = \cos \alpha, \quad (4.6)$$

где α – угол управления выпрямителя в составе преобразователя частоты. Расчетное значение угла управления приведено в табл. 4.1. Мощность в промежуточном звене постоянного тока преобразователя частоты определяется как [59]:

$$P_d = U_{d0} \cdot I_d, \quad (4.7)$$

где U_{d0} – значение средневывпрямленного напряжения в промежуточном звене постоянного тока преобразователя частоты при угле управления $\alpha = 0$, $U_{d0} = 515$ В, и I_d – значение средневывпрямленного тока в промежуточном звене постоянного тока преобразователя частоты. Реактивную мощность преобразователя частоты можно определить из следующего соотношения [59]:

$$Q_a = P_d \cdot \sin \varphi. \quad (4.8)$$

Из выражения (4.5) мощность искажения можно определить следующим образом:

$$D_0 = \sqrt{Q_{изм}^2 - Q_a^2}. \quad (4.9)$$

Для определения мощности активной части гибридного фильтра необходимо рассчитать ток искажения в сети [43]:

$$I_n = \frac{k_I \cdot I_{(1)}}{100}, \quad (4.10)$$

где k_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих по току в сети, $I_{(1)}$ – значение тока основной гармоники. Ток искажения представляет собой

квадратный корень из алгебраической суммы квадратов токов гармоник, начиная со 2-й. Исходя из этого, ток искажения без учета тока пятой гармоники определяется следующим образом:

$$I_n' = \sqrt{I_n^2 - I_{(5)}^2}, \quad (4.11)$$

где $I_{(5)}$ – ток пятой гармоники. Его можно определить следующим образом [43]:

$$I_{(5)} = \frac{I_{(1)} \cdot k_5}{100\%}, \quad (4.12)$$

где k_5 – коэффициент 5-ой гармонической составляющей по току. Тогда мощность активной части ГПФ можно определить следующим образом [29]:

$$S_{A\Phi} = \sqrt{3} \cdot I_n \cdot U_{л}. \quad (4.13)$$

Результаты расчета мощности активной части ГПФ для пяти различных технологических процессов гибки труб представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Результаты расчета мощности активной части ГПФ

Размеры трубы (DxS)	Исходные данные			Расчетные величины					
	$\alpha, ^\circ$	I_d, A	$Q_{изм},$ квар	$Q_{нр},$ квар	$D_0,$ квар	$k_5,$ %	$I_{(5)},$ А	I_n', A	$S_{A\Phi},$ кВА
219x13	51	750	390	300	250	21,4	154	135,5	89,2
273x24	39	750	339	243	236	20,2	147,3	125	82,3
325x38	20	725	408	127,6	387	20,5	159,3	146	96
426x19	18,5	650	165	106,1	126	21	128,5	113,3	74,6
530x25	13	525	131	60,7	116	21,3	138,7	118,3	78

На основании результатов расчета принимается к установке активный фильтр Comsys ADF P300 со следующими паспортными данными [83]:

- напряжение питания $U = 230 - 690$ В;
- мощность компенсации 140 кВА;
- номинальный ток 200 А;
- частота тока 50 Гц;
- габариты 800 x 2200 x 610 мм (ШxВxГ);
- максимальная потребляемая мощность 3 кВт.

Внешний вид фильтра, предполагаемого к установке, представлен на рис. 4.4.

Важным элементом силовой части активного фильтра является накопительный конденсатор на стороне постоянного тока АИН. Для оценки величины емкости конденсатора можно использовать следующее выражение [29, 84]:

$$C = 2 \frac{T \cdot S_{A\Phi_{max}}}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}, \quad (4.14)$$



Рис. 4.4. Внешний вид активного фильтра Comsys ADF P300

где $T = 0,02$ с, - период напряжения питающей сети, U_{dc} – напряжение на конденсаторе, ΔU_{dc} – величина отклонения напряжения на конденсаторе, $S_{A\Phi_{max}}$ – максимальное значение мощности компенсации активного фильтра. Величину отклонения напряжения на конденсаторе принимаем равной 30 % от значения U_{dc} .

Максимальное значение емкости конденсатора необходимо обеспечить в условиях максимального значения мощности искажения, компенсируемой активным фильтром, и максимального значения U_{dc} . Для определения максимального значения U_{dc} необходимо решить уравнение равновесия напряжений и токов сети на одну фазу [82], соответствующее схеме на рис. 4.2:

$$U_c = L_\phi \frac{di_\phi}{dt} + F_n \cdot U_{dc}, \quad (4.15)$$

где $U_c = 310$ В, – амплитудное мгновенное значение фазного напряжения сети, L_ϕ – индуктивность сглаживающего ректора фильтра, di_ϕ/dt – производная тока фильтра по времени, $F_n = 1/3$, – коммутационная функция активного фильтра.

Отсюда U_{dc} определяется как [82]:

$$U_{dc} = 3 \cdot (310 - L_\phi \frac{di_c}{dt}). \quad (4.16)$$

В соответствии с расчетом, представленным в главе 3, значение di_ϕ/dt , при котором U_{dc} будет максимальным, составляет $di_\phi/dt = -2,3 \cdot 10^6$. Принимаем значение $L_\phi = 0,3$ мГн. Тогда в соответствии с (4.16) $U_{dc} = 1620$ В. После подстановки этого значения в (4.14) и с учетом того, что $\Delta U_{dc} = 0,3 \cdot U_{dc}$, получено, что значение емкости накопительного конденсатора составляет $C = 184$ мкФ.

На основании вышеизложенного следует принять к установке в качестве накопительного элемента активного фильтра силовой конденсатор DСМКР 1.55-120IBR емкостью 120 мкФ, рассчитанный на напряжение 1550 В [85].

4.2. Построение имитационной модели системы электроснабжения электроустановки индукционного нагрева с гибридным параллельным фильтром

Оценка эффективности компенсации высших гармоник тока, генерируемых ЭИН, проведена с помощью разработанной в пакете Matlab имитационной модели (рис. 2.11) [42], дополненной моделью гибридного фильтра (см. рис. 4.3).

Модель СЭПП с ЭИН с подключенным ГПФ представлена на рис. 4.5. Описание основных элементов имитационной модели системы электроснабжения

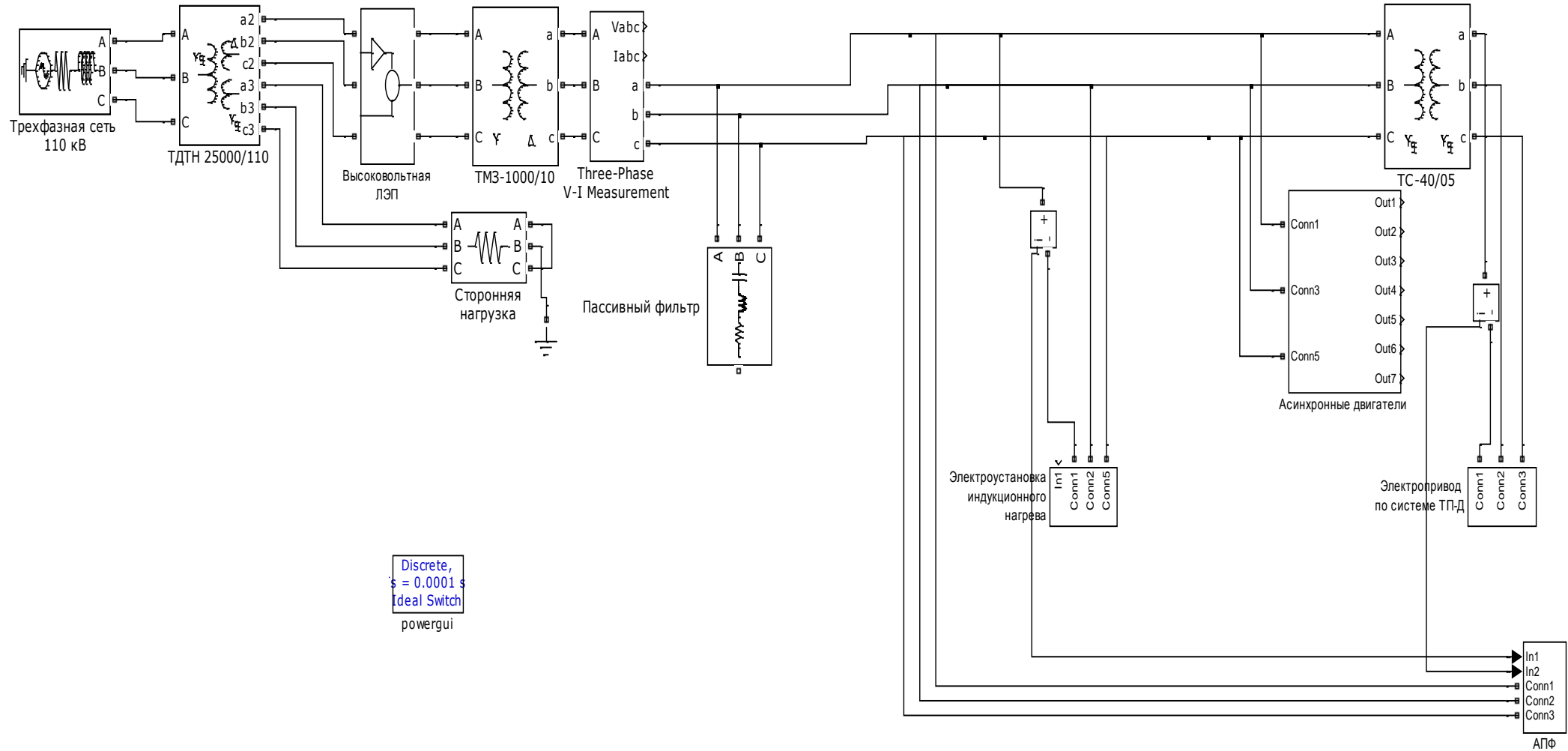


Рис. 4.5. Имитационная модель ГПФ с системой управления на базе фаззи-регулятора в среде Matlab

представлено в главе 2. Пассивный фильтр реализуется посредством блока *Three-Phase Harmonic Filter*, в который вводятся следующие параметры фильтра [51]:

- тип фильтра (настроенный или широкополосный);
- номинальное напряжение и частота сети;
- номинальная реактивная мощность;
- частота настройки;
- добротность фильтра.

На рис. 4.6 представлен окно ввода параметров блока *Three-Phase Harmonic Filter*.

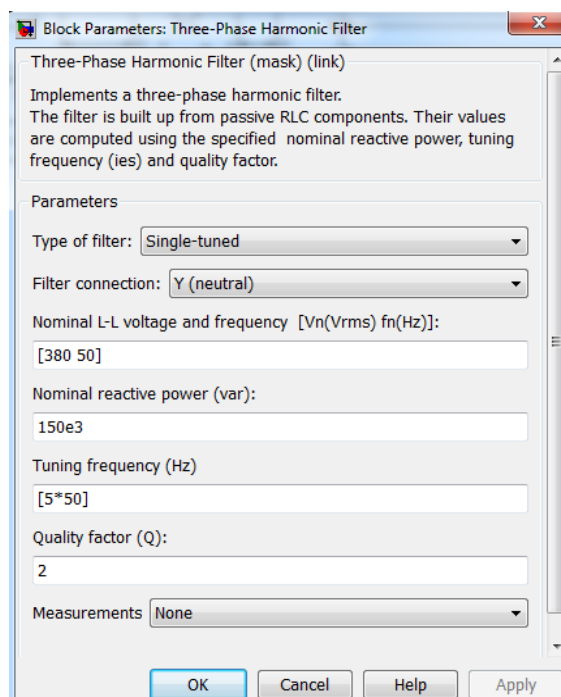


Рис. 4.6. Окно ввода параметров блока *Three-Phase Harmonic Filter*

Модель активной части ГПФ представлена на рис. 4.8 – 4.9.

Работу системы управления представленной модели фильтра можно условно разделить на три фазы. В первой фазе происходит формирование входных нечетких переменных для фаззи-регулятора [60]. Получение тока задания каждого из нелинейных потребителей осуществляется следующим образом. Кривая тока нагрузки нелинейного потребителя подвергается быстрому преобразованию Фурье с целью получения амплитуды и начальной фазы первой гармоники. Для выполнения этой операции в пакете *Matlab* используется блок *Fourier*. Окно ввода параметров этого блока представлено на рис. 4.7.

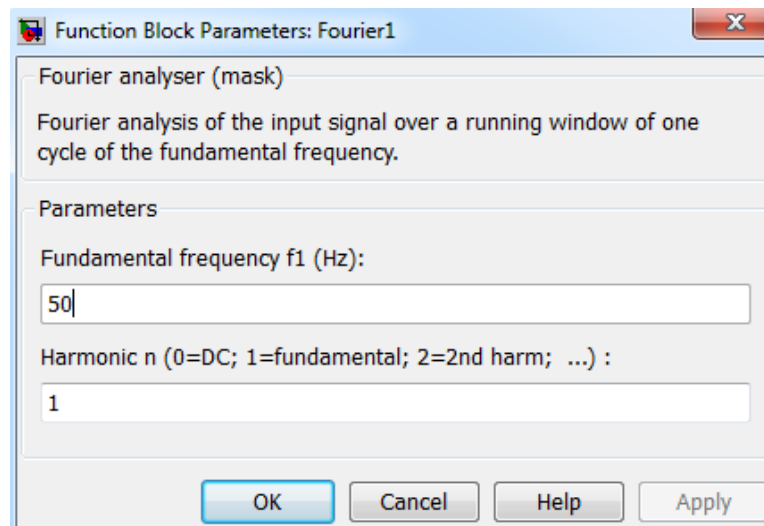


Рис. 4.7. Окно ввода параметров блока *Fourier*

Далее средствами пакета *Simulink* формируется кривая основной гармоники тока нагрузки. При ее вычитании из кривой тока нагрузки получается кривая мгновенных значений тока искажения.

Для получения лингвистической переменной β_1 «Разность между током задания ЭИН и током АФ» необходимо из инвертированного тока задания ЭИН вычесть ток, потребляемый активным фильтром. Для получения лингвистической переменной β_2 «Производная тока задания ЭИН» необходимо инвертированный ток задания ЭИН подать на блок *Derivative* из пакета *Simulink*. Для получения лингвистической переменной β_3 «ток задания для регулируемого электропривода по системе ТП-Д» необходимо рассчитанный для электропривода ток задания непосредственно подать на один из входов фаззи-регулятора.

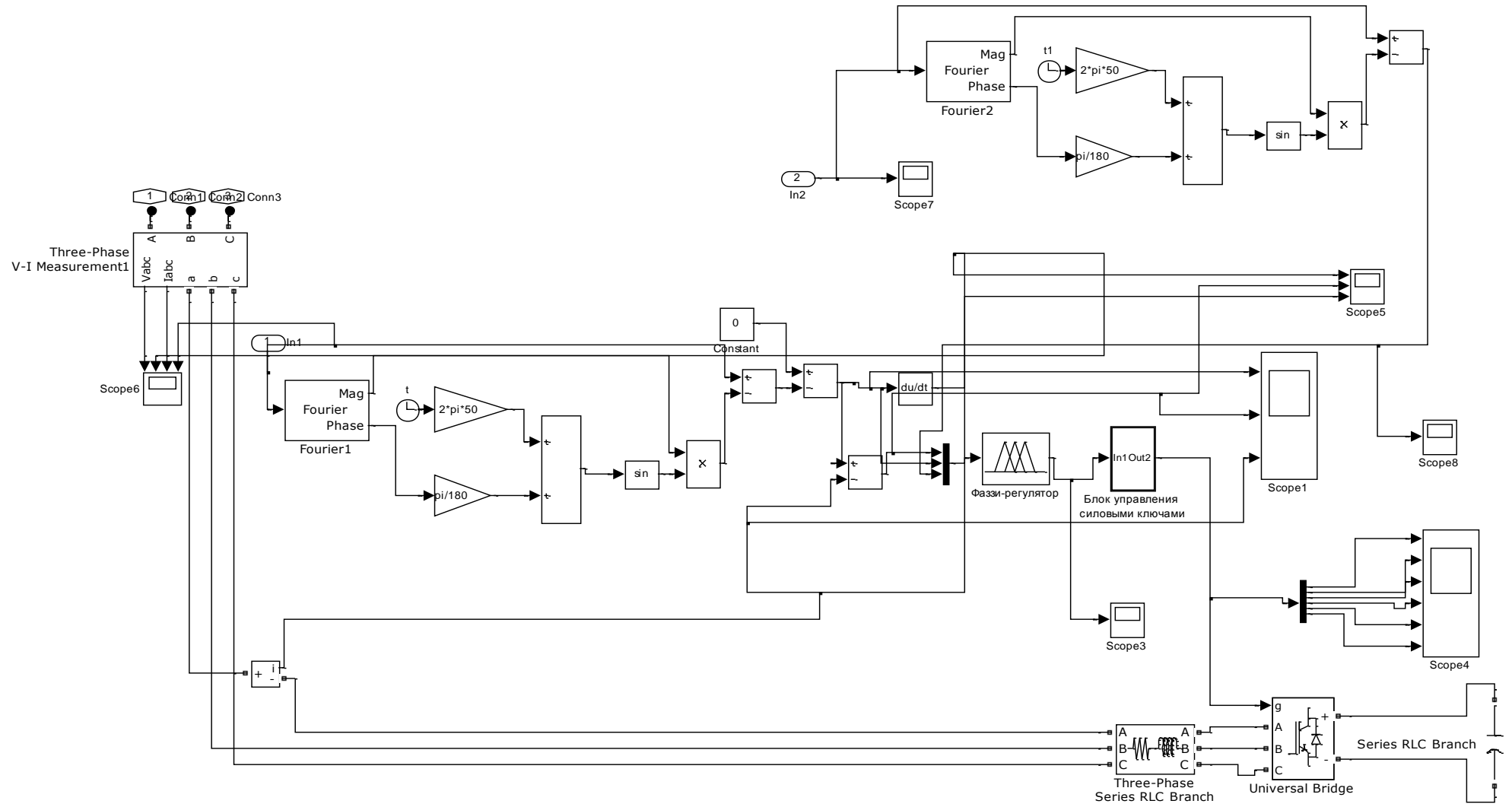


Рис. 4.8. Модель активной части ГПФ в среде Matlab

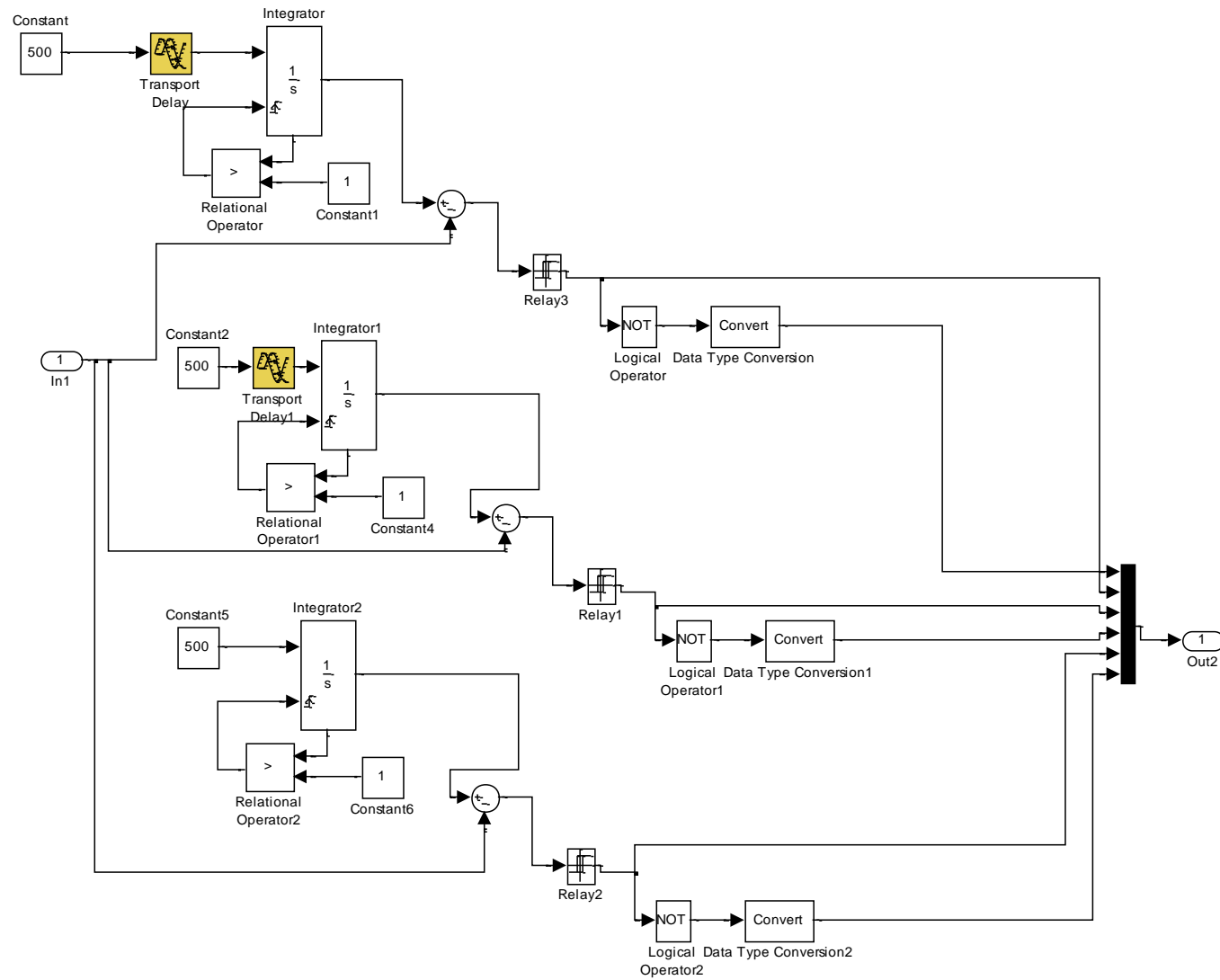


Рис. 4.9. Модель блока управления силовыми ключами АИН в среде Matlab

Во второй фазе в блоке фаззи-регулятора на основании информации о трех входных переменных осуществляется процесс нечеткого вывода Мамдани, в результате которого формируется значение выходной переменной. Процесс нечеткого вывода реализуется в блоке *Fuzzy Logic Controller* [80]. Окно ввода параметров этого блока представлено на рис. 4.10

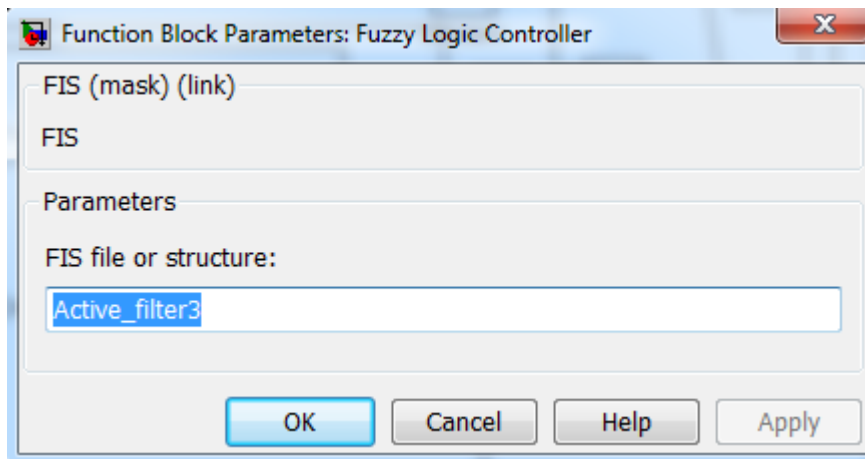


Рис. 4.10. Окно ввода параметров блока *Fuzzy Logic Controller*

В окно вводится название *FIS*-переменной из рабочей области *Matlab*, сгенерированной в пакете *Fuzzy System Toolbox*. Область значений выходной переменной фаззи-регулятора лежит в диапазоне от 0 до 1.

В третьей фазе в блоке управления силовыми ключами происходит сравнение опорного пилообразного напряжения с выходным сигналом фаззи-регулятора. Сравнение организовано для трех фаз со сдвигом опорного напряжения с помощью блока *Transport Delay*. Сигнал сравнения подается на релейный элемент и далее на управляющие входы силовых ключей АИН.

Емкость накопительного конденсатора моделируется при помощи блока *Series RLC Branch* в зависимости от технологических параметров процесса гибки труб меняется в диапазоне 50÷100 мкФ. Осциллограммы токов и напряжений при гибке трубы №2 (см. таблицу 1.2) представлены на рис. 4.11.

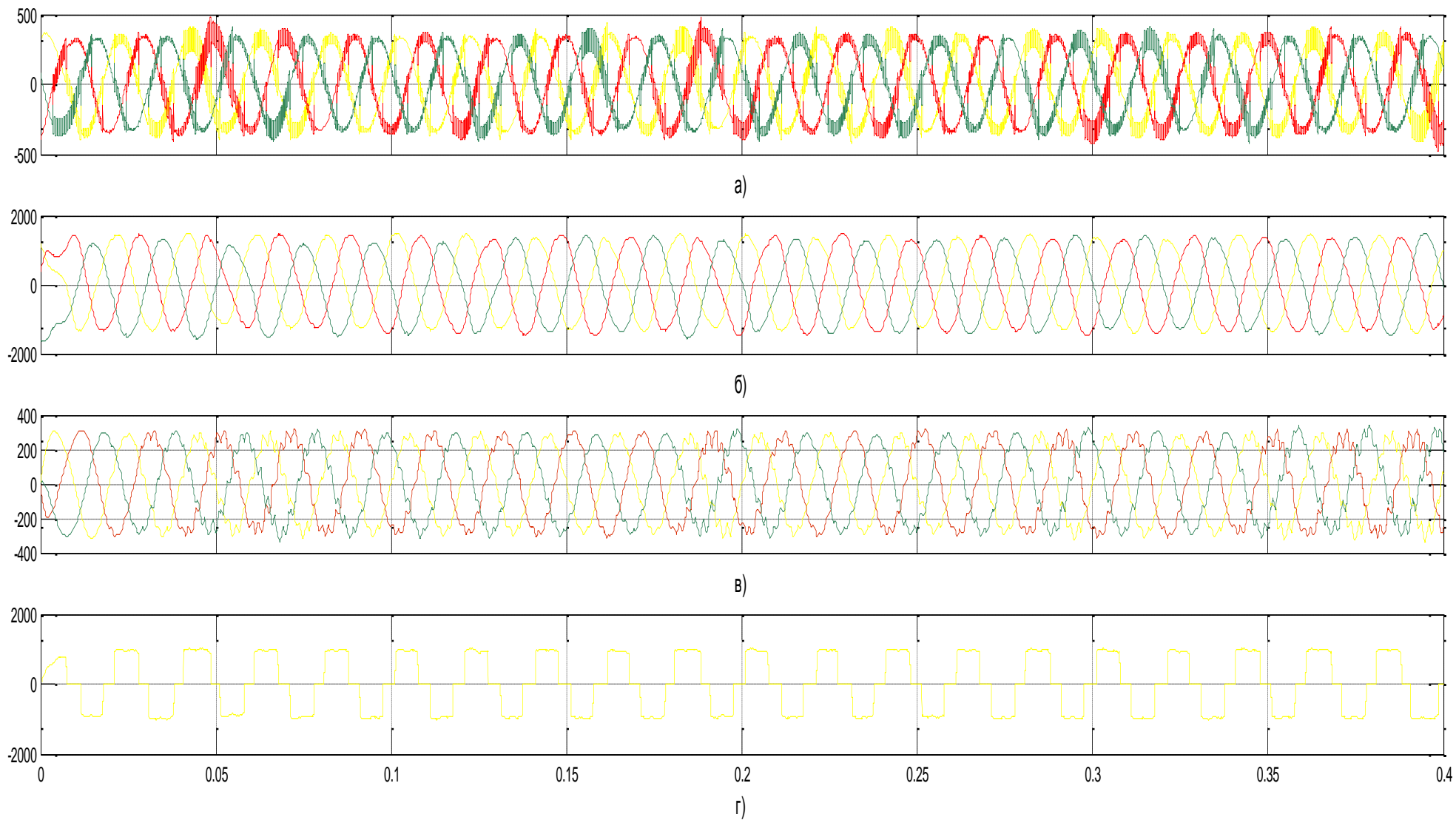


Рис. 4.11. Осциллограммы токов и напряжений:

а) напряжение сети, б) ток сети, в) ток активного фильтра, г) ток нагрузки в фазе А

Для оценки эффективности работы предлагаемой системы управления активного параллельного фильтра целесообразно провести сравнение ее компенсационных характеристик с широко распространенной системой управления, основанной на использовании для вычисления тока компенсации теории мгновенной мощности. Имитационная модель системы электроснабжения ЭИН с ГПФ, имеющим в своем составе активную часть с системой управления на базе теории мгновенной мощности, в среде *Matlab* и осциллограммы токов и напряжений при гибке трубы №2 (см. таблицу 1.2) представлены на рисунках 4.12 и 4.13 соответственно [52].

В блоках *Current Calculation* и *Voltage Calculation* (рис. 4.10) осуществляются преобразования трехфазных токов и напряжений в двухфазные (d, q) по уравнениям (3.4) и (3.5) [52]. В блоке *Instantaneous Power Calculation* рассчитываются мгновенные вещественная и мнимая мощности в нагрузке по уравнению (3.7). В блоке I_p, I_q *Calculation* рассчитываются токи, которые требуется скомпенсировать по уравнению (3.8). В блоке I_a, I_b, I_c *Calculation* осуществляется преобразование двухфазных (d, q) токов в трехфазные (a, b, c). В блоке *Hist_Control* включены три релейных регулятора, реализующие токовый коридор в АИН.

В представленной модели реализован алгоритм построения системы компенсации, при котором выбираются нежелательные части реальной p^* и мнимой q^* мощностей нагрузки, которые должны быть скомпенсированы [59]. Из реальных токов нагрузки вычитаются вычисленные токи i_a, i_b, i_c , и эти разности подаются на релейные регуляторы, где они сравниваются с реальными токами сети i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} .

В модели для оценки электромагнитных и энергетических свойств использованы осциллографы, которые позволяют так же измерить токи и мощности в системе.

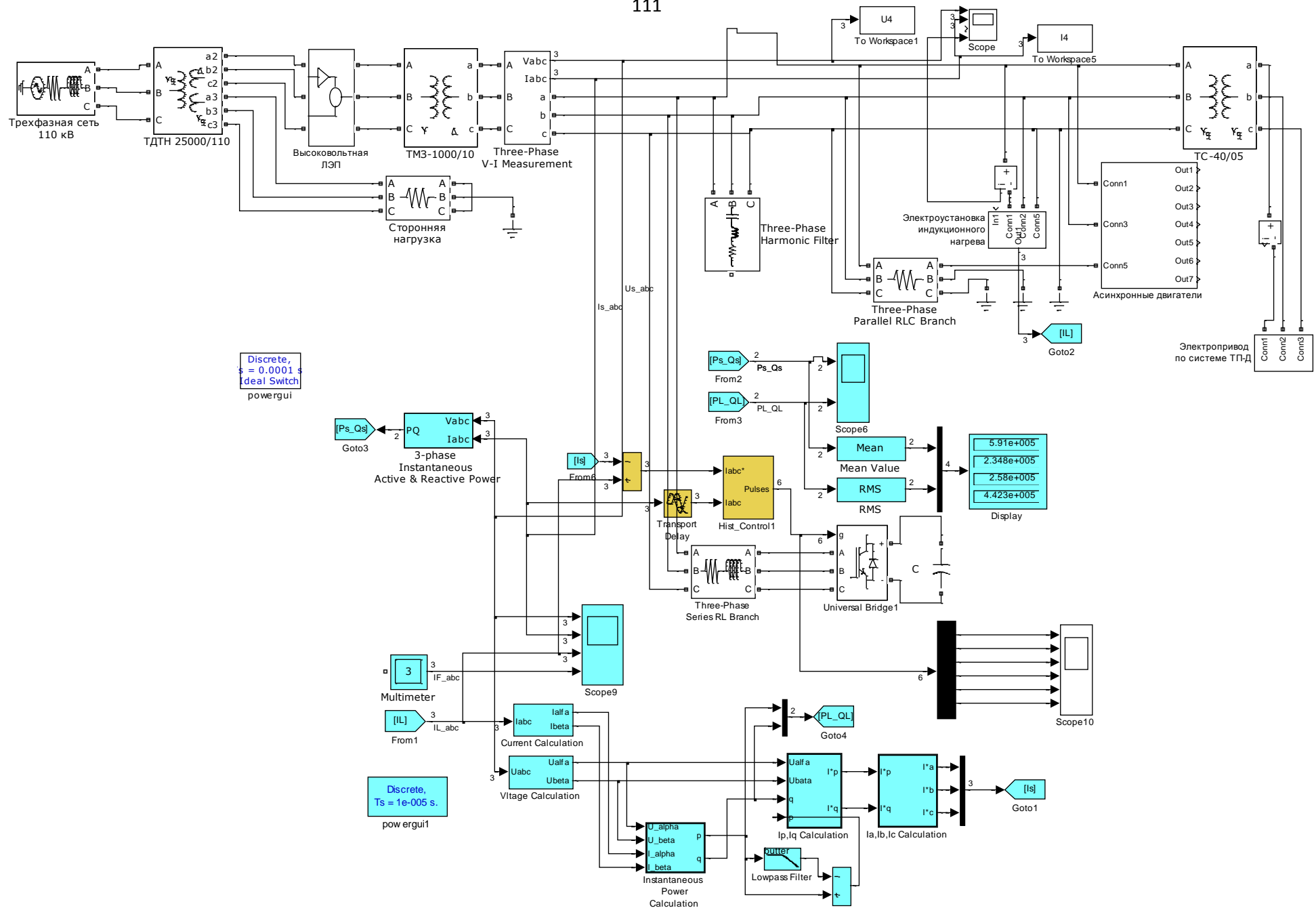


Рис. 4.12. Имитационная модель ГПФ с системой управления на базе теории мгновенной мощности в среде Matlab

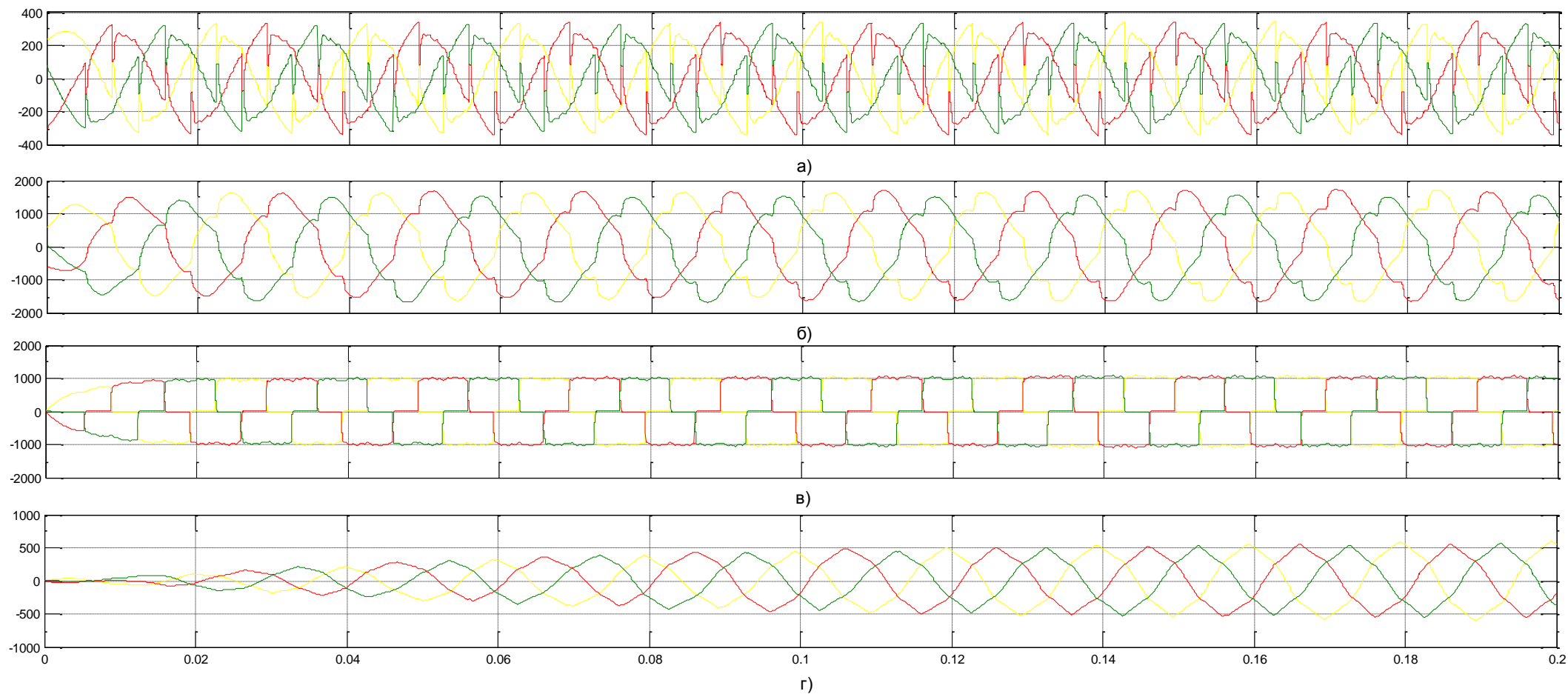


Рис. 4.13. Осциллограммы токов и напряжений:

а) напряжение сети, б) ток сети, в), ток нагрузки г) ток активного фильтра

Для сравнительной оценки компенсационных характеристик различных устройств в условиях использования в системе электроснабжения ЭИН построены графики зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току K_I от тока нагрузки ЭИН (рисунок 4.14).

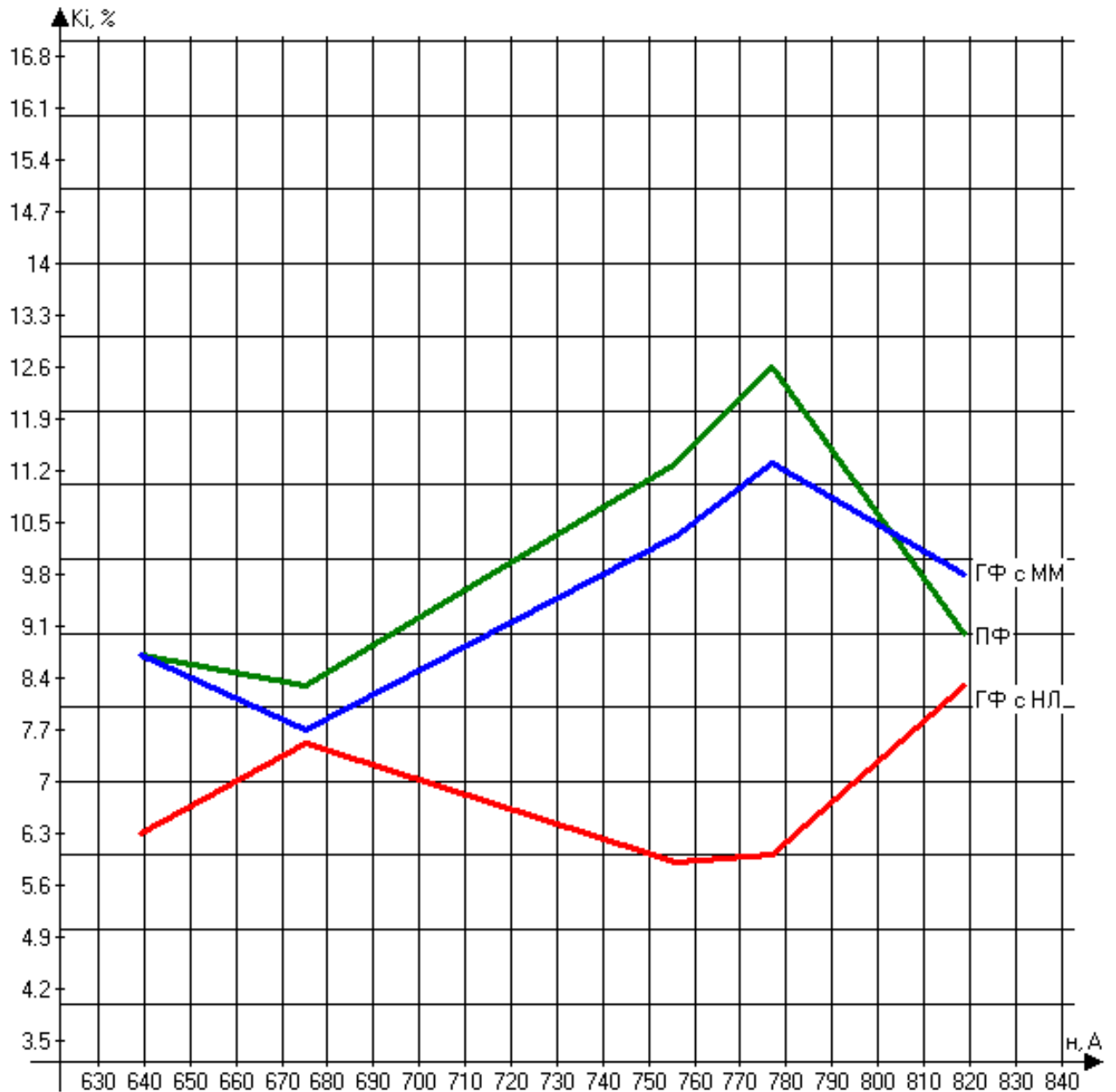


Рис. 4.14. Графики зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих по току K_I от тока нагрузки ЭИН

ПФ – пассивный фильтр; ГФ с ММ – гибридный фильтр с системой управления на базе теории мгновенной мощности; ГФ с НЛ – гибридный фильтр с системой управления на базе нечеткой логики

Диапазон изменения тока нагрузки ЭИН соответствует различным показателям технологического процесса гибки труб и номерам строк таблицы 1.2: №2, действующее значение тока нагрузки $I_n = 756$ А; №8, $I_n = 777$ А; №11, $I_n = 819$ А; №17, $I_n = 639$ А; №19, $I_n = 675$ А.

Анализ приведенных графиков позволяет сделать вывод о том, что ГПФ с системой управления активной части на базе нечеткой логики обладает лучшими компенсационными характеристиками на всем диапазоне изменения тока нагрузки ЭИН по сравнению с другими фильтрокомпенсирующими устройствами.

4.3. Синтез нечеткого регулятора для системы управления активной части гибридного параллельного фильтра

На рис. 4.15 представлена структурная схема системы управления с нечетким регулятором [86].

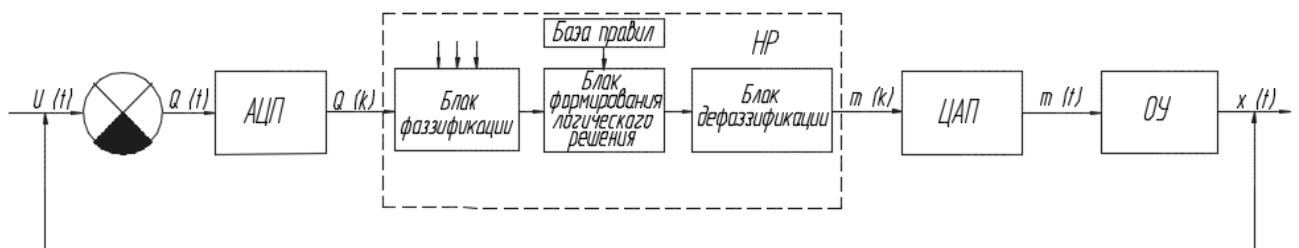


Рис. 4.15. Структурная схема системы управления с нечетким регулятором

На схеме 4.15 приняты следующие обозначения: АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ОУ – объект управления, НР – нечеткий регулятор, $U(t)$ – управляющее воздействие, $Q(t)$ – рассогласование, $Q(k)$ – квантованное рассогласование, $m(k)$ – квантованное управляемое воздействие, $m(t)$ – управляемое воздействие НР, $x(t)$ – выходная величина объекта управления.

Нечеткий регулятор НР практически реализуется на микроЭВМ (или микропроцессоре) и работает в дискретном режиме, поэтому система автоматического управления с нечетким регулятором содержит устройства сопряжения микроЭВМ с объектом управления - АЦП и ЦАП.

НР работает в дискретном режиме, поэтому на каждом шаге квантования h он должен выполнить все необходимые вычисления [70, 86]. НР обрабатывает все входные переменные, поэтому на него возможно подавать дополнительные переменные, характеризующие процессы в объекте управления, и тем самым обеспечивать более широкое воздействие на динамику управления. Система с НР обычно устойчива в отношении изменений параметров объекта управления, что связано с нечеткой природой правил функционирования. Традиционные методы описания регуляторов, например, при помощи передаточных функций, для НР не подходят и не требуются. НР является нелинейным и его особенностью является отсутствие динамики в самом НР. Отсутствие "памяти" и процедура проектирования, а также словесное описание процесса управления, характеризующееся лингвистическими правилами, являются главными особенностями НР.

Нечеткие регуляторы реализуются на практике, как правило, в форме программного обеспечения высокого уровня, например "Pascal", что обеспечивает большую гибкость при их настройке. При этом по результатам моделирования и испытаний системы управления, содержащей нечеткий регулятор в замкнутом контуре, можно изменять количественные диапазоны лингвистических переменных, функции принадлежности и модифицировать базу правил с целью получения требуемого качества управления.

Предлагаемый нечеткий регулятор реализует процесс нечеткого вывода на базе «минимаксного» алгоритма Мамдани в соответствии с формулами (3.17) – (3.20) [80].

Алгоритм Мамдани математически описывается следующим образом.

1. Нечеткость (процедура фаззификации - *fuzzification*): находятся степени истинности для предпосылок или условий (входных переменных) каждого правила $\mu^j(\beta_i)$, где j – количество термов, описывающих каждую нечеткую переменную, i – количество переменных.

2. Нечеткий вывод: находятся уровни "отсечения" (степени истинности) для предпосылок или условий каждого из правил (процедура агрегирования - *aggregation*) [86]:

$$L_j = \mu^j(\beta_1) \cap \mu^j(\beta_2) \dots \cap \mu^j(\beta_i), \quad (4.17)$$

где через " \cap " обозначена операция логического минимума (\min); затем находятся усеченные функции принадлежности для переменной вывода или заключения - выходной переменной β_i (процедура активизации - *activation*) [86]:

$$\mu_c^j(\beta_i) = L_j \cap \mu^j(\beta_i) \quad (4.18)$$

3. Композиция (процедура аккумуляции — *accumulation*): производится объединение найденных усеченных функций, в результате чего получаем итоговое нечеткое множество для переменной выхода с результирующей функцией принадлежности [86]:

$$\mu_c(\beta_i) = \mu_c^1(\beta_i) \cup \mu_c^2(\beta_i) \dots \cup \mu_c^j(\beta_i) \quad (4.19)$$

где через " \cup " обозначена операция логического максимума (\max).

4. Приведение к четкости (процедура дефаззификации - *defuzzification*): нахождение четкого значения выходной переменной β_i , например, методом центра масс.

Как было отмечено в главе 3, в предлагаемом нечетком регуляторе используется массив из трех входных переменных ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) и одной выходной переменной β_4 . Для описания переменной β_1 используется 7 лингвистических термов, для β_2 – 5 термов, для β_3 – 3 терма, для β_4 – 7 термов.

Ниже представлено описание процесса принятия решения в нечетком регуляторе с числом термов для описания переменных равным 7.

При поступлении на нечеткий регулятор значений входных переменных $\beta_1^*, \beta_2^*, \beta_3^*$ с шагом квантования h осуществляется расчет величин u_1^*, u_2^* и u_3^* , представляющих собой значения входных переменных на едином универсальном множестве $U = [0;1]$, по нижеприведенному соотношению:

$$u_i^* = (\beta_i^* - \beta_{mini}) / (\beta_{maxi} - \beta_{mini}) \quad (4.20)$$

Значения ФП для рассчитанных величин на едином универсальном множестве $\mu^j(u)$, $j = 1 \div 7$ определяются по формулам [86]:

$$\begin{aligned} \mu_1(u) &= 1 - u, u \in [0, 1]; \\ \mu_2(u) &= \begin{cases} 6u, u \in [0, 1/6], \\ 6(1-u)/5, u \in [1/6, 1] \end{cases}; \\ \mu_3(u) &= \begin{cases} 3u, u \in [0, 1/3], \\ 3(1-u)/2, u \in [1/3, 1] \end{cases}; \\ \mu_4(u) &= \begin{cases} 2u, u \in [0, 1/2], \\ 2(1-u)/2, u \in [1/2, 1] \end{cases}; \\ \mu_5(u) &= \begin{cases} 3u/2, u \in [0, 2/3], \\ 3(1-u), u \in [2/3, 1] \end{cases}; \\ \mu_6(u) &= \begin{cases} 6u/5, u \in [0, 5/6], \\ 6(1-u), u \in [5/6, 1] \end{cases}; \\ \mu_7(u) &= u, u \in [0, 1]; \end{aligned} \quad (4.21)$$

На рис. 4.16 представлен график функций принадлежности входных величин НР на едином универсальном множестве U .

В соответствии с данными, представленными в главе 3, входные переменные $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ описываются следующим набором лингвистических термов a_i^j : {отрицательная очень большая (NVB), отрицательная большая (NB), отрицательная малая (NB), нулевая (ZE), положительная малая (PS), положительная большая (PB), положительная очень большая (PVB)}.

Функция принадлежности вектора входных переменных выбранному управляющему воздействию μ^m_j определяется в соответствии с (4.17). Результирующая ФП для управляющего воздействия в том случае, если нечеткие значения входных переменных в базе правил соединены логическим И, определяется как:

$$\mu^m = \mu^{m_1} \cup \mu^{m_2} \cup \mu^{m_3} \cup \mu^{m_4} \cup \mu^{m_5} \cup \mu^{m_6} \cup \mu^{m_7}, \quad (4.22)$$

где μ^{m_1} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "отрицательная очень большая", μ^{m_2} - функция принадлежности

управляющего воздействия нечеткому множеству "отрицательная большая", μ^{m_3} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "отрицательная малая", μ^{m_4} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "нулевая", μ^{m_5} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "положительная малая", μ^{m_6} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "положительная большая", μ^{m_7} - функция принадлежности управляющего воздействия нечеткому множеству "положительная очень большая".

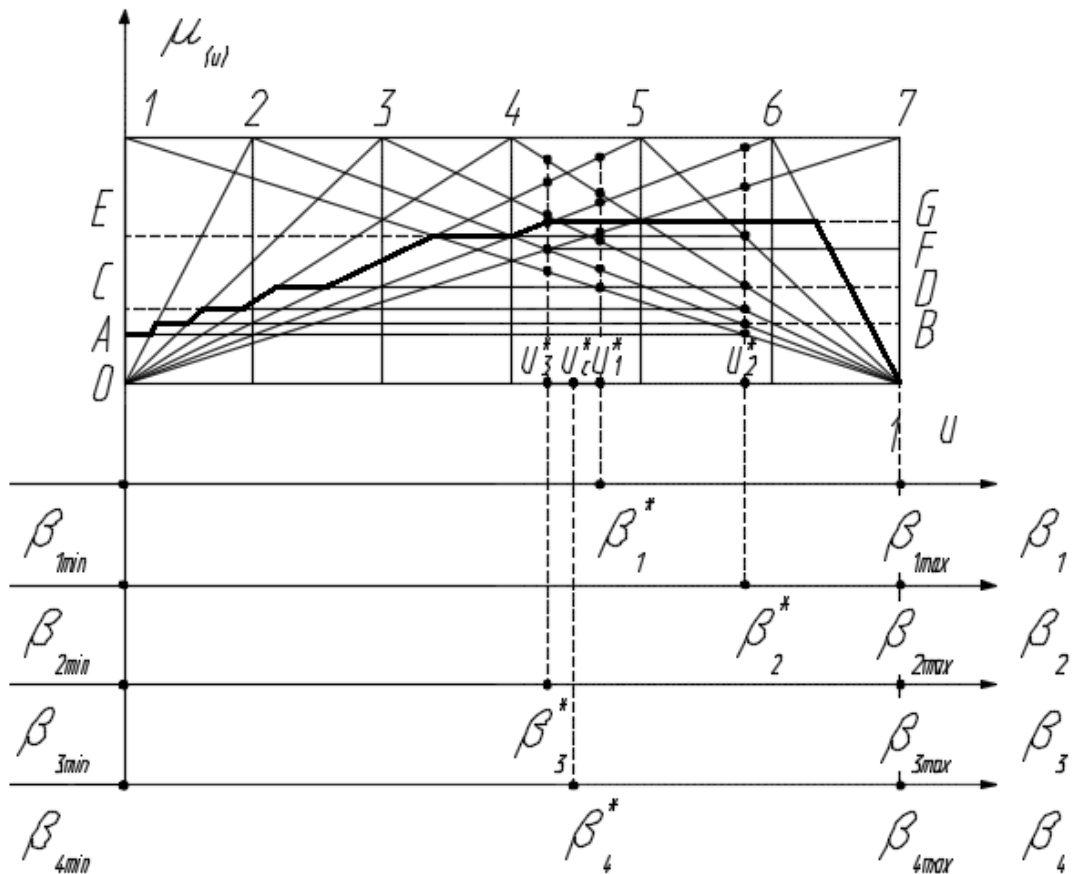


Рис. 4.16. График функций принадлежности входных величин НР на едином универсальном множестве U

В соответствии с лингвистическими правилами управления, формализованными уравнением (4.17) ФП управляющего воздействия $\mu_{1c}(u)$ нечеткому множеству "отрицательная очень большая" ограничена сверху значением [86]:

$$A = \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*), \mu_1(u_3^*)]. \quad (4.23)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{2c}(u)$ нечеткому множеству "отрицательная большая" ограничена сверху значением:

$$B = \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*), \mu_2(u_3^*)]. \quad (4.24)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{3c}(u)$ нечеткому множеству "отрицательная малая" ограничена сверху значением:

$$C = \min[\mu_3(u_1^*), \mu_3(u_2^*), \mu_3(u_3^*)]. \quad (4.25)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{4c}(u)$ нечеткому множеству "нулевая" ограничена сверху значением:

$$D = \min[\mu_4(u_1^*), \mu_4(u_2^*), \mu_4(u_3^*)]. \quad (4.26)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{5c}(u)$ нечеткому множеству "положительная малая" ограничена сверху значением:

$$E = \min[\mu_5(u_1^*), \mu_5(u_2^*), \mu_5(u_3^*)]. \quad (4.27)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{6c}(u)$ нечеткому множеству "положительная большая" ограничена сверху значением:

$$F = \min[\mu_6(u_1^*), \mu_6(u_2^*), \mu_6(u_3^*)]. \quad (4.28)$$

ФП управляющего воздействия $\mu_{7c}(u)$ нечеткому множеству "положительная очень большая" ограничена сверху значением:

$$G = \min[\mu_7(u_1^*), \mu_7(u_2^*), \mu_7(u_3^*)]. \quad (4.29)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия на основании выражения (4.22) получается формированием максимума (жирная линия на рис. 4.14) и определяется как:

$$\mu_c(u) = \max[\mu_{1c}, \mu_{2c}, \mu_{3c}, \mu_{4c}, \mu_{5c}, \mu_{6c}, \mu_{7c}]. \quad (4.30)$$

Для определения конкретного значения управляющего воздействия β_4^* формируется «результирующая фигура», ограниченная результирующей ФП.

Абсцисса центра тяжести результирующей фигуры при $A \leq G$ определяется по формуле [86]:

$$u_c = \frac{G/2 + (A^3 - G^3)/6}{G + (A^2 - G^2)/2}. \quad (4.31)$$

Абсцисса центра тяжести результирующей фигуры при $A \geq G$ определяется по формуле:

$$u_c = \frac{(A - A^2 + G^2)/2 + (A^3 - G^3)/6}{A - (A^2 - G^2)/2}. \quad (4.32)$$

Полученное значение u_c затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления β_4^* по формуле [86]:

$$\beta_4^* = \beta_{4min} \cdot (1 - 2 \cdot u_c). \quad (4.33)$$

4.4. Оценка экономической эффективности внедрения гибридного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткой логики в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева

При оценке экономической эффективности любого проекта оценивается его потенциальная способность сохранить окупаемость вложенных средств и обеспечить рост эффективности их использования [87].

Для реализации такой оценки необходимо определить следующие параметры инвестиционного проекта:

- финансовые поступления, связанные с реализацией проекта (F_i);
- затраты, связанные с реализацией проекта (Q_i);
- коэффициент дисконтирования (D_i);
- чистый денежный поток (FCF_i);
- чистая дисконтированная стоимость (NPV_i);
- накопленная дисконтированная стоимость (NPV_Σ);
- индекс рентабельности инвестиции (PI);
- период окупаемости проекта ($T_{ок}$).

Финансовые поступления, связанные с реализацией проекта, создаются главным образом за счет экономии мощности искажения, компенсируемой ГПФ

[88-90]. Это обусловлено тем, что в соответствии с приказом от 31 августа 2010 г. N 219-э/6 Федеральной службы по тарифам [91] нормативный $tg \varphi = 0,4$, вследствие чего необходимо компенсировать генерируемую мощность искажения. Усредненное значение этой мощности рассчитывается следующим образом:

$$\Delta S = S_{A\Phi} + S_{ПФ} - S_{номр}, \quad (4.34)$$

где $S_{нф}$ – усредненное значение мощности, компенсируемой пассивным фильтром; $S_{номр} = 3$ кВА, – мощность, потребляемая активным фильтром. На основе данных, представленных в таблице 4.1, принимаем усредненное значение мощности, компенсируемой активным фильтром, $S_{A\Phi} = 85$ кВА. Мощность, компенсируемая пассивным фильтром, определяется как:

$$S_{ПФ} = \sqrt{3} \cdot I_{(5)} \cdot U_{л}. \quad (4.35)$$

В соответствии с данными, представленными в таблице 4.1, максимальное значение мощности, компенсируемой пассивным фильтром, составляет $S_{ПФmax} = 104$ кВА. С учетом того, что, как следует из рис. 4.1, пассивный фильтр ухудшает свои компенсационные характеристики с изменением тока нагрузки, примем усредненное значение мощности, компенсируемой пассивным фильтром, $S_{ПФ} = 50$ кВА.

Таким образом, усредненное значение мощности искажения, компенсируемой ГПФ, в соответствии с (4.34) составляет $\Delta S = 132$ кВА. Тогда размер ежегодных финансовых поступлений, связанных с внедрением ГПФ, можно рассчитать следующим образом:

$$F_i = \Delta S \cdot N \cdot k_{исн} \cdot c, \quad (4.36)$$

где $N = 2408$, – количество рабочих часов в году; $k_{исн} = 0,5$, – коэффициент использования ЭИН; $c = 3,53$, – тариф за электроэнергию.

Все затраты, связанные с внедрением ГПФ, можно разделить на три статьи [87]:

- капитальные затраты, связанные с покупкой оборудования;
- эксплуатационные затраты;

– амортизация.

Затраты в первый год реализации проекта определяются как:

$$Q_1 = C_{A\Phi} + C_{ПФ} + E + A \cdot (C_{A\Phi} + C_{ПФ}), \quad (4.37)$$

где $C_{A\Phi} = 1201$ тыс. руб., - стоимость предлагаемого активного фильтра Comsys ADF P300; $C_{ПФ} = 260$ тыс. руб., - стоимость пассивного фильтра Danfoss АНФ-DA-171-400-50-20-A; $E = 60$ тыс. руб., - стоимость технического обслуживания ГПФ, $A = 0.083$, - годовая ставка амортизации, которая является величиной, обратной сроку службы фильтра. Срок службы фильтра составляет 12 лет.

Чистый денежный поток за год эксплуатации представляет собой разность между годовыми финансовыми поступлениями и годовыми затратами, связанными с реализацией проекта [87]:

$$CFC_i = F_i - Q_i. \quad (4.38)$$

Далее необходимо провести расчет динамических показателей экономической эффективности проекта.

Чистая текущая дисконтированная стоимость в i -ом году реализации проекта (NPV_i) представляет собой разность денежных поступлений и затрат, разновременные величины которых приводятся в сопоставимый вид путем приведения к первому году осуществления проекта, т.е. умножением на соответствующий коэффициент дисконтирования [87]:

$$NPV_i = CFC_i \cdot D_i = CFC_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i}, \quad (4.39)$$

где D_i – коэффициент дисконтирования в i -ом году реализации проекта; $r = 0.1$, - ставка дисконтирования. Коэффициент дисконтирования — это ежегодная ставка доходности, которая могла бы быть получена в настоящий момент от аналогичных инвестиций.

Накопленная дисконтированная стоимость определяется как [87]:

$$NPV_n = \sum_{i=1}^n NPV_i, \quad (4.40)$$

где n – количество лет реализации проекта.

Индекс рентабельности (PI) рассчитывается как отношение дисконтированных финансовых поступлений к дисконтированным затратам на реализацию проекта [87]:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^{12} (F_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i})}{\sum_{i=1}^{12} (Q_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i})}, \quad (4.41)$$

Для данного проекта индекс рентабельности составляет $PI = 1,43$.

Таблица 4.2 Показатели эффективности внедрения ГПФ.

№	Денежные потоки	Время реализации проекта						
		1	4	5	8	9	10	12
1.	Финансовые поступления (тыс. руб.)	673	2019	673	2019	673	673	1346
2.	Денежные оттоки (тыс. руб.)	1725	792	264	792	264	264	528
3.	Капитальные вложения (тыс. руб.)	1461	-	-	-	-	-	-
4.	Затраты на обслуживание, ремонт и амортизацию (тыс. руб.)	264	792	264	792	264	264	528
5.	Чистый денежный поток (CFC_i) (тыс. руб.)	-1052	1227	409	1227	409	409	818
6.	Коэффициент дисконтирования	0,909	0,683	0,621	0,467	0,424	0,386	0,319
7.	Чистая текущая дисконтированная стоимость (NPV_i) (тыс. руб.)	-956	838	254	573	173	158	261
8.	Накопленная дисконтированная стоимость (NPV_{Σ}) (тыс. руб.)	-956	-118	136	709	882	1040	1301

Период возврата инвестиций представляет собой период времени функционирования проекта, за который суммарные инвестиции сравниваются с суммой доходов от эксплуатации проекта. Он определяется следующим образом [85]:

$$T_{\text{воз}} = t_x + \frac{NPV_{t_x}}{NPV_{t_x+1}}, \quad (4.42)$$

где t_x - количество лет с отрицательной накопленной дисконтированной стоимостью;

NPV_{t_x} – значение накопленной дисконтированной стоимости в году t_x по модулю;

NPV_{t_x} – значение накопленной дисконтированной стоимости в году t_x+1 .

Принимая допущение о том, что для данного проекта инвестиции вкладывались одномоментно и мгновенно, период окупаемости проекта будет равен периоду возврата инвестиций.

В соответствии с (4.42) период окупаемости для данного проекта составляет 4,86 лет. Результаты расчетов показателей инвестиционного проекта в ценах 2015 года приведены в таблице 4.2. Изучив все вышеприведенные показатели, можно сделать вывод о том, что проект эффективен, и его следует принять.

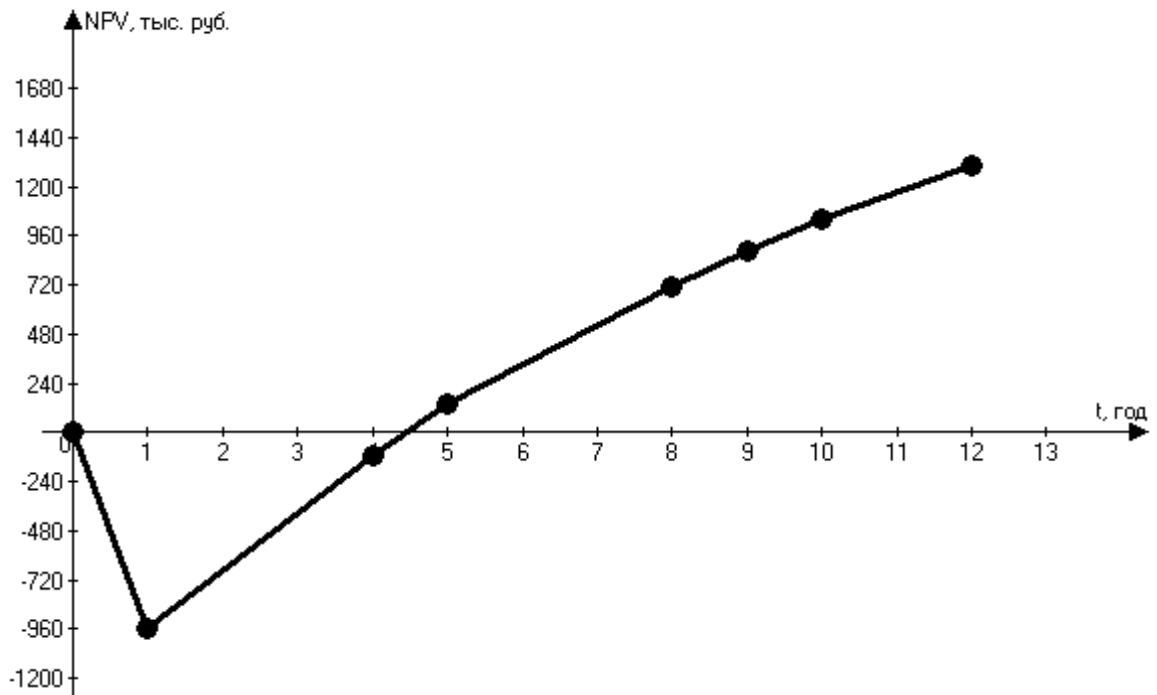


Рис. 4.15. Финансовый профиль проекта.

После оценки показателей экономической эффективности инвестиционного проекта необходимо построить финансовый профиль проекта (рис. 4.18), который представляет собой зависимость накопленной дисконтированной стоимости от времени. С его помощью можно получить наглядное представление о ходе реализации проекта.

Выводы:

1. Было установлено, что наиболее эффективным средством компенсации высших гармоник тока в системе электроснабжения электроустановки индукционного нагрева является гибридный параллельный фильтр, состоящий из резонансного пассивного фильтра, настроенного на подавление 5-ой гармоники тока, и активного фильтра со свойствами источника несинусоидального тока.

2. Анализ компенсационных характеристик различных ФКУ, выполненный посредством имитационного моделирования, позволяет сделать вывод о том, что гибридный параллельный фильтр с системой управления активной части на базе нечеткой логики обладает лучшими компенсационными характеристиками на всем диапазоне изменения тока нагрузки электроустановки индукционного нагрева по сравнению с другими фильтрокомпенсирующими устройствами.

3. Разработано программное обеспечение для промышленного контроллера, позволяющее реализовать нечеткий регулятор, на базе которого осуществляется получение управляющего сигнала в систему управления автономного инвертора напряжения в составе активной части гибридного параллельного фильтра.

4. Расчет экономической эффективности от внедрения гибридного параллельного фильтра для обеспечения электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с электроустановками индукционного нагрева показал, что срок окупаемости инвестиционного проекта составляет 4,86 лет. При этом не учтена в расчете компенсация потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения при воздействии на них высших гармонических составляющих тока.

Заключение

1. Экспериментально подтверждено наличие высших гармонических составляющих тока и напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева, уровень которых зависит от режима технологического процесса гибки труб и может не соответствовать требованиям отраслевых стандартов.

2. Разработанная имитационная модель систем электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева в пакете *Matlab Simulink* позволила оценить уровень высших гармоник тока, генерируемого в сеть, для различных режимов гибки труб. Результаты оценки уровня высших гармоник тока посредством имитационного моделирования коррелируются с результатами экспериментальных измерений.

3. Обосновано применение параллельных гибридных фильтров для компенсации высших гармонических составляющих тока и напряжения в качестве эффективного технического решения обеспечения нормативного уровня электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева.

4. Научно обосновано, что при изменяющихся режимах технологического процесса гибки труб эффективно применение системы нечеткого вывода для формирования фаззи-регулятора управляющего сигнала для системы управления активной части гибридного фильтра.

5. Проведено обоснование выбора трех входных и одной выходной лингвистических переменных фаззи – регулятора в системе управления гибридного параллельного фильтра. Статистически обоснована форма функций принадлежности в виде трапециевидных и треугольных кривых.

6. Обоснован и сформирован алгоритм Мамдани составления правил нечеткого вывода для построения фаззи – регулятора в системе управления гибридного параллельного фильтра.

7. Установлено, что применение предлагаемого гибридного параллельного фильтра с системой управления на базе нечеткого вывода позволяет эффективно решать проблемы повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева при различных показателях технологического процесса гибки труб.

8. Результаты работы позволяют получить все необходимые сведения для внедрения гибридного параллельного фильтра в систему электроснабжения промышленного предприятия с электроустановками индукционного нагрева. В частности, для производства соединительных элементов трубопроводов ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», г. Белгород, внедрение гибридного параллельного фильтра окупается в течение 4,86 лет.

Список литературы

1. Бодажков В.А. Объемный индукционный нагрев / Под ред. А.Н. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 1992. – 72 с.: ил.
2. Шамов А.Н.. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок / А.Н. Шамов, В.А. Бодажков. - Изд. 2-е, доп. и переработ. – Л., «Машиностроение», (Ленингр. отд-ние), 1974. – 280 с.
3. Тиристорные преобразователи высокой частоты / Е.И. Беркович, Г.В. Ивенский, Ю.С. Иоффе, А.Т. Матчак, В.В. Моргун. – Л., «Энергия», 1973. - 200 с.: ил.
4. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат., (Ленингр. отд-ние), 1988. - 280 с.: ил.
5. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. - Л., «Энергия», 1974. - 264 с.: ил.
6. Особенности протекания электроэнергетических процессов при гибке труб с применением индукционного нагрева / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов // 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. 78 – 81.
7. Анализ режимов работы преобразователя частоты ТПЧ-800 в составе трубогибочного стана УЗТМ-465 как нелинейного потребителя / Д.Н. Коржов // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XVIII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: ТПУ, 2012. – с. 24-27.
8. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для ВУЗов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; Под ред. А.Е. Слухоцкого. - Л.: Энергоатомиздат., (Ленингр. отд-ние), 1981. - 328 с.: ил.
9. Согласование параметров индуктора и преобразователя частоты с помощью последовательно-параллельного резонансного контура / С.К. Земан, А.В. Осипов, Ю.М. Казанцев // Индукционный нагрев, 2013, №2. – с. 25-31.

10. Непрерывная гибка труб с индукционным нагревом / В.И. Червинский, В.А. Никитин // Индукционный нагрев, 2008, №3. – с. 21-26.
11. Моделирование системы «тиристорный преобразователь частоты – индуктор – быстродвижущаяся труба» в среде *Simulink* / В.И. Лузгин, А.Ю. Петров, В.Х. Кулешов // Индукционный нагрев, 2007, №1. – с. 34-36.
12. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для ВУЗов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.: ил.
13. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.1. – 199 с.
14. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов / перевод с англ. под ред. И.В. Антика. - М., «Энергия», 1969. - 280 с.: ил.
15. Вологдин В.В. Трансформаторы для высокочастотного нагрева / В.В. Вологдин. – Л., изд. «машиностроение», 1965. – 100 с.: ил.
16. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер с нем. / И.П. Кужекин; Под ред. Б.К. Максимова. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.: ил.
17. Дейс, Д.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие / Д.А. Дейс. – Чита, ЧитГУ, 2008. – 171 с.
18. Шваб А. электромагнитная совместимость: Пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора / Под ред. Кужекина. - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 480 с.: ил.
19. Арриллага Дж. гармоника в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Брэдли. П. Боджер. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 320 с.: ил.
20. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 252 с.: 74 ил.
21. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.: ил.
22. Закладной А.Н. Энергоэффективный электропривод с вентильными двигателями: Монография / А.Н. Закладной, О.А. Закладной – К.: Издательство «Либра», 2012. – 185 с.: ил.

23. Кузнецов В.Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В.Г. Кузнецов, Э.Г. Куренный, А.П. Лютый – Донецк: Донбасс, 2005. – 249 с.: ил.
24. Руководство по компенсации реактивной мощности с учетом влияния гармоник. – Техническая коллекция *Schneider Electric*, вып. 21, 2008. – 32 с.
25. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение. – Техническая коллекция *Schneider Electric*, вып. 22, 2008. – 32 с.
26. Измерение и устранение гармоник. – Техническая коллекция *Schneider Electric*, вып. 30, 2009. – 48 с.
27. 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.
28. 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.
29. Коваль А.А. Система управления активным параллельным фильтром электроэнергии, адаптированная к электроприводу постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Коваль Алексей Анатольевич. – Липецк, 2006. – 154 с.
30. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 10 с.
31. IEEE 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Systems. – IEEE, 2014. – 112 с.
32. Лютаевич А.Г. Повышение качества электроэнергии в распределительных сетях за счет снижения несинусоидальности кривой

напряжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Люতারевич Александр Геннадьевич. – Омск, 2009. – 111 с.

33. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / Под ред. Крутякова Е.А. СПб: «Электросила», 2003. – 172 с.

34. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. - Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. - 425 с.

35. Modern active and traditional passive filters / H. Akagi // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. – 2006, vol. 54, no. 3. – p. 255-269.

36. Using active filters to reduce THD in traction systems / I. Zamora, P. Egura, A.J. Mazon, E. Torres, K.J. Sagastabeitia // Department of Electrical Engineering University of the Basque Country.

37. Optimal planning of large passive-harmonic filters set at high voltage level / Chih-Ju Chou, Chih-Wen Liu, June-Yown Lee, Kune-Da Lee // IEEE Transactions on power system. – 2000, vol. 15, no. 1. – p. 433-441.

38. Parallel combination of passive and hybrid power filters for harmonic mitigation / M. Gholamrezaei, M.A.S. Masoum, M. Kalantar // 18th International power system conference. – p. 7-15.

39. A review of active filters for power quality improvement / Bhim Singh, Kamal Al-Haddad, Ambrish Chandra // IEEE transactions on industrial electronics. – 1999, vol. 46, no. 5. – p. 960-971.

40. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибочного 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.

41. Измерение показателей качества электроэнергии в промышленных сетях с нелинейными потребителями. / Д.Н. Коржов // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвузовский сборник статей. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014.

42. Особенности моделирования динамических процессов в установке индукционного нагрева при помощи программного пакета Matlab 7 / Д.Н. Коржов// Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы X Международной научно-практической конференции / под ред. Горохова А. А. – Курск: ЮЗГУ, 2013. – С. 142-148.

43. ГОСТ 30804.4.30—2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2013. – 8 с.

44. ГОСТ 30804.4.7—2013 (IEC 61000-4-7:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – М.: Стандартинформ, 2013. – 14 с.

45. Методика применения прибора «Энергомонитор – 3.3 Т1». – СПб.: НПП Марс-Энерго, 2009. – 32 с.

46. Приборы для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор – 3.3 Т1». Руководство по эксплуатации. – СПб.: НПП Марс-Энерго, 2010. – 134 с.

47. Трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии Chavin Arnoux SA 8335. Руководство по эксплуатации. – Chavin Arnoux. – 73 с.

48. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для ВУЗов.— М.: Энергоатомиздат, 1989, — 592 с: ил.

49. Оценка электрических параметров нагрузки установки высокочастотного индукционного нагрева/ М. А. Авербух, Д.Н. Коржов // Управление и информатика в технических системах: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Б.П. Соустина / составитель С. В. Ченцов. – Красноярск: ИКИТ СФУ, 2013. – С. 64-68.

50. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613018 Расчет углов управления преобразователя частоты установки

индукционного нагрева стальных труб / Д.Н. Коржов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – 2015610483; заявл. 03.02.15; опубл. 02.03.2015.

51. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.

52. Герман_Галкин С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab_Simulink: Учебник. — СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 448 с.: ил.

53. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Москаленко. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.

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

55. Оценка высших гармоник в сетях с частотным крановым электроприводом / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов, Д. С. Лимаров // – Энергетик. – 2015. - №5. - с. 48-54. – ISSN 0013-7278.

56. Повышение качества электрической энергии в сетях Приобского месторождения ООО «РН-Юганскнефтегаз» с помощью параллельных активных фильтров / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Бурчевский, А.А. Вырва, Р.А. Ульбаев, В.В. Полищук // – Промышленная энергетика, 2011, №6. - с. 49-53.

57. Промышленные испытания активного фильтра в промышленных сетях ОАО «Оренбургнефть ТНК-ВР» / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, А.В. Медведев, В.В. Старостин, Е.Н. Аболемов, В.В. Полищук // – Промышленная энергетика, 2008, №10. - с. 42-46.

58. Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети / А.Б. Лоскутов, Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, А.А. Кралин // - Промышленная энергетика, 2013, №10. - с. 40-44.

59. Боярская Н.П. Совершенствование методов компенсации высших гармоник в электрических сетях 0,4-10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Боярская Наталия Петровна. – Красноярск, 2011. – 134 с.
60. A new fuzzy logic strategy for active power filter / A. Dell'Aquila, G. Delvino, M. Liserre, P. Zanchetta // Politecnico di Bari. - p. 392-397.
61. Hybrid active power filter using fuzzy dividing frequency control method / V. Bindu, I. SaiRam, K.K. Vasishta Kumar // International journal of advances in engineering & technology. – 2012, vol. 2. – p. 426-432.
62. Frequency response analysis of current controllers for selective harmonic compensation in active power filters / Cristian Lascu, Lucian Asiminoaei, Ion Boldea, Frede Blaabjerg // IEEE transactions on industrial electronics. – 2009, vol. 56, no. 2. – p. 337-347.
63. A matlab-simulink approach to shunt active power filters / George Adam, Alina G. Stan, Gheorghe Livint // Department of Electrical Engineering Technical University of Iasi.
64. Extraction and compensation of dominate harmonics in high power hybrid active power filters for HVDC applications / 5th WSEAS International conference on applications of electrical engineering. – 2006. – p. 181-186.
65. Frequency-domain harmonic analysis methods / S. Mark Halpin, Paulo F. Ribeiro, J.J. Dai // Mississippi State University.
66. Instantaneous power theory based active power filter: a Matlab/Simulink Approach / Moinuddin K. Syed, Dr Bv Sanker Ram. – Journal of theoretical and applied information technology. – 2008. – p. 536-541.
67. Advanced control of active rectifier using switch function and fuzzy logic for nonlinear behavior compensation / Saidah, M. Hery Purnomo, M. Ashari. – Journal of theoretical and applied information technology. – 2012. – p. 156-161.
68. Темербаев С.А. Гибридные фильтрокомпенсирующие устройства для управления качеством электроэнергии в распределительных сетях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Темербаев Сергей Андреевич. – Красноярск, 2013. – 19 с.

69. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления: Монография. – Смоленск: Смоленский филиал АНО ВПО ЦС РФ "Российский университет кооперации", 2013. – 153 с.: ил.

70. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.: ил.

71. Шевчук А.П. Повышение эффективности группового регулирования напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий в условиях территориально рассредоточенных электропотребителей.: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Шевчук Антон Павлович. – Санкт-Петербург, 2014. – 123 с.

72. Динамика электропривода с нечетким регулятором / С.В. Ланграф, А.И. Сапожников, А.С. Глазырин, Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев // - Известия Томского политехнического университета, 2010, № 4. – с. 168-173.

73. Алгоритм синтеза адаптивного нечеткого регулятора / В.В. Соловьев // - Известия ЮФУ. Технические науки, 2013, №1. – с. 161-165.

74. Синтез нечетких регуляторов / Д.А. Белоглазов, И.С. Коберси, В.И. Финаев// - Известия ЮФУ. Технические науки, 2010, №2. – с. 92-98.

75. Сравнение ПИД и нечеткого регулятора в задачах контроля уровня нефти / И.С. Коберси, С. Абдулмалик, В.В. Игнатъев // - Известия ЮФУ. Технические науки, 2013, №2. – с. 253-260.

76. Гибридный фильтр в системах электроснабжения промышленных предприятий с установками индукционного нагрева / М. А. Авербух, Д.Н. Коржов // - Научное обозрение: теория и практика. – 2015. - №3. – С. 54-56. - ISSN 2226-0226.

77. Особенности использования активного фильтра в узле нагрузки с нелинейным потребителем трубогибочного 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.

78. Юдин Д.А. Автоматизированная система управления вращающимися печами с применением технического зрения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Юдин Дмитрий Александрович. – Белгород, 2014. – 169 с.

79. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

80. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и FuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.

81. Интернет-источник <http://www.algoritm-tula.ru/catalog/silovaya-elektronika-danfoss/silovye-optsii/filtr-garmonik-ahf-005-i-ahf-010/>.

82. Кондратьев Д.Е. Трехфазные выпрямители с активной коррекцией коэффициента мощности и двунаправленной передачей энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / Кондратьев Дмитрий Евгеньевич. – Москва, 2008. – 167 с.

83. Интернет-источник http://esto.pro/comsys_adf/.

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

85. Интернет-источник <http://www.platan.ru/cgi-bin/qweryv.pl/0w31107.html>.

86. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиоаматор, 2008. – 972 с.

87. Положение о расчете эффективности, оформлении технико-экономических обоснований и отчетов реализации инвестиционных проектов в ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ». П 034-2015. - ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ», 2015.

88. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения / Шклярский Я.Э., Брагин А.А., Добуш В.С. // - Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, № 4. – с. 26-32.

89. Модели нечетких оценок для энергетических инвестиционных проектов / Н.А. Куликовская // - Известия ЮФУ. Технические науки, 2009, №5. – с. 127-133.

90. Экономическая оценка последствий снижения качества электроэнергии / В.А. Яшков, А.А. Конарбаева, Г.К. Кабдешова // - Промышленная энергетика, 2005, №2. - с. 44-45.

91. Приказ от 31 августа 2010 г. N 219-э/6 об утверждении методических указаний по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения). – Федеральная служба по тарифам, 2010.

Приложение 1. Программа и протоколы проведения измерений электрических параметров высокочастотного генератора трубогибочного стана УЗТМ-465

Программа измерений электрических параметров высокочастотного генератора трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465

1. Цель проведения измерений.

Целью проведения эксперимента является определение нижеприведенных показателей электромагнитной совместимости на низкой стороне трансформаторной подстанции ТП-22, запитывающей потребителей трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465:

- 1.1. Действующее значение напряжения.
- 1.2. Действующее значение тока.
- 1.3. Фазовый угол между напряжением и током первой гармоники одной фазы.
- 1.4. Активная электрическая мощность.
- 1.5. Реактивная электрическая мощность.
- 1.6. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения.
- 1.7. Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40.
- 1.8. Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока.
- 1.9. Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40.
- 1.10. Активная и реактивная электрическая мощность n-ой гармоники, n от 1 до 40.
- 1.11. Дополнительные параметры: действующие значения напряжений на индукторе, входящем в состав установки высокочастотного индукционного нагрева; на выходе преобразователя частоты ТПЧ-800.

2. Место проведения экспериментов.

2.1. Показатели электромагнитной совместимости определяются на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ 1000/10 при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1». Подключение прибора осуществляется к трехфазной четырехпроводной сети.

2.2. Напряжение на индукторе определяется при подключении вольтметра к подводящим шинам индуктора.

2.3. Напряжение на выходе преобразователя частоты снимается с выходных зажимов шкафа управления ТПЧ-800.

3. Подготовительные работы.

3.1. Утвердить программу проведения измерений и обеспечить безопасность их проведения в цехе трубопроводного производства.

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

4. Порядок проведения измерений показателей электромагнитной совместимости на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ 1000/10 при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1».

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

4. Порядок проведения измерений показателей электромагнитной совместимости на низкой стороне понижающего трансформатора ТМЗ 1000/10 при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1».

4.1. Подключить питание и измерительные кабели к прибору «Энергомонитор - 3.3Т1» в соответствии со схемой рис. 1.

4.2. Снять питание с высокочастотного генератора при помощи автоматического выключателя QF 2 (см. рис. 1).

4.3. Выставить необходимые параметры регистрации и пределы измерений тока и напряжения на приборе «Энергомонитор - 3.3Т1».

4.4. Подключить токоизмерительные клещи и входы по напряжению ко вторичной обмотке измерительных трансформаторов ТА1 - ТА3 (см. рис.1).

4.5. Подать питание на высокочастотный генератор (включить QF2).

4.6. Активировать режим регистрации параметров электрической сети (ток, напряжение, мощность) и показателей электромагнитной совместимости в течение суток.

4.7. По окончании времени регистрации обесточить генератор и отсоединить прибор от их вторичных обмоток.

5. Порядок определения напряжения на индукторе и на выходе преобразователя частоты ТПЧ-800.

5.1. Выставить требуемые пределы измерения на цифровом мультиметре.

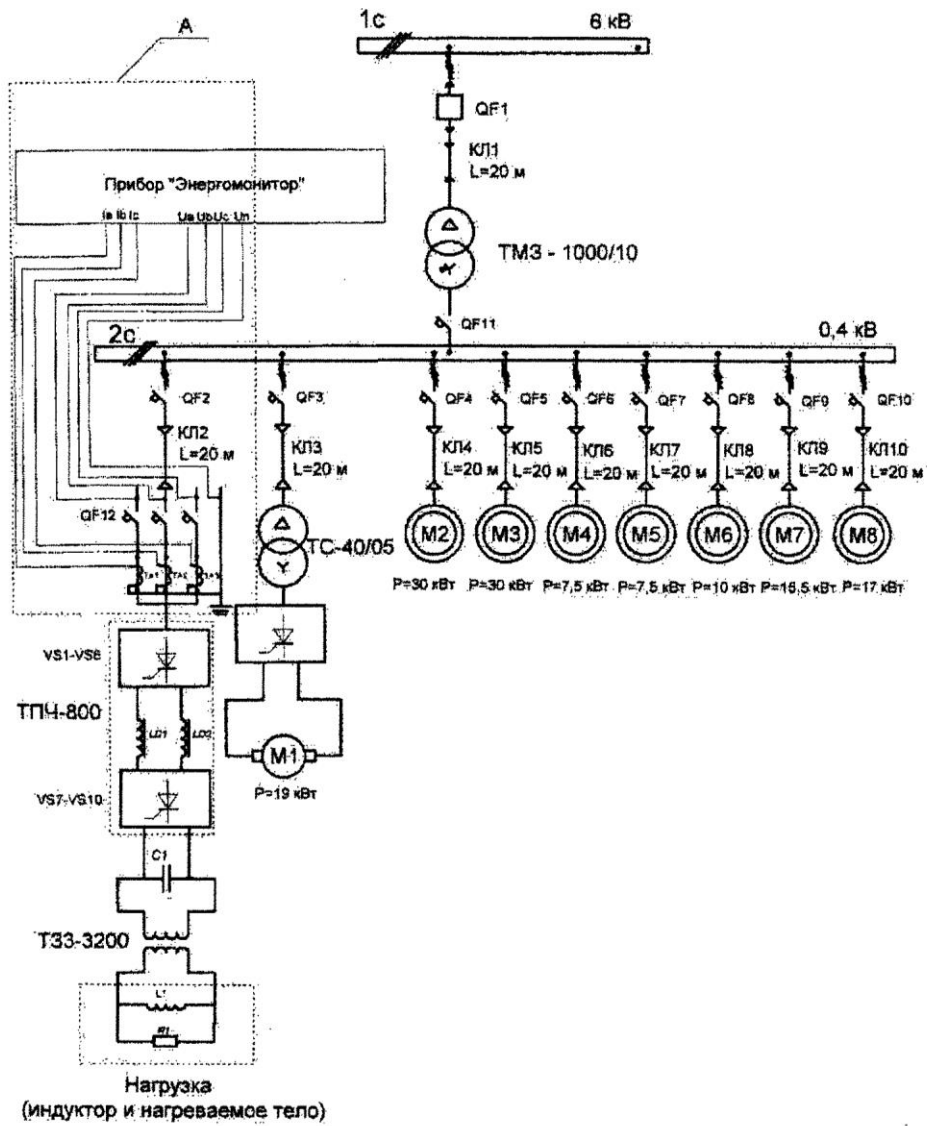
5.2. Соединить щупы мультиметра с токоведущими шинами, примыкающими к индуктору, а затем с выходными клеммами шкафа управления ТПЧ-800 (см. рис. 2). Зафиксировать показания прибора.

Примечание: вышеуказанные измерения следует провести при гибке труб с различными диаметрами и толщинами стенок.

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

В формулах, отмеченных знаком *, используются следующие величины: X - измеренное значение напряжения, k - значение единицы младшего разряда на данном пределе измерения, I - измеренное значение тока, U - измеренное значение напряжения, P - измеренное значение мощности.

№ п/п	Наименование		Погрешность измерения	Обозначение	Предел измерения
1	Мультиметр цифровой АРРА-9911		$\pm (0,013 \cdot U + 5 \cdot k), \%*$	V	1000 В
2	Измерительный прибор «Энергомонитор 3.3Т1»	Ток, А	$\pm (1 + 0,05 \cdot (\frac{5}{I} - 1)), \%*$	-	7,5
		Напряжение U , В	$\pm (0,1 + 0,01 \cdot (\frac{415}{U} - 1)), \%*$		622,5
		Фазовый угол $\angle \rho$, градус	$\pm 0,5$		360
		Активная мощность P , Вт	$\pm (2 + 0,1 \cdot (\frac{2075}{P} - 1)), \%*$		3735
		Реактивная мощность Q , вар	$\pm 4\%$		3735
		Коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, n от 2 до 40 $K_{um}, \%$	$\pm 5\%$		49,9
		Коэффициент n -ой гармонической составляющей тока, n от 2 до 40 $K_{Im}, \%$	$\pm 10\%$		49,9
		Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $K_u, \%$	$\pm 5\%$		49,9
		Активная электрическая мощность n -ой гармоники, n от 1 до 40 P_m Вт	$\pm 10\%$		207,5
		Коэффициент искажения синусоидальности кривой тока $K_i, \%$	$\pm 10\%$		49,9



A

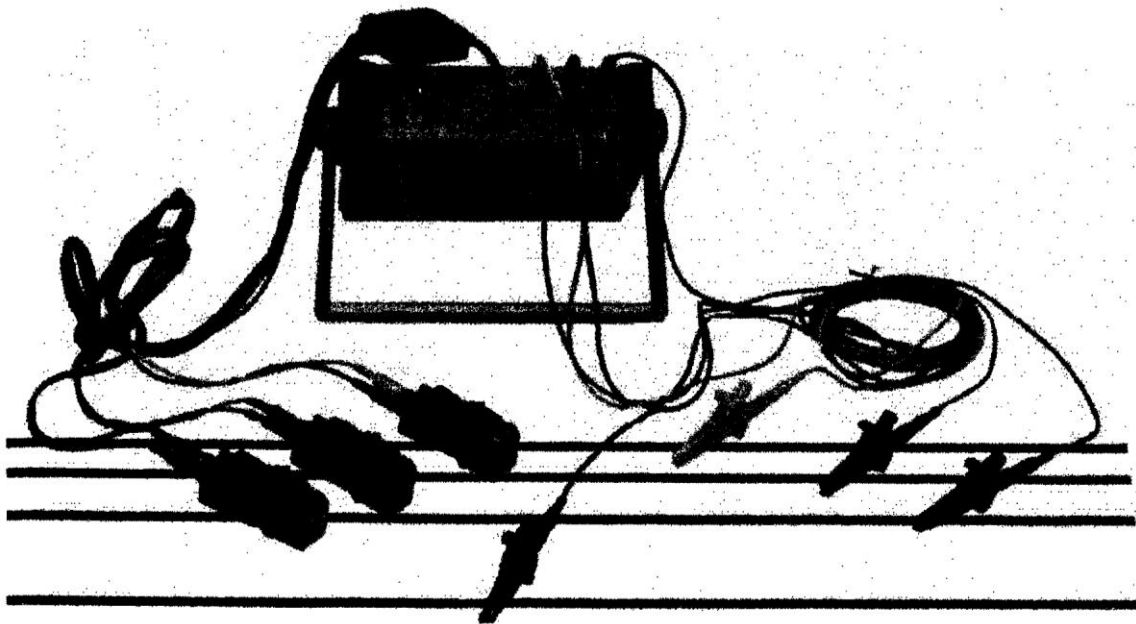


Рис. 1. Схема подключения прибора «Энергомонитор 3.3Т1».

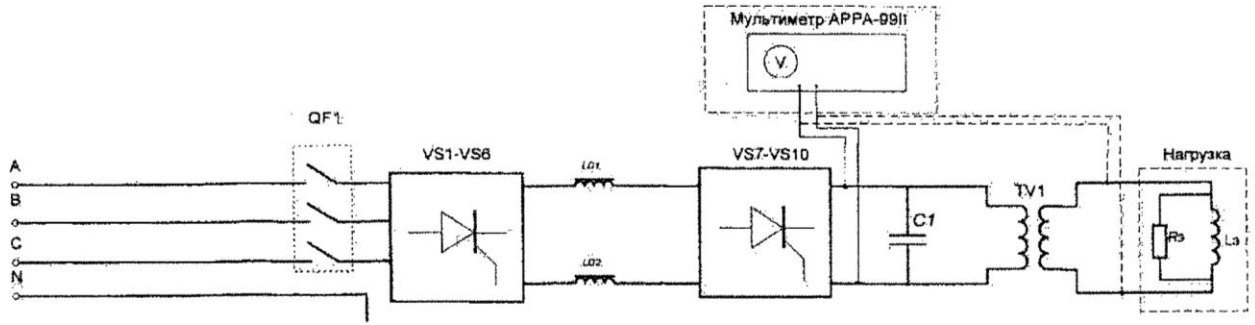


Рис. 2. Схема измерения напряжения на выходе преобразователя частоты ТПЧ-800 и на индукторе

Программу разработал:

аспирант БГТУ им. В.Г. Шухова

Коржов Д.Н.

Научный руководитель:

д.т.н., профессор кафедры

Электроэнергетики и автоматики

Авербух М.А.

Согласовано:

Главный энергетик

ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.



Протокол №1

измерений активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического состава тока и напряжения на входе преобразователя частоты
ТПЧ-800

Дата проведения измерений: 30 ноября 2013 года.

Место проведения измерений: ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ», Производство соединительных элементов трубопроводов, участок гибки труб.

Параметры изгибаемой трубы: диаметр 530 мм, толщина стенки 25 мм, марка стали 15Х1М1Ф.

Перечень приборов, их характеристики и схемы подключения приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с временным шагом в одну минуту.

Результаты измерений.

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

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	2,17	0,4	0,35	0,26	21,13	0,09	12,28	0,12	0,2	0,14
2	2,01	0,36	0,37	0,25	21,15	0,07	12,33	0,09	0,21	0,14
3	1,92	0,33	0,39	0,26	21,13	0,09	12,43	0,1	0,22	0,15
4	1,94	0,35	0,38	0,28	21,05	0,07	12,47	0,09	0,21	0,12
5	1,94	0,38	0,38	0,28	21,03	0,09	12,49	0,08	0,19	0,13
6	1,9	0,32	0,34	0,3	21,05	0,08	12,52	0,09	0,18	0,13
7	1,89	0,31	0,4	0,28	21,04	0,09	12,53	0,09	0,23	0,14
8	1,88	0,34	0,39	0,29	21,02	0,08	12,53	0,08	0,22	0,13
9	1,87	0,3	0,41	0,3	21,04	0,09	12,54	0,1	0,21	0,15
10	1,87	0,29	0,36	0,28	21,05	0,07	12,57	0,08	0,21	0,14
11	1,86	0,27	0,32	0,28	21,06	0,07	12,56	0,1	0,21	0,14
12	1,83	0,29	0,35	0,27	21,1	0,1	12,51	0,1	0,22	0,17
13	1,87	0,28	0,32	0,32	21,12	0,08	12,45	0,09	0,2	0,18
14	1,87	0,27	0,29	0,3	21,11	0,06	12,46	0,08	0,19	0,17
15	1,87	0,27	0,32	0,28	21,1	0,08	12,48	0,09	0,2	0,18
16	1,87	0,28	0,4	0,25	21,18	0,08	12,43	0,09	0,25	0,15
17	1,87	0,27	0,37	0,28	21,16	0,08	12,43	0,1	0,25	0,16
18	1,87	0,25	0,33	0,26	21,14	0,08	12,44	0,1	0,23	0,17
19	1,87	0,27	0,41	0,27	21,16	0,08	12,43	0,11	0,24	0,17
20	1,87	0,28	0,41	0,27	21,11	0,1	12,42	0,11	0,23	0,16
21	1,86	0,29	0,38	0,28	21,15	0,08	12,43	0,1	0,23	0,17
22	1,86	0,34	0,38	0,28	21,13	0,07	12,45	0,09	0,2	0,17
23	1,86	0,33	0,39	0,27	21,11	0,08	12,46	0,11	0,2	0,16
24	1,86	0,32	0,36	0,28	21,13	0,1	12,48	0,11	0,21	0,18
25	1,85	0,34	0,38	0,27	21,16	0,09	12,45	0,1	0,24	0,17
26	1,85	0,34	0,39	0,28	21,16	0,1	12,45	0,1	0,23	0,17

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

№ п/п	$K_{IA(11)},$ %	$K_{IA(12)},$ %	$K_{IA(13)},$ %	$K_{IA(14)},$ %	$K_{IA(15)},$ %	$K_{IA(16)},$ %	$K_{IA(17)},$ %	$K_{IA(18)},$ %	$K_{IA(19)},$ %	$K_{IA(20)},$ %
1	8,21	0,09	6,38	0,12	0,19	0,17	4,63	0,08	3,77	0,15
2	8,29	0,1	6,43	0,08	0,21	0,12	4,72	0,09	3,85	0,07
3	8,34	0,09	6,5	0,08	0,22	0,12	4,81	0,09	3,93	0,09
4	8,35	0,09	6,52	0,08	0,21	0,12	4,81	0,09	3,92	0,08
5	8,32	0,1	6,53	0,07	0,21	0,11	4,79	0,09	3,92	0,08
6	8,36	0,1	6,56	0,08	0,19	0,1	4,83	0,1	3,98	0,08
7	8,39	0,09	6,54	0,1	0,21	0,13	4,86	0,1	3,97	0,08
8	8,39	0,09	6,55	0,13	0,22	0,12	4,86	0,08	3,98	0,07
9	8,41	0,11	6,54	0,22	0,23	0,13	4,88	0,11	3,97	0,08
10	8,39	0,09	6,57	0,34	0,2	0,12	4,87	0,07	3,99	0,07
11	8,39	0,11	6,57	0,29	0,19	0,11	4,84	0,09	3,99	0,08
12	8,39	0,09	6,55	0,22	0,2	0,14	4,86	0,1	3,98	0,08
13	8,32	0,1	6,53	0,19	0,18	0,15	4,8	0,11	3,96	0,08
14	8,33	0,09	6,56	0,23	0,18	0,16	4,8	0,09	4,01	0,07
15	8,34	0,1	6,55	0,16	0,19	0,14	4,8	0,1	4	0,07
16	8,38	0,06	6,53	0,14	0,23	0,13	4,86	0,08	3,96	0,07
17	8,35	0,08	6,53	0,44	0,24	0,13	4,82	0,09	3,97	0,07
18	8,34	0,08	6,55	0,54	0,2	0,14	4,83	0,08	3,98	0,08
19	8,37	0,11	6,53	0,58	0,23	0,15	4,82	0,09	3,96	0,09
20	8,36	0,09	6,54	0,58	0,22	0,14	4,82	0,09	3,97	0,09
21	8,37	0,09	6,54	0,56	0,22	0,14	4,83	0,09	3,97	0,08
22	8,36	0,1	6,54	0,55	0,21	0,14	4,83	0,09	3,98	0,06
23	8,35	0,1	6,53	0,57	0,2	0,13	4,82	0,12	3,96	0,08
24	8,35	0,1	6,54	0,58	0,2	0,16	4,83	0,12	3,98	0,11
25	8,39	0,1	6,54	0,57	0,23	0,13	4,88	0,11	3,98	0,09
26	8,39	0,1	6,55	0,37	0,22	0,15	4,86	0,11	3,99	0,1

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

№ п/п	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	5,47	5,48	5,61	27,66	27,32	27,79	236,38	234,87	236,35
2	5,04	5,02	5,16	27,7	27,36	27,83	236,76	235,22	236,8
3	4,84	4,82	4,95	27,83	27,47	27,95	237,37	235,55	237,34
4	4,88	4,89	4,98	27,79	27,46	27,93	237,49	235,7	237,39
5	4,92	5,03	5,03	27,77	27,41	27,94	237,33	235,79	237,23
6	4,88	4,96	5,01	27,85	27,48	28	237,36	235,93	237,26
7	4,88	4,95	5	27,87	27,48	28,03	236,62	235,21	236,61
8	4,87	4,9	4,97	27,86	27,51	28,03	236,86	235,45	236,85
9	4,87	4,93	4,98	27,89	27,52	28,04	236,83	235,37	236,82
10	4,87	4,93	4,99	27,91	27,53	28,03	236,41	235	236,31
11	4,86	4,92	4,99	27,9	27,51	28,03	235,97	234,48	235,82
12	4,84	4,86	4,95	27,92	27,54	28,04	236,1	234,62	236,01
13	4,98	5	5,08	27,85	27,53	27,97	235,97	234,49	235,91
14	5,01	5	5,1	27,87	27,55	27,98	235,36	234	235,29
15	5	5	5,08	27,86	27,55	27,95	235,24	233,95	235,18
16	4,97	4,97	5,1	27,92	27,54	27,99	235,04	233,71	235,09
17	4,99	5,01	5,14	27,89	27,54	27,99	234,79	233,62	234,88
18	4,97	4,98	5,12	27,89	27,54	28	234,87	233,38	234,85
19	4,98	4,97	5,14	27,9	27,53	27,98	234,75	233	234,74
20	4,99	4,98	5,12	27,85	27,54	27,96	235,02	233,29	235,02
21	4,96	4,96	5,08	27,9	27,59	27,99	235,85	234,45	235,88
22	4,97	4,97	5,09	27,89	27,59	27,99	235,68	234,33	235,7
23	5,01	5	5,14	27,86	27,57	27,96	235,12	233,91	235,21
24	5	4,97	5,11	27,9	27,58	27,99	234,82	233,67	234,83
25	4,94	4,93	5,07	27,94	27,6	28,01	235,34	234,1	235,36
26	4,91	4,92	5,05	27,94	27,59	28,03	235,4	234,18	235,42

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

№ п/п	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
1	407,63	407,69	410,28	509,26	437,42	476,72	156,44	143,42	136,88
2	408,22	408,39	411,03	473,58	406,55	443,18	144,92	132,56	127
3	408,99	409,05	412,17	452,39	387,81	423,22	138,51	126,36	121,55
4	409,28	409,19	412,28	457,13	391,96	427,62	140,06	127,81	122,78
5	409,29	409,21	411,86	458,82	393,99	429,35	140,59	128,42	123,1
6	409,47	409,39	411,84	449,57	386,15	420,63	137,36	125,5	120,03
7	408,16	408,24	410,65	445,53	382,74	417,03	136,21	124,4	119,1
8	408,58	408,64	411,08	443,22	380,77	414,8	135,38	123,72	118,44
9	408,47	408,54	411,05	441,48	379,21	413,3	134,7	123,06	117,89
10	407,85	407,76	410,18	440,32	378,28	411,96	134,35	122,76	117,42
11	407,03	406,85	409,41	437,71	375,9	409,37	133,71	121,99	116,83
12	407,24	407,15	409,68	429,47	368,82	401,7	131,51	119,76	114,99
13	406,99	406,95	409,51	439,88	377,54	411,56	134,57	122,54	117,64
14	406,08	406,04	408,37	438,11	376,19	409,9	134,02	122,14	117,2
15	405,95	405,92	408,14	436,55	374,99	408,53	133,74	121,89	116,91
16	405,5	405,65	407,93	436,55	375,03	408,67	133,51	121,66	116,82
17	405,22	405,45	407,46	436,92	375,62	409,12	133,52	121,68	116,77
18	405,06	405,09	407,65	437,14	375,17	408,96	133,54	121,5	116,81
19	404,55	404,59	407,6	437,44	374,85	409,14	133,59	121,49	117,03
20	405,03	405,1	408,06	436,52	374,05	408,29	133,3	121,35	116,93
21	406,84	406,95	409,36	435,5	373,97	407,66	132,9	121,09	116,4
22	406,6	406,7	409,02	435,52	374,05	407,54	132,63	121	116,17
23	405,76	405,98	408,05	435,6	374,3	407,63	132,43	121,03	116,04
24	405,36	405,41	407,41	434,95	373,96	406,91	132,4	120,89	115,88
25	406,15	406,24	408,36	434,36	373,38	406,5	132,23	120,61	115,75
26	406,28	406,35	408,46	433,84	372,97	405,95	132,13	120,47	115,71

Примечание: измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 300$.

В таблицах № 1-4 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ – амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I – коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ – фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ – линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ – активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ – реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Измерения выполнили:

Инженер-конструктор
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корзов Д.Н.

Ведущий инженер-электроник
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корниенко В.И.

Согласовано:

Главный энергетик
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.

Научный руководитель

д.т.н., профессор Авербух М.А.



Протокол № 2

измерений активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического
состава тока и напряжения на входе преобразователя частоты
ТПЧ-800

Дата проведения измерений: 5 октября 2013 года.

Место проведения измерений: ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ»,
Производство соединительных элементов трубопроводов, участок гибки
труб.

Параметры изгибаемой трубы: диаметр 219 мм, толщина стенки 13 мм,
марка стали Ст 20.

Перечень приборов, их характеристики и схемы подключения
приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с
временным шагом в одну минуту.

Результаты измерений.

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

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	2,4	3,7	1,17	1,91	20,09	0,46	10,47	2,3	0,89	1,91
2	2,22	5,19	1,04	2,45	20,9	0,31	10,96	3,34	0,93	2,78
3	2,18	4,88	0,95	2,38	21,31	0,27	11,25	3,29	0,88	2,81
4	2,17	4,57	0,97	2,17	21,39	0,27	11,32	3,08	0,92	2,59
5	2,18	4,69	1,01	2,3	21,33	0,29	11,32	3,18	0,96	2,72
6	2,18	4,65	1,01	2,33	21,33	0,27	11,3	3,15	0,94	2,72

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

№ п/п	$K_{IA(11)}$, %	$K_{IA(12)}$, %	$K_{IA(13)}$, %	$K_{IA(14)}$, %	$K_{IA(15)}$, %	$K_{IA(16)}$, %	$K_{IA(17)}$, %	$K_{IA(18)}$, %	$K_{IA(19)}$, %	$K_{IA(20)}$, %
1	6,09	0,58	4,44	1,55	0,66	1,5	2,51	0,61	1,96	1,03
2	6,74	0,41	5,13	2,5	0,76	2,33	2,91	0,54	2,6	1,68
3	7,34	0,37	5,64	2,66	0,73	2,56	3,6	0,78	3,21	2
4	7,48	0,36	5,8	2,51	0,76	2,41	3,72	0,81	3,36	1,93
5	7,39	0,4	5,77	2,6	0,79	2,54	3,66	0,84	3,33	1,98
6	7,42	0,4	5,76	2,56	0,79	2,52	3,66	0,78	3,32	1,94

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

№ п/п	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	7,23	7,09	7,3	25,32	25,15	26,44	229,49	228,01	230,1
2	7,06	6,9	7,06	27,19	27,28	27,89	229,86	228,49	230,44
3	7,55	7,35	7,55	28,25	28,36	28,85	229,09	227,81	229,7
4	7,62	7,43	7,62	28,39	28,47	29,01	229,03	227,65	229,57
5	7,7	7,52	7,68	28,48	28,56	29,15	229,17	227,7	229,76
6	7,55	7,34	7,5	28,37	28,49	29,05	229,05	227,51	229,62

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

№ п/п	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
1	395,43	396,43	399,09	355,95	266,52	284,8	455,64	432,66	403,38
2	396,22	397,18	399,61	347,86	265,76	284,97	405,09	383,53	357,96
3	394,96	395,99	398,26	344,28	263,83	283,21	394,27	373,03	347,99
4	394,78	395,68	398,12	344,45	263,89	282,91	392,57	371,66	346,55
5	394,9	395,87	398,47	345,21	264,07	283,09	392,76	371,98	346,87
6	394,64	395,57	398,28	345,71	264,44	283,52	392,89	372	347,08

Примечание: измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 300$.

В таблицах № 1-4 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ – амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I – коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ – фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ – линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ – активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ – реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Измерения выполнили:

Инженер-конструктор
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»



Корзов Д.Н.

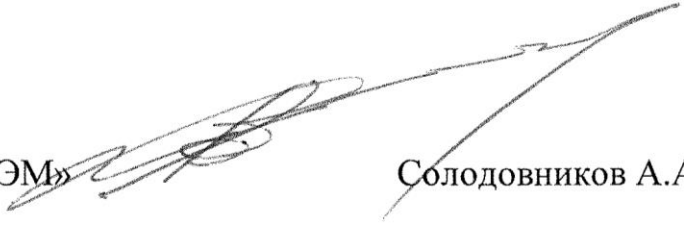
Ведущий инженер-электроник
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»



Корниенко В.И.

Согласовано:

Главный энергетик
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»



Солодовников А.А.

Научный руководитель



д.т.н., профессор Авербух М.А.



Протокол №3

измерений активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического состава тока и напряжения на входе преобразователя частоты ТПЧ-800

Дата проведения измерений: 14 октября 2013 года.

Место проведения измерений: ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ», Производство соединительных элементов трубопроводов, участок гибки труб.

Параметры изгибаемой трубы: диаметр 273 мм, толщина стенки 24 мм, марка стали 09Г2С.

Перечень приборов, их характеристики и схемы подключения приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с временным шагом в одну минуту.

Результаты измерений.

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

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	2,43	8,06	1,44	4,39	17,01	0,91	8,2	4,18	0,96	3,07
2	2,14	3,3	1,4	2,06	19,48	0,66	10,45	1,78	0,98	1,89
3	2,04	2,44	1,47	1,71	20,02	0,57	10,95	1,44	1,15	1,72
4	2	2,49	1,75	1,77	20,03	0,68	11,04	1,49	1,47	1,78
5	1,98	2,02	1,77	1,4	20,23	0,67	11,03	1,3	1,34	1,53
6	1,97	3,44	1,96	2,16	20,12	0,87	10,77	2,06	1,44	2,26
7	1,96	2,93	2,02	1,93	20,2	0,95	10,96	1,69	1,67	2,14
8	1,96	2,55	2,36	1,86	20,19	0,93	11,26	1,67	1,95	2,12
9	1,92	2,35	0,82	1,82	21,46	1,06	10,25	1,25	0,82	1,98
10	1,94	3,69	1,15	2,39	20,52	1,17	10,38	1,95	1,02	2,48
11	1,95	3,08	1,74	1,93	20,08	0,91	10,72	1,71	1,41	2,01

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

№ п/п	$K_{IA(11)}$, %	$K_{IA(12)}$, %	$K_{IA(13)}$, %	$K_{IA(14)}$, %	$K_{IA(15)}$, %	$K_{IA(16)}$, %	$K_{IA(17)}$, %	$K_{IA(18)}$, %	$K_{IA(19)}$, %	$K_{IA(20)}$, %
1	3,25	0,93	2,37	1,81	1,04	1,49	1,39	0,76	1,14	1,01
2	5,32	0,91	3,72	1	0,75	1,21	1,88	0,82	1,37	0,73
3	6,01	0,86	4,49	0,88	0,92	1,28	2,33	0,96	1,8	0,76
4	6,01	1,05	4,66	1,11	1,17	1,43	2,32	1,4	1,91	1,18
5	6,17	1,05	4,73	1,16	1,11	1,38	2,4	1,42	1,99	1,37
6	6,03	1,24	4,38	1,5	1,37	1,73	2,38	1,51	1,88	1,45
7	6,06	1,4	4,68	1,35	1,52	1,87	2,33	1,71	2,13	1,38
8	6,12	1,43	5,1	1,4	1,72	1,97	2,32	1,87	2,39	1,34
9	7	1,31	3,99	0,97	1,04	1,76	2,95	1,46	1,55	1,43
10	6,25	1,52	3,92	1,28	1,28	1,9	2,51	1,61	1,67	1,45
11	6,05	1,3	4,43	1,36	1,31	1,67	2,4	1,6	1,99	1,46

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

№ п/п	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	5,65	5,65	5,72	23,37	23,41	24,28	236,21	234,35	236,48
2	4,66	4,64	4,64	24,26	24,52	25,31	236,19	234,34	236,38
3	4,87	4,91	4,9	25,07	25,49	26,13	236,2	234,4	236,37
4	5,35	5,41	5,38	25,73	26,3	26,81	235,88	234,16	236,13
5	5,8	5,79	5,9	26,02	26,58	26,88	236,05	234,26	236,3
6	6,07	6,01	6,03	26,53	26,9	27,46	235,73	233,97	236,01
7	6,2	6,15	6,2	26,81	27,23	27,81	236,11	234,21	236,18
8	6,32	6,31	6,36	27,05	27,63	28,25	235,77	233,84	235,8
9	5,99	6,18	5,96	27,11	26,75	26,86	235,35	233,51	235,45
10	6,07	6,11	5,98	26,88	26,87	27,45	231,9	230,2	232,14
11	6	5,97	5,99	26,39	26,76	27,17	234,6	233,03	234,79

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

№ п/п	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
1	406,83	407,33	410,48	438,31	362,66	417,12	403,24	368,07	360,04
2	406,85	407,21	410,33	409,36	340,5	387,63	316,7	291,04	280,36
3	406,93	407,26	410,3	392,18	325,83	372,17	300,96	276,03	265,29
4	406,43	406,89	409,8	385,8	319,15	366,6	295,43	269,91	259,24
5	406,64	407,11	410,13	381,79	316,77	364,71	293,52	267,13	257,55
6	406,11	406,62	409,6	376,65	312,81	360,73	295,97	269,23	260,4
7	406,73	406,88	410,08	371,05	307,6	353,92	296,8	271,06	261,42
8	406,12	406,21	409,47	369,22	303,5	352,92	300,29	272,8	261,9
9	405,45	405,66	408,77	362,84	311,75	351,43	296,12	269,69	269,49
10	399,57	399,95	402,93	367,34	309,5	350,29	296,55	272,47	266,52
11	404,42	404,78	407,43	363,5	303,92	348,23	297,07	270,73	263,28

Примечание: измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 300$.

В таблицах № 1-4 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ – амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I – коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ – фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ – линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ – активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ – реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Измерения выполнили:

Инженер-конструктор
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Коржов Д.Н.

Ведущий инженер-электроник
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корниенко В.И.

Согласовано:

Главный энергетик
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.

Научный руководитель

д.т.н., профессор Авербух М.А.



Протокол №4

измерений активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического состава тока и напряжения на входе преобразователя частоты ТПЧ-800

Дата проведения измерений: 09 ноября 2013 года.

Место проведения измерений: ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ», Производство соединительных элементов трубопроводов, участок гибки труб.

Параметры изгибаемой трубы: диаметр 325 мм, толщина стенки 38 мм, марка стали Ст 20.

Перечень приборов, их характеристики и схемы подключения приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с временным шагом в три секунды.

Результаты измерений.

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

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	1,33	1,12	0,59	1,08	17,15	0,39	7,62	0,87	0,4	0,98
2	2,24	2,62	0,94	1,64	20,74	0,43	11,71	1,75	0,72	1,72
3	2,25	3,29	0,9	2,07	20,67	0,44	11,9	2,33	0,76	2,13
4	2,25	3,22	0,84	1,68	20,8	0,16	12,01	2,24	0,73	1,91
5	2,25	3,69	0,81	1,96	20,86	0,2	12,11	2,51	0,68	2,23
6	2,27	4,62	2,04	2,89	19,75	0,64	12,05	3,32	1,85	3,18
7	2,25	3,64	1	1,96	20,67	0,3	12,01	2,54	0,92	2,16
8	2,26	3,91	1,07	2,21	20,66	0,23	11,97	2,7	0,96	2,46
9	2,25	3,57	0,94	1,88	20,64	0,25	11,73	2,45	0,86	2,08
10	2,25	3,78	1,03	2,18	20,44	0,34	11,33	2,57	0,86	2,29
11	2,26	3,96	1,32	2,43	20,17	0,45	11,32	2,55	0,99	2,46
12	2,25	4,41	0,9	2,33	20,57	0,56	11,09	2,8	0,71	2,47
13	2,25	2,8	1,36	1,66	20,53	0,35	11,34	1,81	1,12	1,66
14	2,25	3,25	1,55	1,56	21	0,33	11,51	2,16	1,11	1,73
15	2,24	2,2	0,56	1,04	20,75	0,42	11,07	1,27	0,53	1,16
16	2,25	2,02	0,78	0,71	20,75	0,35	11,39	1,23	0,7	0,66
17	2,24	3,37	0,39	1,43	20,87	0,4	11,16	2,2	0,35	1,55
18	2,24	2,94	0,67	1,62	20,67	0,36	11,36	1,76	0,53	1,66
19	2,24	3,04	0,5	1,64	20,71	0,43	11,29	1,98	0,39	1,61
20	2,25	3,76	1,03	2,25	20,42	0,41	11,54	2,52	0,81	2,34
21	2,24	2,62	0,83	1,24	20,54	0,35	11,66	1,76	0,7	1,3
22	2,24	2,88	1,33	1,61	20	0,42	11,9	2,06	1,22	1,63
23	2,25	2,06	1,69	1,17	19,89	0,28	12,28	1,43	1,56	1,2
24	2,24	2,31	1,69	1,49	19,9	0,32	12,3	1,79	1,53	1,45
25	2,22	1,71	0,71	1,01	20,35	0,42	11,91	1,24	0,63	1,04
26	2,22	1,3	1,46	0,85	19,97	0,18	12,31	0,94	1,35	0,85

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

№ п/п	$K_{IA(11)},$ %	$K_{IA(12)},$ %	$K_{IA(13)},$ %	$K_{IA(14)},$ %	$K_{IA(15)},$ %	$K_{IA(16)},$ %	$K_{IA(17)},$ %	$K_{IA(18)},$ %	$K_{IA(19)},$ %	$K_{IA(20)},$ %
1	4,92	0,51	3,7	0,63	0,43	0,91	2,37	0,68	1,96	0,49
2	7,24	0,58	5,56	1,29	0,62	1,45	3,47	0,61	2,92	0,86
3	7,25	0,47	5,81	1,85	0,69	1,82	3,48	0,5	3,2	1,38
4	7,47	0,25	6,02	1,84	0,62	1,72	3,77	0,91	3,43	1,42
5	7,58	0,31	6,16	2,08	0,59	2,1	3,9	1,35	3,55	1,65
6	6,24	0,72	5,65	2,64	1,53	2,86	2,53	1,75	2,66	1,96
7	7,26	0,41	6,01	2,21	0,8	2,01	3,55	1,85	3,37	1,77
8	7,26	0,38	5,98	2,16	0,79	2,23	3,59	1,5	3,37	1,6
9	7,02	0,31	5,67	1,95	0,75	1,81	3,26	0,51	3,02	1,38
10	6,59	0,5	5,08	1,88	0,71	1,81	2,79	0,53	2,41	1,22
11	6,41	0,63	4,97	1,74	0,67	1,86	2,76	0,58	2,23	1,07
12	6,68	0,84	4,8	2,05	0,5	1,94	2,95	0,87	2,11	1,37
13	6,8	0,62	5,05	1,47	0,93	1,29	3,08	0,81	2,3	1,21
14	7,37	0,62	5,65	1,78	0,95	1,56	3,6	0,79	3,11	1,5
15	6,82	0,63	4,84	0,88	0,65	0,96	3	0,73	2,21	0,65
16	6,93	0,49	5,3	0,97	0,65	0,58	3,03	0,59	2,61	0,73
17	6,97	0,62	4,94	1,69	0,41	1,19	3,02	0,7	2,3	1,17
18	6,94	0,53	5,09	1,18	0,41	1,31	3,13	0,53	2,36	0,72
19	6,94	0,6	5,01	1,44	0,41	1,2	3,03	0,62	2,35	0,94
20	6,8	0,67	5,18	1,89	0,56	1,92	3,03	0,72	2,42	1,29
21	6,93	0,43	5,4	1,48	0,65	1,09	3,03	0,45	2,66	1,1
22	6,5	0,69	5,54	1,65	1,12	1,35	2,68	0,75	2,8	1,26
23	6,6	0,31	5,97	1,16	1,43	1	2,83	0,3	3,18	0,9
24	6,62	0,45	5,89	1,54	1,35	1,19	2,86	0,49	3,06	1,23
25	6,97	0,51	5,49	1,02	0,64	0,93	3,08	0,56	2,73	0,8
26	6,82	0,19	5,92	0,82	1,19	0,75	3,05	0,19	3,07	0,68

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

№ п/п	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	4,27	4,11	4,03	20,61	20,68	21,04	230,93	229,5	231,3
2	6	6,09	6,1	26,66	26,82	27,94	229,06	227,61	229,57
3	6,27	6,26	6,18	27,14	27,54	28	228,96	227,53	229,38
4	6,4	6,48	6,34	27,34	27,7	28,11	229,2	227,71	229,54
5	7,19	7,26	7,15	28,25	28,73	29,13	229,02	227,55	229,37
6	7,25	7,64	7,39	28	28,86	29,75	229,44	228,04	230
7	7,48	7,62	7,08	28,34	28,95	28,96	229,75	228,35	230,19
8	6,82	6,77	6,71	27,59	28,17	28,35	229,43	227,98	229,78
9	6,23	6,34	6,18	26,84	27,2	27,76	229,05	227,55	229,36
10	6,05	6,17	6,14	26,26	26,47	27,43	229,12	227,64	229,37
11	6,15	6,1	6,26	26,05	26,65	27,56	228,87	227,41	229,33
12	6,12	6,04	6,02	26,4	26,58	27,28	228,81	227,33	229,15
13	6,26	6,39	6,79	26,21	26,3	27,84	229,02	227,7	229,47
14	7,35	7,29	7,14	27,51	28,21	27,86	229,49	228,12	229,81
15	6,02	5,87	5,96	25,77	25,94	26,33	229,69	228,23	229,88
16	5,92	5,98	6,11	25,9	26	27,16	229,3	227,84	229,5
17	5,78	5,86	5,81	26,17	26,07	27,06	229,15	227,64	229,35
18	5,78	5,79	5,64	26,01	26,14	26,91	229,41	227,94	229,64
19	5,73	5,61	5,71	26,06	26,07	26,81	229,66	228,24	229,91
20	5,99	6,13	5,95	26,54	26,7	27,75	229,57	227,99	229,74
21	5,81	5,64	5,85	26,09	26,29	27,11	229,36	227,94	229,72
22	5,37	5,45	5,48	25,89	26,11	27,19	229,98	228,5	230,38
23	5,25	5,64	5,44	26,06	26,52	27,47	230,04	228,51	230,36
24	5,3	5,52	5,52	26,2	26,65	27,77	229,93	228,4	230,24
25	4,9	5,15	5,11	25,93	26,03	26,75	230,11	228,61	230,34
26	4,95	5,23	5,16	25,92	26,6	26,9	230,05	228,51	230,31

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

№ п/п	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
1	398,07	398,75	401,29	279,96	268,52	341,04	260,54	340,91	282,07
2	394,74	395,64	398,21	399,77	383,19	488,43	359,81	472,45	386,9
3	394,62	395,38	397,93	399,93	383,39	491,94	359,98	469,47	384,8
4	395,02	395,64	398,29	402,55	385,49	493,41	358,59	468,93	382,64
5	394,74	395,36	397,96	402,93	386,22	495,47	358,14	467,11	381,23
6	395,41	396,41	398,91	401,84	379,99	493,5	363,13	473,72	385,21
7	396,03	396,83	399,27	394,91	375,51	487,33	369,76	479,38	395,75
8	395,47	396,09	398,67	384,81	361,92	475,16	379,84	489,8	408,17
9	394,77	395,31	398	373,84	347,84	462,27	389,61	499,91	421,08
10	394,96	395,4	398,05	366,14	340,67	452,86	395,51	507,14	430,97
11	394,42	395,24	397,82	367,04	335,63	450,41	396,86	510,6	429,84
12	394,37	394,95	397,61	364,6	338,46	448,28	395,68	509,21	432,37
13	394,85	395,63	398,01	363,77	333,98	445,37	398,72	514,24	434,33
14	395,7	396,24	398,69	361,01	330,35	450,8	403,89	511,83	436,21
15	395,99	396,33	398,94	362,09	335,42	449,26	400,67	511,36	436,58
16	395,3	395,66	398,3	366,39	342,74	452,15	394,18	506,44	430,78
17	395,01	395,34	398,04	372,95	349,87	457,19	387,86	501,32	422,68
18	395,48	395,88	398,52	380,13	357,48	464,48	382,3	496,49	414,85
19	395,95	396,39	398,94	384,25	364,11	470,92	378,02	491,12	409,66
20	395,66	395,97	398,8	392,76	372,58	478,02	370,01	483,52	398,5
21	395,39	396,03	398,52	404,96	390,57	493,66	353,75	465,83	379
22	396,38	397,05	399,69	427,63	418,34	514,6	328,32	441,87	347,71
23	396,45	397,03	399,74	434,84	428,43	521,7	317,88	431,08	335,54
24	396,25	396,83	399,53	440,01	441,25	531,34	304,71	414,14	321,91
25	396,64	397,08	399,74	446,71	451,93	537,71	292,63	401,14	308,27
26	396,47	396,98	399,68	452,24	458,49	541,53	280,97	389,18	294,22

Примечание: измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 300$.

В таблицах № 1-4 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ – амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I – коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ – фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ – линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ – активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ – реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Измерения выполнили:

Инженер-конструктор

ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корзов Д.Н.

Ведущий инженер-электроник

ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корниенко В.И.

Согласовано:

Главный энергетик

ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.

Научный руководитель

д.т.н., профессор Авербух М.А.



Протокол №5

измерений активной и реактивной потребляемой мощности, гармонического
состава тока и напряжения на входе преобразователя частоты
ТПЧ-800

Дата проведения измерений: 18 сентября 2013 года.

Место проведения измерений: ЗАО «Энергомаш (Белгород) – БЗЭМ»,
Производство соединительных элементов трубопроводов, участок гибки
труб.

Параметры изгибаемой трубы: диаметр 426 мм, толщина стенки 19 мм,
марка стали 12Х1МФ.

Перечень приборов, их характеристики и схемы подключения
приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с
временным шагом в одну минуту.

Результаты измерений.

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

№ п/п	$I_{A(1)}$, 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	1,42	1,4	0,97	0,92	13,01	0,35	8,22	1,09	0,87	1,01
2	2,04	1,56	1,05	1,07	20,21	0,51	12,26	1,1	0,81	1,04
3	1,78	0,62	0,61	0,5	20,82	0,36	12,77	0,45	0,38	0,45
4	1,79	0,39	0,34	0,24	20,85	0,16	12,81	0,14	0,15	0,15
5	1,76	0,36	0,33	0,22	20,95	0,1	12,74	0,07	0,15	0,13
6	1,74	0,36	0,35	0,23	20,98	0,1	12,7	0,09	0,17	0,14
7	1,73	0,37	0,38	0,25	20,99	0,11	12,65	0,11	0,17	0,14
8	1,73	0,36	0,36	0,23	20,95	0,09	12,7	0,07	0,15	0,12
9	1,73	0,36	0,36	0,22	20,91	0,12	12,7	0,09	0,14	0,12
10	1,73	0,36	0,39	0,23	20,98	0,1	12,64	0,09	0,16	0,14
11	1,72	0,38	0,39	0,26	21,02	0,11	12,61	0,11	0,19	0,15
12	1,72	0,38	0,39	0,27	21,01	0,1	12,62	0,1	0,17	0,16
13	1,71	0,37	0,39	0,25	20,97	0,11	12,66	0,11	0,15	0,15
14	1,72	0,38	0,42	0,24	21,01	0,1	12,62	0,1	0,16	0,14
15	1,72	0,38	0,4	0,23	21,04	0,11	12,61	0,11	0,17	0,13
16	1,71	0,37	0,42	0,23	21	0,1	12,64	0,12	0,21	0,13
17	1,71	0,38	0,4	0,23	21,04	0,12	12,6	0,12	0,17	0,12
18	1,71	0,38	0,41	0,22	21	0,12	12,67	0,1	0,17	0,12
19	1,71	0,36	0,41	0,24	20,95	0,11	12,68	0,11	0,15	0,12
20	1,71	0,38	0,39	0,23	20,92	0,15	12,69	0,13	0,15	0,12
21	1,7	0,37	0,42	0,23	20,98	0,12	12,71	0,1	0,17	0,13
22	1,7	0,36	0,45	0,25	20,96	0,1	12,72	0,1	0,17	0,11
23	1,7	0,37	0,45	0,23	20,9	0,12	12,74	0,08	0,19	0,12
24	1,7	0,37	0,44	0,22	20,89	0,09	12,77	0,09	0,17	0,14
25	1,69	0,36	0,46	0,22	20,9	0,09	12,77	0,08	0,18	0,12
26	0,1	0,03	0,04	0,01	1,3	0	0,8	0,01	0,01	0,01

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

№ п/п	$K_{IA(11)},$ %	$K_{IA(12)},$ %	$K_{IA(13)},$ %	$K_{IA(14)},$ %	$K_{IA(15)},$ %	$K_{IA(16)},$ %	$K_{IA(17)},$ %	$K_{IA(18)},$ %	$K_{IA(19)},$ %	$K_{IA(20)},$ %
1	4,5	0,37	3,93	0,99	0,7	0,98	2,05	0,36	2,04	0,91
2	7,14	0,56	5,79	0,84	0,66	0,84	3,41	0,52	3,02	0,59
3	8,23	0,32	6,44	0,39	0,33	0,39	4,55	0,31	3,79	0,34
4	8,39	0,15	6,63	0,12	0,15	0,12	4,8	0,15	4,05	0,13
5	8,42	0,1	6,64	0,07	0,14	0,09	4,85	0,11	4,1	0,07
6	8,46	0,12	6,63	0,07	0,17	0,11	4,89	0,11	4,1	0,08
7	8,44	0,13	6,6	0,1	0,15	0,11	4,87	0,14	4,08	0,1
8	8,41	0,12	6,65	0,09	0,14	0,09	4,87	0,12	4,1	0,09
9	8,42	0,12	6,64	0,08	0,14	0,1	4,85	0,12	4,1	0,11
10	8,43	0,12	6,59	0,08	0,16	0,1	4,86	0,12	4,09	0,11
11	8,43	0,14	6,6	0,1	0,17	0,12	4,88	0,12	4,07	0,11
12	8,44	0,12	6,6	0,08	0,17	0,11	4,87	0,13	4,08	0,09
13	8,43	0,11	6,63	0,08	0,13	0,11	4,88	0,13	4,11	0,09
14	8,45	0,11	6,61	0,09	0,15	0,11	4,88	0,11	4,1	0,11
15	8,46	0,13	6,61	0,11	0,19	0,12	4,9	0,11	4,08	0,09
16	8,48	0,12	6,61	0,11	0,19	0,1	4,93	0,11	4,11	0,09
17	8,45	0,11	6,63	0,1	0,17	0,12	4,91	0,11	4,11	0,09
18	8,46	0,12	6,64	0,1	0,16	0,1	4,9	0,11	4,12	0,09
19	8,47	0,13	6,65	0,08	0,15	0,11	4,91	0,13	4,15	0,11
20	8,45	0,14	6,65	0,1	0,15	0,11	4,9	0,12	4,12	0,1
21	8,47	0,13	6,66	0,08	0,17	0,11	4,93	0,11	4,14	0,07
22	8,51	0,12	6,66	0,08	0,16	0,11	4,97	0,12	4,13	0,08
23	8,49	0,12	6,63	0,08	0,17	0,12	4,95	0,11	4,09	0,07
24	8,5	0,11	6,65	0,1	0,16	0,12	4,93	0,1	4,14	0,08
25	8,51	0,13	6,65	0,06	0,17	0,09	4,94	0,12	4,14	0,07
26	0,48	0,01	0,37	0,01	0,01	0	0,28	0	0,2	0,01

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

№ п/п	$K_{UA}, \%$	$K_{UB}, \%$	$K_{UC}, \%$	$K_{IA}, \%$	$K_{IB}, \%$	$K_{IC}, \%$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$
1	4,1	4,11	4,18	17,48	17,9	17,78	232,15	230,52	232,27
2	4,62	4,63	4,68	26,3	26,55	26,34	231,47	229,89	231,67
3	4,87	4,93	4,95	27,64	27,41	27,17	231,78	230,18	231,89
4	4,99	5,08	5,11	27,88	27,63	27,67	231,45	229,96	231,61
5	4,91	4,99	5,03	27,97	27,69	27,83	231,51	229,99	231,63
6	4,85	4,93	4,97	28	27,73	27,85	231,95	230,34	232,11
7	4,86	4,95	4,97	27,96	27,7	27,84	231,75	230,03	231,89
8	4,86	4,94	4,97	27,96	27,69	27,85	232,06	230,29	232,1
9	4,9	4,97	4,99	27,92	27,7	27,84	232,56	230,63	232,49
10	4,9	4,97	5,01	27,94	27,67	27,82	232,25	230,4	232,3
11	4,9	4,97	5,01	27,96	27,67	27,83	232	230,33	232,19
12	4,88	4,96	4,98	27,96	27,69	27,84	232,23	230,5	232,4
13	4,85	4,94	4,94	27,96	27,76	27,85	232,84	231,03	233,02
14	4,87	4,95	4,99	27,99	27,75	27,85	232,72	230,85	232,89
15	4,84	4,94	4,98	28	27,71	27,86	232,44	230,68	232,67
16	4,8	4,89	4,93	28,01	27,73	27,88	232,87	231,18	233,12
17	4,8	4,89	4,93	28,02	27,78	27,89	232,76	230,92	232,94
18	4,79	4,87	4,91	28,02	27,82	27,88	233,55	231,56	233,74
19	4,79	4,86	4,88	28,01	27,83	27,91	233,51	231,49	233,59
20	4,8	4,88	4,88	27,98	27,79	27,92	233,29	231,36	233,38
21	4,66	4,73	4,75	28,07	27,85	27,94	233,6	231,65	233,74
22	4,64	4,68	4,7	28,07	27,88	27,96	234,08	232,13	234,24
23	4,67	4,72	4,75	28,01	27,82	27,91	234,13	232,14	234,25
24	4,67	4,74	4,75	28,02	27,82	27,94	234,6	232,68	234,7
25	4,67	4,74	4,76	28,04	27,84	27,93	234,72	232,84	234,92
26	1,58	1,46	1,62	1,71	1,7	1,7	236,63	234,83	236,8

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

№ п/п	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$	$Q_A, вар$	$Q_B, вар$	$Q_C, вар$
1	400,13	400,37	403,18	313,15	264,95	296,54	138,07	127,11	116,63
2	398,94	399,33	402,07	452,48	385,31	429,89	195,91	178,83	166,59
3	399,51	399,76	402,51	407,46	351,58	388,13	139,94	125,46	119,18
4	399,04	399,38	401,93	410,53	354,69	387,88	129,53	116,95	112,15
5	399,12	399,41	402	404,77	349,89	381,73	125,84	113,64	109,47
6	399,76	400,11	402,86	401,35	346,7	378,61	124,53	112,47	108,38
7	399,31	399,61	402,56	399,33	344,89	376,7	123,84	111,74	107,96
8	399,84	399,96	403,01	399,75	345,09	376,77	123,98	111,84	108,03
9	400,6	400,53	403,83	399,47	344,45	376,08	123,69	111,61	107,76
10	400,08	400,23	403,39	398,48	343,83	375,58	123,37	111,3	107,45
11	399,78	400,15	403,02	396,45	342,49	374,08	122,75	110,75	106,92
12	400,11	400,46	403,42	396	341,92	373,6	122,82	110,67	107,02
13	401,07	401,43	404,53	396,6	342,11	374,03	122,94	110,89	107,2
14	400,79	401,15	404,36	396,74	342,18	374,24	122,92	110,79	107,12
15	400,4	400,86	403,87	396,29	342,14	374,02	122,83	110,65	107,02
16	401,22	401,71	404,6	395,59	341,7	373,46	122,53	110,44	106,77
17	400,89	401,26	404,42	395,71	341,36	373,34	122,45	110,39	106,76
18	402,09	402,46	405,89	396,34	341,39	373,86	122,76	110,7	107
19	402,05	402,24	405,71	396,54	341,63	373,73	122,41	110,49	106,88
20	401,77	401,97	405,28	396,05	341,48	373,17	122,26	110,36	106,77
21	402,26	402,54	405,89	395,3	340,78	372,76	121,7	109,87	106,25
22	403,07	403,39	406,74	395,94	341,32	373,37	121,73	109,97	106,33
23	403,14	403,39	406,8	395,96	341,27	373,16	121,83	110,19	106,38
24	404,04	404,27	407,56	395,7	341,15	372,92	121,95	110,26	106,43
25	404,24	404,62	407,87	395,61	341	373,12	121,89	110,24	106,25
26	407,65	408,02	411,06	20,03	17,68	19,27	138,07	127,11	116,63

EmWorkNet версия 6.1.1

Файл Сервис Настройки Справка

Запрос мгновенных значений

Усредненные значения

Плата: ОБЪЕКТ 4. Время: 18.09.2013 14:01:00 - 18.09.2013 16:30:00
 Схема включения: Три фазы, четыре провода. Угол лин = 301,053(В), Угол ф = 220(В), Рном = 50(Гв)
 Время усреднения: 1 мин., КТТ: отсутствует, КТН: отсутствует

Напряжения и токи Мощности Углы ПКЭ Гармоники фаз, напряжения Гармоники тока Мощности гармоник Углы гармоник

Время	Лин. А	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %	Кладр. %
18.09.2013 14:01:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:02:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:03:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:04:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:06:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:07:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.09.2013 14:08:00	1,42	1,40	0,97	0,92	13,01	0,35	8,22	1,09	0,87	1,01	4,50	0,37	3,93	0,00
18.09.2013 14:09:00	2,04	1,56	1,05	1,07	20,21	0,51	12,26	1,10	0,81	1,04	7,11	0,56	5,79	0,00
18.09.2013 14:10:00	1,78	0,62	0,61	0,50	20,82	0,36	12,78	0,45	0,38	0,45	8,23	0,32	6,44	0,00
18.09.2013 14:11:00	1,79	0,39	0,34	0,24	20,85	0,16	12,81	0,14	0,15	0,15	8,39	0,15	6,63	0,00
18.09.2013 14:12:00	1,76	0,36	0,33	0,22	20,95	0,10	12,74	0,07	0,15	0,13	8,42	0,10	6,64	0,00
18.09.2013 14:13:00	1,74	0,36	0,35	0,23	20,98	0,10	12,70	0,09	0,17	0,14	8,46	0,12	6,63	0,00
18.09.2013 14:14:00	1,73	0,37	0,38	0,26	20,99	0,11	12,65	0,11	0,17	0,14	8,44	0,13	6,60	0,00
18.09.2013 14:15:00	1,73	0,36	0,36	0,23	20,95	0,09	12,70	0,07	0,15	0,12	8,41	0,12	6,65	0,00
18.09.2013 14:16:00	1,73	0,36	0,36	0,22	20,91	0,12	12,70	0,09	0,14	0,12	8,42	0,12	6,64	0,00
18.09.2013 14:17:00	1,73	0,36	0,39	0,23	20,98	0,10	12,64	0,09	0,16	0,14	8,43	0,12	6,59	0,00
18.09.2013 14:18:00	1,72	0,38	0,39	0,26	21,02	0,11	12,61	0,11	0,19	0,15	8,43	0,14	6,60	0,00
18.09.2013 14:19:00	1,72	0,38	0,39	0,27	21,01	0,10	12,62	0,10	0,17	0,16	8,44	0,12	6,60	0,00
18.09.2013 14:20:00	1,71	0,37	0,39	0,26	20,97	0,11	12,66	0,11	0,15	0,15	8,43	0,11	6,63	0,00
18.09.2013 14:21:00	1,72	0,38	0,42	0,24	21,01	0,10	12,62	0,10	0,16	0,14	8,45	0,11	6,61	0,00
18.09.2013 14:22:00	1,72	0,38	0,40	0,23	21,04	0,11	12,61	0,11	0,17	0,13	8,46	0,13	6,61	0,00
18.09.2013 14:23:00	1,71	0,37	0,42	0,23	21,00	0,10	12,64	0,12	0,21	0,13	8,48	0,12	6,61	0,00
18.09.2013 14:24:00	1,71	0,38	0,40	0,23	21,04	0,12	12,60	0,12	0,17	0,13	8,45	0,11	6,63	0,00

Текущее устройство: EM33T, Интерфейс ввода/вывода: USB

Рис. 1. Отображение измеренных значений в программе EmWorkNet.

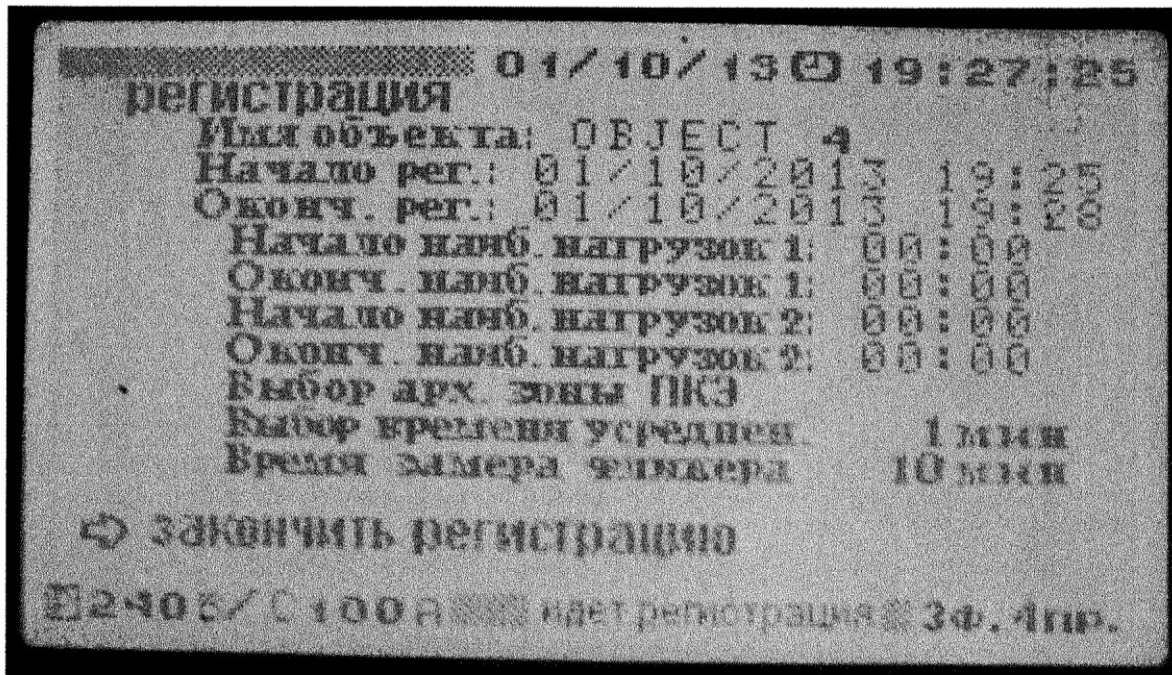


Рис. 2. Экран прибора «Энергомонитор» во время регистрации.

Примечание: измерение тока проводилось при помощи понижающих трансформаторов тока ТШЛМ-0,5-1-1500/5 с коэффициентом трансформации $K_{тр} = 300$.

В таблицах № 1-4 приведены значения следующих величин:

- $I_A(1)$ – амплитудное значение первой гармоника тока фазы А, А;
- $K_{IA(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей, $n = 2 \div 20$, %;
- K_U – коэффициент несинусоидальности по напряжению, %;
- K_I – коэффициент несинусоидальности по току, %;
- $U_{A,B,C}$ – фазные напряжения, В;
- $U_{AB,BC,CA}$ – линейные напряжения, В;
- $P_{A,B,C}$ – активная мощность в каждой из фаз, Вт;
- $Q_{A,B,C}$ – реактивная мощность в каждой из фаз, вар.

Измерения выполнили:

Инженер-конструктор
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корзов Д.Н.

Ведущий инженер-электроник
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Корниенко В.И.

Согласовано:

Главный энергетик
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.

Научный руководитель

д.т.н., профессор Авербух М.А.



Приложение 2. Листинг и свидетельство о государственной регистрации программы расчета углов управления преобразователя частоты установки индукционного нагрева стальных труб

```

#include <math.h>
#include <iostream.h>
#include <stdio.h>
double sqr (double z)
{
return z*z;
}
void main ()
{
double t, s, t0, f, d2, ud, sind, v, u, d1, l, d3, g, delta, Uv;
double tk, Pt, dPt, P2cp, m, A, r2, x2m, Ul, x10, x0, xs, c, r2pr, x2pr, r1p, kx, r1, x1m,
re, xe, ze, I, U, alpha, beta;
const double PI = 3.14159265;
const double p = 7800.0, td = 750.0, kr = 1.0, k1 = 0.15;

//Введите значение температуры нагрева
printf ("enter heating temperature, grad C\n");
scanf ("%lf",&t);

//Введите значение толщины стенки
printf ("enter pipe thickness, m\n");
scanf ("%lf",&s);

//Введите значение частоты тока
printf ("enter current frequency, Hz\n");
scanf ("%lf",&f);

//Введите значение наружного диаметра трубы
printf ("enter external pipe diameter, m\n");
scanf ("%lf",&d1);

//Введите значение средневыпрямленного напряжения
printf ("enter half-period average voltage, V\n");
scanf ("%lf",&ud);

//Введите значение линейного напряжения
printf ("enter line voltage, V\n");
scanf ("%lf",&Ul);

```

```

//Введите значение толщины индуктирующего провода
printf ("enter thickness inducting wire, m\n");
scanf ("%lf",& sind);

//Введите значение скорость подачи трубы
printf ("enter feed velocity of pipe, m/s\n");
scanf ("%lf",&v);

//Введите действующее значение напряжения на выходе преобразователя частоты
printf ("enter output RMS voltage of frequency converter, V\n");
scanf ("%lf",&Uv);

//Введите значение внутреннего диаметра индуктора
printf ("enter internal diameter of inductor, m\n");
scanf ("%lf",&d2);

//Введите значение ширины индуктора
printf ("enter wideness of inductor, m\n");
scanf ("%lf",&l);

t0 = (td + t)/2;
d3 = d1 - 2*s;
delta = 0.5/sqrt(f);

//Масса заготовки
g = PI*1*p*(sqr(d1)/4-sqr(d3)/4);
//Время нагрева
tk = l/v;
//Средняя полезная мощность
Pt = g*668*t0/tk;
//Тепловые потери
dPt = 3.74*l/log10(d2/d1);
//Средняя мощность в заготовке
P2cp = 1.05*(Pt+dPt);
//Относительная координата поверхности трубы
m = d1/(sqrt(2)*delta);
A = sqrt(2)/m;
//Активное сопротивление нагрузки
r2 = 0.000001*PI*sqr(m)*A/l;
//Внутреннее реактивное сопротивление нагрузки
x2m = r2;
//Реактивное сопротивление отрезка пустого индуктора бесконечной длины
x10 = 2*PI*f*sqr(PI)*sqr(d2)*0.0000001/l;
//Реактивное сопротивление пространства между индуктором и трубой
x0 = x10*k1/(1-k1);

```

```

//Реактивность рассеяния индуктора
xs = 2*PI*f*sqr(PI)*(sqr(d2)-sqr(d1))*0.0000001/l;
//Коэффициент приведения активного сопротивления
c = 1/(sqr(r2/x0) + sqr(1+(xs+x2m)/x0));
//Приведенное активное сопротивление цилиндра
r2pr = c*r2;
//Приведенное реактивное сопротивление цилиндра
x2pr = c*(xs+x2m+(sqr(xs+x2m)+sqr(r2))/x0);
//Активное и внутреннее реактивное сопротивление индуктирующего провода
r1p = 0.00000002*PI*d2/(l*sind);
kx = 2*sqr(sind)/(3*sqr(delta));
r1 = r1p*kr;
x1m = r1p*kx;
re = r1+r2pr;
xe = x1m+x2pr;
ze = sqrt(sqr(xe) + sqr(re));
I = sqrt(P2cp/r2pr);
U = I*ze;
beta = acos(ud/(0.9*Uv));
alpha = acos(PI*ud/(Ul*3*sqr(2)));
printf ("Inductor voltage V=%lf\n",U);
printf ("Inductor current I=%lf\n",I);
printf ("Equivalent active resistance of system ""inductor-heating object""
Re=%lf\n",re);
printf ("Equivalent reactive resistance of system ""inductor-heating object""
Xe=%lf\n",xe);
printf ("Delay angle of rectifier alpha=%lf\n",alpha);
printf ("Delay angle of inverter beta=%lf\n",beta);
}

```


РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015613018

**Расчет углов управления преобразователя частоты
установки индукционного нагрева стальных труб**

Правообладатель(ли): *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (RU)*

Автор(ы): *Коржов Дмитрий Николаевич (RU)*

Заявка № 2015610483

Дата поступления 03 февраля 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 02 марта 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Л.Л. Кирий

**Приложение 3. Акт внедрения результатов диссертационного исследования в
производство соединительных элементов трубопроводов ООО
«Белэнергомаш – БЗЭМ»**

ЭНЕРГОМАШ
ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ»

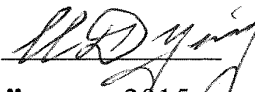


Юридический адрес: 308017,
Россия, г. Белгород, ул. Волчанская, 165
ИНН/КПП 3123315768/312301001
ОКПО 38948552 ОГРН 1133123000801
Тел: 8 (4722) 35-43-44
Факс: 8 (4722) 35-42-24
e-mail: info@energomash.ru
[http://: www.energomash.ru](http://www.energomash.ru)

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Дударев И.Д. 
“ 12 ” марта 2015 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Коржова Дмитрия Николаевича

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационной работы «Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производстве соединительных элементов трубопроводов ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ» для технологического процесса «горячей» гибки труб в виде экспериментальных данных по исследованию энергоэффективности работы трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465.

Использование указанных результатов позволяет повысить энергоэффективность работы трубогибочного стана УЗТМ ТВЧ-465.

Менеджер по персоналу

Галицкая Ю.С.



Согласовано:

Главный энергетик
ООО «Белэнергомаш – БЗЭМ»

Солодовников А.А.

**Приложение 4. Результаты расчетов производной тока задания $\frac{di_{зад}}{dt}$ для
полного периода тока нагрузки при частоте 50 Гц**

№ п/п	Мгновенное значение тока, потребляемого ЭИН, $I_{ЭИН}$	Мгновенные значения основной гармоники тока, потребляемого ЭИН, $i(1)$	Ток задания ЭИН, $i_{зад}$	Производная тока задания, $\frac{di_{зад}}{dt}$
1	2	3	4	5
1	102	64	38	
2	825	128	697	3295000
3	957	191	766	345000
4	918	253	665	-505000
5	1014	314	700	175000
6	1014	374	640	-300000
7	1065	433	632	-40000
8	1011	490	521	-555000
9	1062	545	517	-20000
10	1074	598	476	-205000
11	1044	649	395	-405000
12	1098	697	401	30000
13	1071	742	329	-360000
14	1068	784	284	-225000
15	1071	823	248	-180000
16	1077	859	218	-150000
17	1053	892	161	-285000
18	942	921	21	-700000
19	957	946	11	-50000
20	915	968	-53	-320000
21	834	986	-152	-495000
22	891	1000	-109	215000
23	876	1010	-134	-125000
24	900	1016	-116	90000
25	906	1018	-112	20000
26	873	1016	-143	-155000
27	960	1010	-50	465000
28	918	1000	-82	-160000
29	885	986	-101	-95000
30	954	968	-14	435000
31	876	947	-71	-285000
32	939	921	18	445000
33	924	892	32	70000

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
34	837	860	-23	-275000
35	933	824	109	660000
36	504	785	-281	-1950000
37	1,04	743	-742	-2304780
38	-66	697	-763	-105220
39	-15	650	-665	490000
40	-78	600	-678	-65000
41	-42	547	-589	445000
42	-54	492	-546	215000
43	-36	435	-471	375000
44	-12	376	-388	415000
45	-84	316	-400	-60000
46	1,29	254	-252,7	736467,9
47	-27	192	-219	168532,1
48	-33	129	-162	285000
49	6	65	-59	515000
50	-108	1,6	-109,6	-253000
51	0,18	-62	62,1	858895,5
52	-261	-126	-135	-985895
53	-768	-189	-579	-2220000
54	-972	-251	-721	-710000
55	-978	-312	-666	275000
56	-975	-373	-602	320000
57	-969	-432	-537	325000
58	-1014	-489	-525	60000
59	-1014	-544	-470	275000
60	-1047	-597	-450	100000
61	-1026	-648	-378	360000
62	-1008	-696	-312	330000
63	-1041	-741	-300	60000
64	-975	-783	-192	540000
65	-1026	-823	-203	-55000
66	-987	-859	-128	375000
67	-921	-891	-30	490000
68	-972	-920	-52	-110000
69	-912	-946	34	430000
70	-897	-968	71	185000
71	-861	-986	125	270000
72	-861	-1000	139	70000
73	-879	-1010	131	-40000
74	-867	-1016	149	90000

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
75	-939	-1018	79	-350000
76	-915	-1016	101	110000
77	-867	-1011	144	215000
78	-915	-1001	86	-290000
79	-921	-987	66	-100000
80	-915	-969	54	-60000
81	-918	-948	30	-120000
82	-864	-922	58	140000
83	-831	-894	63	25000
84	-933	-861	-72	-675000
85	-582	-825	243	1575000
86	-66	-786	720	2385000
87	108	-744	852	660000
88	15	-699	714	-690000
89	102	-651	753	195000
90	72	-601	673	-400000
91	42	-548	590	-415000
92	54	-493	547	-215000
93	39	-436	475	-360000
94	87	-378	465	-50000
95	69	-318	387	-390000
96	51	-256	307	-400000
97	78	-194	272	-175000
98	81	-131	212	-300000
99	48	-67	115	-485000
100	78	-3	81	-170000