Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

ДО ТХАНЬ ЛИЧ

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шевырёв Юрий Вадимович.

Москва –2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ БОКСИТОВОЙ РУДЫ ВО ВЬЕТНАМЕ 11

1.1 Ситуация по добыче и переработке бокситовой руды в мире 11

1.2 Текущее состояние добычи и переработки бокситов во Вьетнаме 12

1.3 Система электроснабжения глиноземного производства 16

1.4 Задачи диссертационной работы 26

Выводы 27

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ, ОЦЕНКА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА В ЛАМ ДОНГЕ, ВЬЕТНАМ 28

2.1 Модель системы электроснабжения глиноземного завода 28

2.2 Результаты моделирования 34

Выводы 49

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 50

3.1 Гибридная топология многоуровневого инвертора 50

3.2 Принцип работы параллельного активного фильтра гармоник 61

3.3 Блоки модели схемы активного фильтра гармоник 65

3.4 Модель активного фильтра гармоник 70

3.5 Моделирование системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении активного фильтра гармоник 74

Выводы 76

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА 77

4.1 Решение компенсации реактивной мощности для электрической системы на основе FACTS 78
4.2 Компенсация реактивной мощности на шинах 6 кВ 82
4.2.1 Компенсация реактивной мощности при помощи СТАТКОМов . 82
4.2.2 Статический компенсатор VAR (SVC) 87
4.2.3 Модель статического компенсатора VAR (SVC) 89
4.2.4 Результаты моделирования 92
4.2.5 Применение статического компенсатора VAR (SVC) для повышения энергетических показателелей системы электроснабжения глиноземного завода 93
Выводы 105
ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА 107
5.1 Модель системы электроснабжения глиноземного завода при наличии активных фильтров гармоник 0,4 кВ и компенсирующих устройств реактивной мощности 6 кВ 108
5.2 Результаты моделирования 112
5.3 Научно-обоснованные рекомендации по выбору средств повышения энергетических показателей 128
Выводы 131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 134
ПРИЛОЖЕНИЕ А Оценка экономической прибыли от повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного завода 146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Справки об использовании результатов работы 1522

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Социалистическая Республика Вьетнам - страна с огромным потенциалом для добычи бокситовой руды в регионе и в мире. Бокситовая руда распределяется как на севере, так и на юге Вьетнама, наиболее сконцентрирована в центральной части нагорья. Однако добыча и переработка бокситов во Вьетнаме в промышленных масштабах начали развиваться относительно недавно, принося значительную экономическую прибыль. Суммарные выявленные запасы и ресурсы бокситов оцениваются в 5,5 миллиардов тонн (третье место в мире). В частности, запасы на севере Вьетнама составляют около 91 миллиона тонн; в южном регионе Вьетнама около 5,4 миллиарда тонн. Ресурсы бокситов сосредоточены в основном в центральном нагорье Вьетнама с запасами и ресурсами около 5,2 миллиардов тонн.

Комплекс алюминиевых бокситов в провинции Лам Донг имеет производительность 600 000 тонн глинозема в год. Площадь шахты составляет 140 км^2, что составляет 1,4% от общей площади провинции Лам Донг. Шахта работает с 2012 года, а глиноземный завод запущен в 2014 году. Комплекс алюминиевых бокситов в провинции Дак Нонг занимает площадь более 280 км^2 (что составляет 4,3% от площади провинции). Завод по производству глинозема в настоящее время имеет мощность 650 000 тонн глинозема в год.

Система электроснабжения глиноземного производства содержит значительное число нелинейных потребителей электроэнергии, основную часть которых составляют частотно-регулируемые электроприводы. Наличие большого числа преобразователей частоты в системе электроснабжения глиноземного производства приводит к существенному искажению синусоидальной формы напряжения сети и увеличению потребления реактивной мощности. Искажение напряжения сети приводит к увеличению потерь электроэнергии и сокращению срока службы электрооборудования, увеличению погрешности электроизмерительных приборов, ухудшению работы систем управления и связи.

Увеличение потребления реактивной мощности приводит к возрастанию потерь в питающей сети, дополнительным отклонениям напряжения сети.

Поскольку глиноземное производство является крупным и важным проектом правительства Вьетнама, в соответствии с правилами управления энергосистемой, необходимо не допускать перебоев в подаче электроэнергии, улучшать качество электроэнергии и повышать надежность потребления электроэнергии на заводах по производству глинозема. Поэтому научное обоснование способов повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного производства в условиях Социалистической Республики Вьетнам является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы диссертации. Существует значительное число исследований, посвящённых обоснованию способов повышения энергетических показателей систем электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями, выработке рекомендаций и решений по повышению качества электроэнергии и уменьшению потребления реактивной мощности в таких системах. В работах Л.А. Добрусина, И.В. Жежеленко, Я.Ю. Солодухо, В. П. Шипилло, Ю.В. Шевырёва рассмотрено влияние полупроводниковых преобразователей на питающую сеть. Работы Ю.К. Розанова, Ю.А. Сычева, N.V.Nho, M.J.Youn, H.H. Lee, Lekha Sejpal посвящены анализу свойств активных фильтров гармоник. Однако, обоснование способов повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного производства в условиях Социалистической Республики Вьетнам отсутствует.

Целью работы является обоснование способов повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного производства, содержащей нелинейные нагрузки в виде преобразователей частоты, обеспечивающих нормативное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и повышение коэффициента мощности.

Идея работы заключается в том, что для обеспечения нормативного значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения глиноземного

производства, содержащей нелинейные нагрузки, необходимо совместное применение активных фильтров гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора и широтно-импульсной модуляции для управления инвертором и статических компенсаторов реактивной мощности.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать компьютерную модель, позволяющую количественно установить степень влияния нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты, на энергетические показатели системы электроснабжения глиноземного завода.

2. Разработать схему и компьютерную модель активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции.

3. Обосновать схему и разработать компьютерную модель статического компенсатора реактивной мощности.

4. Разработать компьютерную модель системы электроснабжения глиноземного завода с учётом нелинейных нагрузок, позволяющую установить влияние активного фильтра гармоник и статического компенсатора реактивной мощности на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности системы.

5. На основе комплексного подхода установить степень влияния разработанного активного фильтра гармоник и выбранного статического компенсатора реактивной мощности на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности в системе электроснабжения глиноземного завода при наличии нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработан активный фильтр гармоник, отличающийся применением 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора и широтно-импульсной модуляции для управления инвертором, позволяющий обеспечить нормативные

показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения при наличии нелинейной нагрузки.

2. Разработана компьютерная модель системы электроснабжения глиноземного завода, отличающаяся учетом нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты и интеграцией активных фильтров гармоник и статических компенсаторов реактивной мощности в систему электроснабжения.

3. Установлено комплексное влияние активного фильтра гармоник и статических компенсаторов реактивной мощности с обоснованными в работе параметрами на снижение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и повышение коэффициента мощности в электрической сети.

Теоретическая значимость работы состоит в:

– обосновании параметров и разработке 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора активного фильтра гармоник с системой управления полупроводниковыми ключами на основе широтно-импульсной модуляции;

– разработке компьютерной модели системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой, позволяющей установить влияние активного фильтра гармоник и статических компенсаторов реактивной мощности на снижение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и повышение коэффициента мощности в электрической сети;

– обосновании способа повышения энергетических показателей системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой на основе совместного применения активного фильтра гармоник и статического компенсатора реактивной мощности.

Практическая значимость работы состоит в разработке:

– компьютерных моделей, позволяющих рассчитывать энергетические параметры режимов систем электроснабжения с нелинейными нагрузками и принимать обоснованне решения по применению активных фильтров гармоник и статических компенсаторов реактивной мощности на этапе проектирования данных систем;

– схемы активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции, позволяющей снижать суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения с нелинейной нагрузкой;

– рекомендаций, позволяющих минимизировать отрицательное воздействие высших гармоник на электрооборудование в условиях некачественной электроэнергии, что повышает безотказность электрооборудования, обеспечивает устойчивое электроснабжение и увеличивает объем производства глинозема.

Методы исследования.

В работе использованы методы теорий электрических цепей, полупроводниковых преобразователей, систем электроснабжения, качества электроэнергии, автоматического управления, автоматизированного электропривода и компьютерного моделирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Способ построения активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора при управлении коммутацией полупроводниковых ключей методом широтно-импульсной модуляции, обеспечивающий снижение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в системе электроснабжения при наличии нелинейных нагрузок.

2. Компьютерные модели системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой в виде преобразователей частоты, позволяющие установить влияние активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора и статического компенсатора реактивной мощности на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности в системе электроснабжения.

3. Способы снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и повышения коэффициента мощности в системах электроснабжения, содержащих нелинейные нагрузки.

Степень достоверности результатов.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, подтверждаются: критическим анализом литературы, посвящённой повышению качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности; корректным применением теорий электрических цепей, силовой полупроводниковой техники, систем электроснабжения, качества электроэнергии, автоматизированного электропривода; сходимостью результатов компьютерного моделирования с теоретическими расчётами аналогичных процессов в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками (относительная погрешность не превышает 10%).

Апробация результатов.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2020–2022 гг.), заседаниях научного семинара кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» НИТУ «МИСиС» (г. Москва, 2020-2022 гг.). По результатам работы опубликовано 5 печатных работ.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

Основные научные результаты диссертации были приняты в качестве документов Университетом Далата (провинция Лам Донг, Вьетнам) для их использования при исследовании и разработке проектов по повышению качества электроэнергии на глиноземных заводах. Результаты исследования, представленные в диссертации, используются в качестве учебных материалов для повышения квалификации рабочих-электриков на глиноземном заводе в Лам Донг, Вьетнам, а также в соседних провинциях Вьетнама.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 5 печатных работ, в том числе 2 опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК Минообрнауки России, 1 работа опубликована в издании, индексируемом Scopus, 2 работы опубликованы в издании, индексируемом РИНЦ.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка литературы и 2 приложений. Общий объем диссертации составляет 155 страниц машинописного текста, содержит 77 рисунков, 34 таблицы, список литературы из 113 источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ БОКСИТОВОЙ РУДЫ ВО ВЬЕТНАМЕ

1.1 Ситуация по добыче и переработке бокситовой руды в мире

Согласно объявлению в январе 2009 года Геологической службой США, потенциал запасов бокситов во всем мире составляет около 55-57 миллиардов тонн, распределенных по континентам, в том числе запасы африканской фасции составляют около 18,48 миллиардов тонн (33% от общих запасов), в Австралии около 13,44 миллиарда тонн (24% от общих запасов), в Южной Америке и Карибском бассейне - около 12,32 миллиардов тонн (22% от общих запасов), в Азии - около 8,4 миллиардов тонн (15% от общих запасов), в других местах - около 3,36 миллиардов тонн, на которые приходится 6% от общих запасов мира [1].

Наибольшими запасами бокситов обладают 10 стран: Гвинея – 16,0 миллиардов тонн, Австралия – 13,1 миллиардов тонн, Вьетнам – 5,5 миллиардов тонн, Ямайка – 4,5 миллиард тонн, Бразилия – 4,4 миллиарда тонн, Китай – 3,0 миллиарда тонн, Индия – 2,17 миллиарда тонн, Гайана – 1,6 миллиардов тонн, Греция – 1,25 миллиарда тонн, Суринам – 1,18 миллиардов тонн, из которых Вьетнам занимает третье место по запасам в мире.

Согласно расчетам Геологической службы США (2009 г.), исходя из современного состояния и перспектив развития алюминиевой промышленности в мире, мировые запасы бокситов могут обеспечить сырьем эту отрасль в течение 150-200 лет.

Во всем мире около 20 стран добывают бокситы, 30 стран производят глинозем и 40 стран производят алюминий [2], из которых 11 стран добывают бокситы, производят глинозем и алюминий; 4 страны добывают бокситы и производят глинозем; 8 стран производят только глинозем и алюминий; 2 страны

добывают бокситы и производят алюминий; 2 страны добывают только бокситы; 1 страна производит только глинозем; 18 стран производят только алюминий.

Основной минеральный состав бокситовой руды приведён таблице 1.1 [3]. Основными минералами бокситов являются гипксит, пумпит и диаспоры.

Таблица 1.1 – Основной минеральный состав бокситовой руды

Название	Формула	Содержание в теории (%)	
		$A1_2O_3$	SiO_2
Бёмит	γ-AlO[4]	85,0	-
Корунд	α-AlO[4]	85,0	-
Гиббсит (гидраргиллит)	$Al[4]_3$	65,4	-
Каолин	$Al_2O_3 – 2\ SiO_2 – 2\ H_2O$	39,5	46,5

Около 96% добычи бокситов используется в металлургии, остальные 4% используются в других отраслях, таких как огнеупорные материалы, керамика, шлифовально-полировальные материалы. Боксит используется при производстве красок, адсорбирующих различные примеси для переработки нефтепродуктов. [4]

Более 90% глиноземного производства (называемого металлургическим глиноземом) в мире используется в качестве сырья для процесса электролиза для производства металлического алюминия, остальные, около 10% используются в химической промышленности и в других отраслях.

Основным методом добычи бокситовой руды является метод открытой разработки.

1.2 Текущее состояние добычи и переработки бокситов во Вьетнаме

Вьетнам является одной из стран с большим потенциалом для добычи бокситовой руды в регионе и в мире (занимает 3 место в мире по запасам).

Бокситовая руда во Вьетнаме распределена на севере и юге, наиболее сконцентрирована на юге, в центральной части нагорья, в том числе в центральных горных районах и провинции Бинь Фуок [5].

Суммарные выявленные запасы бокситовой руды и прогнозные ресурсы составляют около 5,5 миллиардов тонн, из которых на северный регион приходится около 91 миллиона тонн, остальная часть сосредоточена в основном на юге, где она составляет около 5,4 миллиардов тонн (около 98% от общих запасов бокситов во всей стране). Это важный и решающий фактор для развития добычи бокситов и алюминиевой промышленности во Вьетнаме [6].

В южном регионе ресурсы бокситов сосредоточены в регионе Центрального нагорья с запасами и прогнозными ресурсами около 5,2 миллиардов тонн (что составляет 94% от общих запасов и ресурсов бокситов в стране), из которых в провинции Дак Нонг около 3,4 миллиардов тонн (62%), в провинция Лам Донг около 975 миллионов тонн (18%), в провинции Гия Лай Кон-Тум около 806 миллионов тонн (15%). Кроме того, на юге Бинь Фуок находится около 217 миллионов тонн бокситов (4%) [7].

В 1976 году химическая промышленность начала эксплуатировать бокситовый рудник Лам Донг с производительностью в несколько десятков тысяч тонн боксита в год, поставляя боксит (заменяющий боксит, импортируемый из Индонезии) для химического завода в Хошимине.

В настоящее время Вьетнам инвестировал в строительство в провинции Лам Донг и в провинции Дак Нонг следующие комплексы [8]:

1) Комплекс алюминиевых бокситов Лам Донг с годовой производительностью 600 000 тонн глинозема был инвестирован Вьетнамской группой угольной промышленности. Площадь добычи на шахте Тан-Рай составляет 140 км^2, что составляет около 1,4% от общей площади провинции. Завод работает с 2012 года, а глиноземный завод запущен в 2014 году.

2) Комплекс алюминиевых бокситов в провинции Дак Нонг. Территория завода занимает площадь более 280 км^2 (что составляет 4,3% от площади провинции), которую инвестировали Vinacomin– Вьетнамская национальная

группа угольной и минеральной промышленности совместно с подрядчиком проекта строительства фабрики Chalieco China. Завод по производству глинозема в настоящее время имеет мощность 650 000 тонн глинозема в год [9].

На рисунках 1.1 и 1.2 показаны карты расположения бокситового рудника Лам Донг. На рисунке 1.3 показан план размещения участков по переработке боксита алюминия на глиноземном заводе в провинции Лам Донг.

Рисунок 1.1 – Карта расположения шахты во Вьетнаме

Рисунок 1.2 –Бокситовый рудник Лам Донг

Рисунок 1.3 –План размещения участков по переработке боксита алюминия на глиноземном заводе в провинции Лам Донг

1.3 Система электроснабжения глиноземного производства

Исследования энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного производства рассматриваются на примере системы электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг, так как в основном схемы электроснабжения глиноземных заводов имеют одинаковые принципы построения. Поэтому результаты исследования можно распространить и на другие глиноземные заводы в республике Вьетнам.

Глиноземный завод в Лам Донге представляет собой предприятие мощностью 650 тысяч тонн глинозема в год. Электроэнергия на глиноземный завод поступает от двух линий электропередачи напряжением 110 кВ. На самом заводе построены 2 трансформаторные подстанции мощностью 20 МВА для понижения напряжения 110 кВ до 6 кВ. Кроме того на заводе строится резервная электростанция, состоящая из двух комплектов генераторов мощностью 15 МВА. Выходное напряжение генераторов составляет 6 кВ.

На рисунке 1.4 представлена структура электроэнергетической системы 110/6 кВ глиноземного завода в провинции Лам Донг, Вьетнам.

Электроэнергетическая система глиноземного завода является потребителем электроэнергии 1-й категории. Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения завода подключены два источника питания 110 кВ от энергосистемы района Бао Лам (постоянный) и источник электроснабжения. электроэнергия из района Ди Линь (резервная). Для повышения надежности систем передачи и распределения электроэнергии используется параллельная схема из двух линий. От 2 трансформаторов 110/6 кВ напряжение 6 кВ подаётся на распределительные станции ПД-1...ПД-6. Для осуществления переключений в схеме электроснабжения применяются вакуумные выключатели QF и разъединители QS, как показано на рисунке 1.4. В распределительной системе напряжением 6 кВ нагрузки станций распределения ПД-1-ПД6 распределяются поровну по шинной системе 6 кВ с целью

балансировки нагрузки для облегчения управления, работы и защиты электрической системы предприятия.

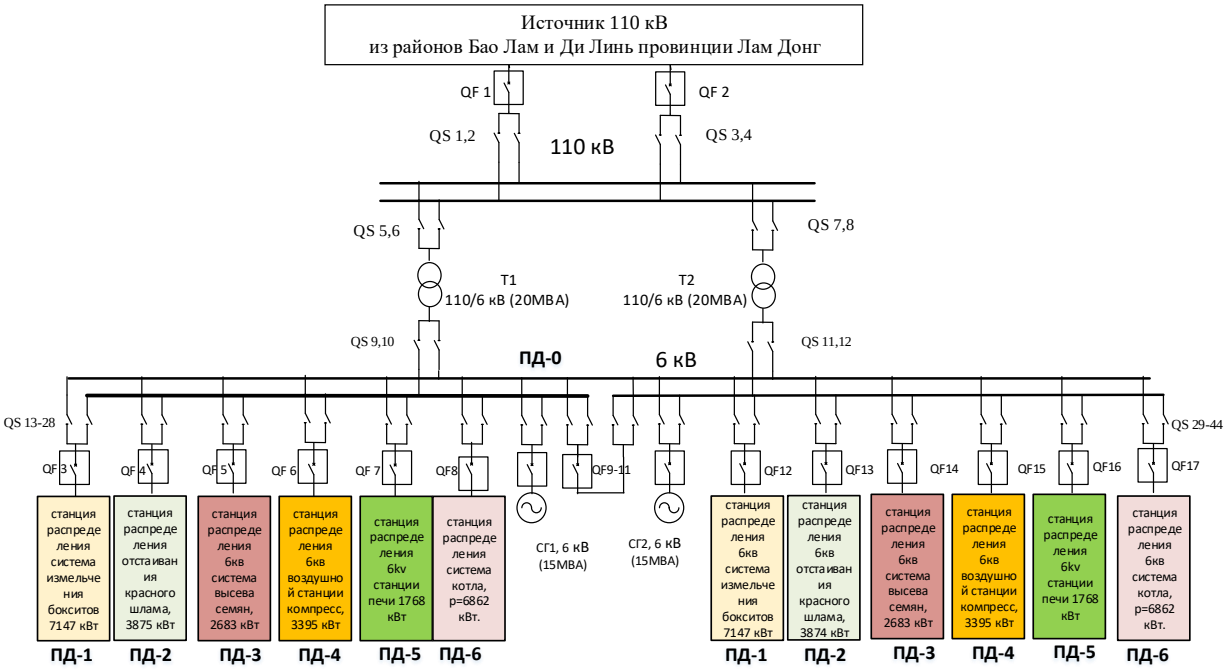


Рисунок 1.4 – Структура системы электроснабжения

Рассмотрим назначение отдельных станций распределения электроэнергии ПД-1...ПД-6.

Станция распределения электроэнергии ПД-1 (6кВ, 14294 кВт) питает электроэнергией систему измельчения бокситов (рисунок1.5).

Для измельчения бокситов используется замкнутый процесс измельчения руды, состоящий из группы циклонов и набора шаровых мельниц, состоящих из трех герметичных секций. Для транспортировки боксита используется конвейер.

От шин 6 кВ питается следующее электрооборудование:

– 3 двигателя дробилки руды, 6 кВ, мощностью 3х1800 кВт;

– 2 двигателя насосов на 6 кВ, используемых для перекачки бурового раствора мощностью 2х355 кВт;

– 1 двигатель ленточного конвейера 6 кВ мощностью 1600 кВт;

– 4 двигателя 0,69 кВ мощностью 4 х 630 кВт, используемых для систем перекачки бурового раствора, и получающих питание от трёхфазных трансформаторов 6/0,69 кВ, S = 800 кВА;

– 3 низковольтные системы 0,4 кВ с электрической мощностью P1 = 452 кВт, P2 = 1007 кВт, P3 = 1172 кВт, они питаются от трех трехфазных трансформаторов с S1 = 630 кВА, S2 = 1250 кВА, S3 = 1250 кВА. В состав нагрузки P2 входят низковольтные электродвигатели большой мощности (7 % от общей мощности нагрузки ПД-1), получающие питание от полупроводниковых преобразователей частоты, что является причиной появления высших гармоник напряжения и тока. Высшие гармоники приводят к ухудшению качества электроэнергии, что вызывает нарушение нормальной работы электрооборудования. Нагрузка P2 является нелинейной нагрузкой, поэтому возникает задача уменьшения её влияния на питающую сеть.

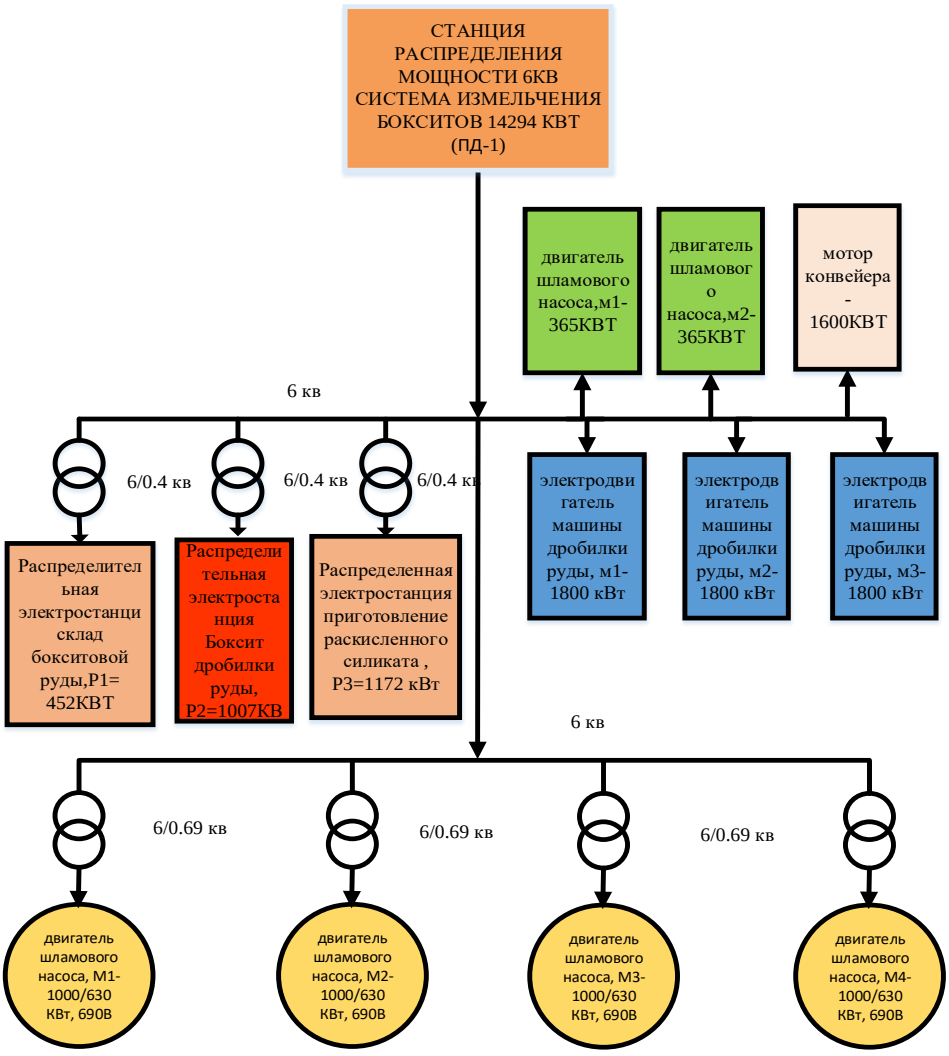


Рисунок 1.5 –Станция распределения электроэнергии ПД-1

Станция распределения электроэнергии ПД-2 (6кВ, 7749 кВт) питает электроэнергией технологический процесс отстаивания красного шлама (рисунок 1.6).

От шин 6 кВ питаются 2 двигателя 6 кВ мощностью 2 х 1250 кВт, используемые в воздуходувках для газификации угля.

Низковольтная распределительная система 6/0,4 кВ снабжена 4 низковольтными трансформаторами мощностью S=1800 кВА.

Данная низковольтная распределительная система питает электроэнергией системы: отстаивания и промывки красного шлама (P_1=1708 кВ, S_1=2000 кВА); подготовки системы отстаивания (P_2 = 489 кВт, S_2 = 630 кВА); обеспечения системы концентрации красного шлама (P_3=1680 кВт, S_3=1800 кВА); обеспечения системы газификации угля (P_4 = 1680 кВт, S_4=1800 кВА). Низковольтные нагрузки Р2, Р3, Р4 представляют собой системы перекачки оборотной воды. В состав нагрузки Р1 (22 % от общей мощности нагрузки ПД-2) входят высокопроизводительные двигатели буровых насосов, скорость вращения которых регулируется полупроводниковыми преобразователями частоты, которые генерируют высшие гармоники тока в сеть.

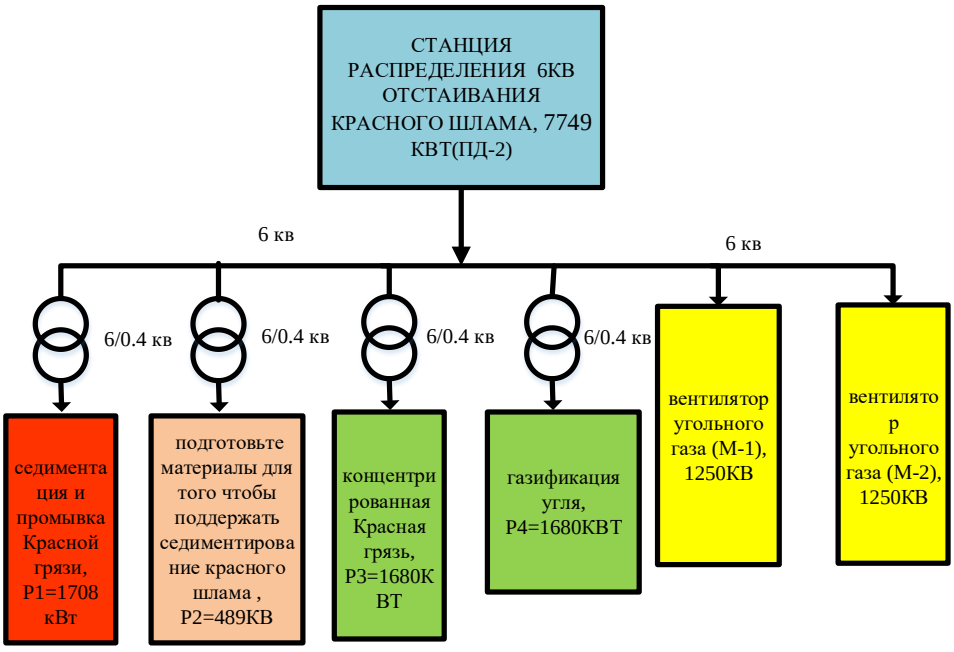


Рисунок 1.6 –Станция распределения электроэнергии ПД-2

Станция распределения электроэнергии ПД-3 (6 кВ, 5366 кВт) питает электроэнергией двухстадийный технологический процесс кристаллизации, в котором используется 18 комплектов резервуаров для кристаллизации, из которых три комплекта резервуаров для кристаллизации на первом этапе, 15 комплектов резервуаров для кристаллизации на втором этапе (рисунок1.7). На этой распределительной станции отсутствуют электродвигатели 6 кВ, однако присутствуют низковольтные трансформаторные подстанции 6/0,4 кВ с мощностями S_1=3000 кВА (станция кристаллического распределения, P_1=2805 кВт), S_2=1000 кВА (станция распределения кристаллических семян, P_2=935 кВт), S_3=1250 кВА (распределительная станция для фильтрации раствора алюмината, P_3=1040 кВт), S_4=630 кВА (распределительная станция теплообмена, P_4=586 кВт). Нагрузкой на стороне 0,4 кВ являются насосы, которые закачивают воду и жидкость в резервуары, система ленточных фильтров. Полупроводниковые преобразователи частоты в составе нагрузки P_4 (10,9 % от общей мощности нагрузки ПД-3) используются для управления скоростью вращения двигателей водяного насоса, чтобы регулировать поток воды в системе пластинчатого теплообменника для подачи оборотной воды.

На шинах 0,4 кВ ПД-3 включены конденсаторные установки, обеспечивающие коэффициент мощности, близкий к единице.

Нагрузкой на стороне 0,4 кВ являются насосы, которые закачивают воду и жидкость в резервуары, система ленточных фильтров, эти системы были оснащены компенсационными конденсаторами реактивной мощности 0,4 кВ, приложенными поставщиком с хорошим коэффициентом мощности.

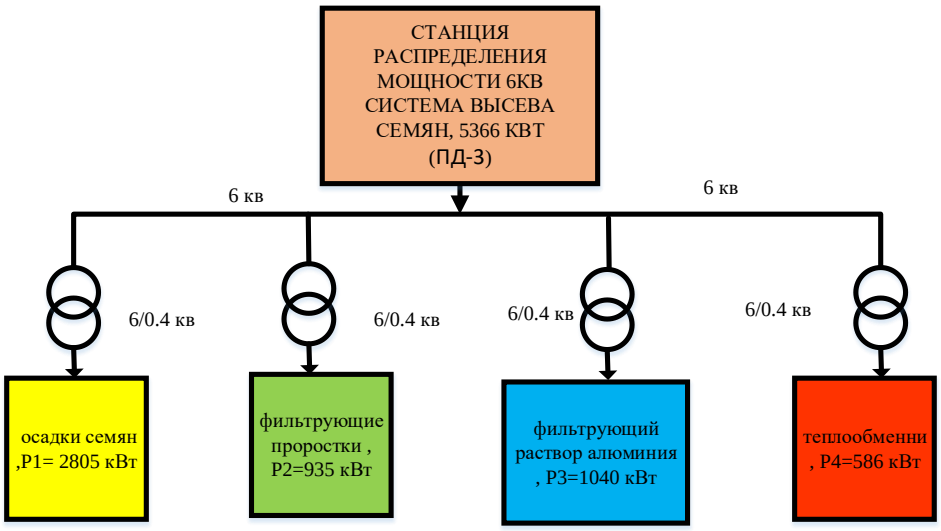


Рисунок 1.7 – Станция распределения электроэнергии ПД-3

Станция распределения электроэнергии ПД-4 (6кВ) питает воздушную компрессорную станцию 6790 кВт (рисунок 1.8). Компрессорная станция включает в себя 4 воздушных компрессора 6 кВ мощностью P=4x280 кВт и 3 воздушных компрессора мощностью P=3x710 кВт.

От станции ПД-4 получают электроэнергию 5 подстанций низкого напряжения 6/0,4 кВ с мощностями: S_1=800 кВА (станция распределения циркуляции кристаллизованной воды, P_1=644 кВт), S_2=800 кВА (станция распределения циркуляции сжатого воздуха, P_2=596 кВт), S_3=800 кВА (станция распределения циркуляции глиноземной воды, P_3=674 кВт), S_4=630 кВА (станция распределения низкого давления воздуха, P_4 = 567 кВт), S_5=1000кВА (распределительная станция ремонтной мастерской, P_5=900 кВт, оборудованная системой электросварочных машин, токарных станков, строгальных станков и кранов). Ремонт и техническое обслуживание оборудования в ремонтной мастерской с нагрузкой P_5 (7,36 % от общей мощности нагрузки ПД-4) часто создают помехи тока на заводе, которые снижают надежность электрической системы.

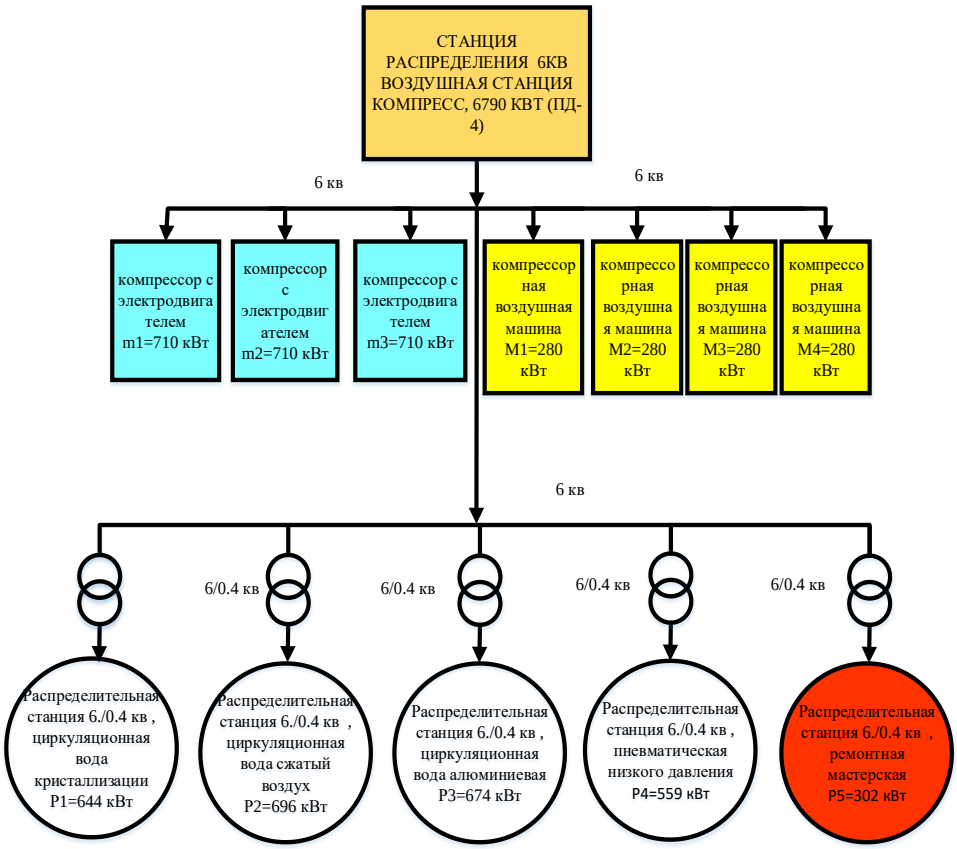


Рисунок 1.8 – Станция распределения электроэнергии ПД-4

Станция распределения электроэнергии ПД-5 (6кВ) питает печь мощностью 3536 кВт, 2 вентилятора вакуумного насоса напряжением 6 кВ мощностью 2х560 кВт, двигатель вытяжного вентилятора 6 кВ мощностью 710 кВт, используемого для гидратных печей (рисунок 1.9).

От станции ПД-5 получает электроэнергию распределительная система низкого напряжения 6/0,4 кВ, в состав которой входит 3 трансформатора с мощностями: S_1=630 кВА (станция распределения гидрата, P_1=390 кВт), S_2=1250 кВА (гидратная распределительная станция, P_2=809 кВт), S_3=630 кВА (водораспределительная станция, P_3=571 кВт). Типичная нагрузка на этих распределительных станциях низкого напряжения – электроприводы водяных насосов, конвейеров для подачи гидратов в резервуары. В качестве электроприводов применяются частотно-регулируемые электроприводы, которые являются нелинейной нагрузкой для системы электроснабжения (22,8 % от общей мощности нагрузки ПД-5).

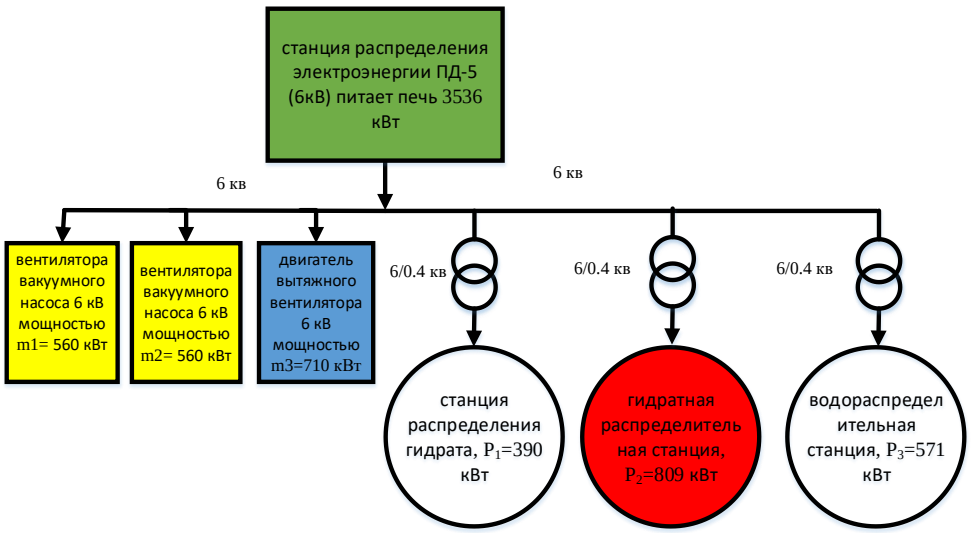


Рисунок 1.9 – Станция распределения электроэнергии ПД-5

Станция распределения электроэнергии ПД-6 (6кВ) питает систему электроснабжения котла (Р=13724кВт) (рисунок1.10). Для подачи воды в котел используются 3 насоса 6 кВ мощностью 3х800 кВт, 3 основных вентилятора котла 6 кВ мощностью 2х1000 кВт, 6 вторичных вентиляторов котла 6 кВ мощностью 630 кВт.

Низковольтная система напряжением 0,4 кВ обеспечивается 3 подстанциями с мощностями: S_1 = 1800 кВА (для питания главного здания электростанции, которая представляет собой линейную нагрузку P_1=1516 кВт), S_2=800 кВА (насосы системы оборотной воды для котла мощностью P_2=788 кВт), S_3=1800 кВА (система двигателей конвейеров для транспортировки угля в печь мощностью P_3=1610 кВт). Для регулирования скорости электродвигателей используются преобразователи частоты, которые являются нелинейной нагрузкой для системы электроснабжения (11,7 % от общей мощности нагрузки ПД-6).

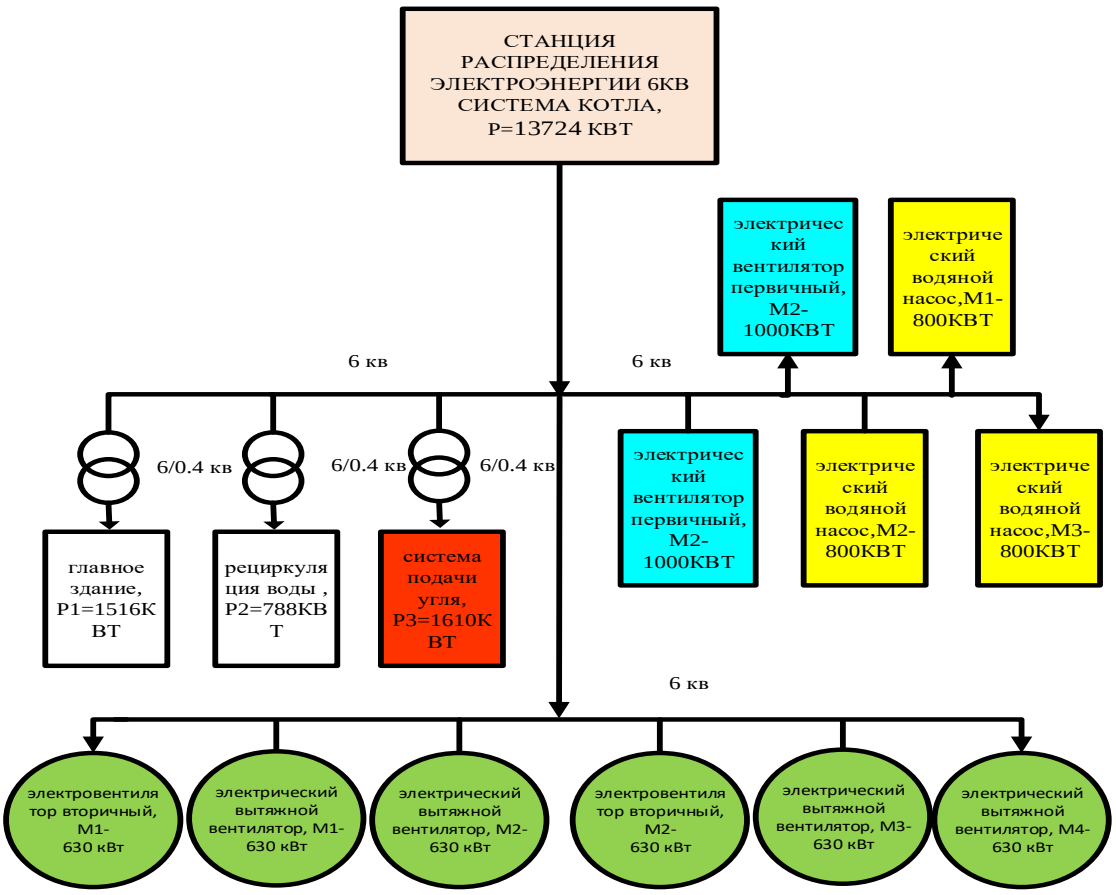


Рисунок 1.10 – Станция распределения электроэнергии ПД-6

Согласно книге эксплуатации завода, наличие нелинейных нагрузок на низковольтных станциях напряжением 0,4 кВ приводит в узлах их подключения к перегреву кабеля, повреждению изоляции. Двигатели также могут перегреваться или вызывать шум и колебания крутящего момента на роторе, что приводит к механическому резонансу и вибрациям. Включение конденсаторов приводит к их перегреву и к разрушению в большинстве случаев диэлектрика. Устройства индикации и освещения могут мигать, защитные устройства могут отключаться, сети передачи данных и измерительное оборудование дают ложные результаты. Наличие этих фактов приводит к выходу из строя электроборудования и нарушению нормальной работы завода [10].

Согласно записи производственного плана, записям по ремонту и техническому обслуживанию системы электроснабжения завода по производству бокситов в провинции Лам Донг в год (3170 часов/год) количество отключений

электроэнергии из-за технического обслуживания и ремонта составляет 5% (158 часов/год), но на самом деле общее количество отключений электроэнергии из-за средней поломки составляет от 317 до 465 часов/год (от 10% до 15%). Это приводит к снижению производительности электрооборудования.

Локальные отключения системы электроснабжения на шинах низкого напряжения 0,4 кВ, вызванные ложными срабатываниями устройств защиты от перегрузки по току из-за наличия гармонических помех, вызванных нелинейными нагрузками на шинах напряжением 0,4 кВ, нарушают работу местной производственной линии. Это может приводить костановке всей производственной системы завода, что серьезно влияет на план производства алюминия на заводе.

Имеет место также низкий коэффициент мощности системы электроснабжения завода – от 0,32 до 0,64.

После изучения и анализа текущего состояния системы электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг для повышения энергетических показателей необходимо проведение следующих мероприятий:

1. Для обеспечения общего коэффициента мощности системы электроснабжениязавода от 0,8 до 0,9 и уменьшения тем самым потребления реактивной мощности необходимо выполнить компенсацию реактивной мощности на шинах 6 кВ на распределительных станциях.

2. Для обеспечения нормативного значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения следует применить активный фильтр гармоник, который обеспечит фильтрацию высших гармоник тока и напряжения, вызванные нелинейными нагрузками на шинах напряжением 0,4 кВ.

Однако исследования, которые бы обосновывали эти мероприятия для системы электроснабжения глиноземного завода в условиях Социалистической Республики Вьетнам (СРВ), отсутсвуют.

При выполнении исследований в работе применяется комплексный подход, который заключается в рассмотрении системы электроснабжения как

совокупности различных компонентов, подлежащих изучению методом имитационного моделирования.

1.4 Задачи диссертационной работы

На основании выполненного анализа системы электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг и анализа влияния нелинейных нагрузок на электрическую сеть сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

1. Разработать компьютерную модель, позволяющую количественно установить степень влияния нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты, на энергетические показатели системы электроснабжения глиноземного завода.

2. Разработать схему и компьютерную модель активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции.

3. Обосновать схему и разработать компьютерную модель статического компенсатора реактивной мощности.

4. Разработать компьютерную модель системы электроснабжения глиноземного завода с учётом нелинейных нагрузок, позволяющую установить влияние активного фильтра гармоник и статического компенсатора реактивной мощности на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности системы.

5. На основе комплексного подхода исследовать количественно степень влияния разработанного активного фильтра гармоник и выбранного статического компенсатора реактивной мощности на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности в системе электроснабжения глиноземного завода при наличии нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты.

Выводы

1. Вьетнам является страной с большим потенциалом для добычи бокситовой руды в регионе и в мире, общий выявленный запас бокситовой руды и прогнозный ресурс составляют около 5,5 миллиардов тонн, занимая третье место в мире.

2. Глиноземный завод Лам Донг является крупным и важным проектом правительства Вьетнама.Поэтому важной задачей является не допускать перебоев в подаче электроэнергии, улучшать качество электроэнергии и повышать надежность потребления электроэнергии на заводе.

3. Для повышения общего коэффициента мощности системы электроснабжения завода необходимо выполнить компенсацию реактивной мощности на шинах 6 кВ на распределительных станциях. Для обеспечения нормативного значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения следует применить активный фильтр гармоник, который обеспечит фильтрацию высших гармоник тока и напряжения, вызванные нелинейными нагрузками на шинах напряжением 0,4 кВ.

Однако исследования, которые бы обосновывали эти мероприятия для системы электроснабжения глиноземного производства в настоящее время отсутсвуют.

4. Сформулированы задачи диссертационного исследования.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ, ОЦЕНКА И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА В ЛАМ ДОНГЕ, ВЬЕТНАМ

Разработана модель системы электроснабжения завода, с помощью которой проведена оценка качества электроэнергии на общей шине 6 кВ системы электроснабжения, а также на шинах 6 и 0,4 кВ распределительных подстанций отдельных подразделений завода. На основании выполненных исследований даны предложения по решению проблемы качества электроэнергии в системе электроснабжения завода.

2.1 Модель системы электроснабжения глиноземного завода

Глиноземный завод в Лам Донге - это крупный и важный проект Вьетнамского государства, система электроснабжения которого не допускает перебоев в подаче электроэнергии. Для поддержания стабильности электроснабжения необходимо улучшение качества электроэнергии. Поэтому целью моделирования электрической системы глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам, является изучение и анализ характеристик системы электроснабжения с учётом нелинейных нагрузок. Наличие нелинейных нагрузок существенно ухудшает качество электрической энергии, что приводит к повреждению оборудования, ошибочным переключениям и, как следствие, снижению производительности завода [11], [12-17].

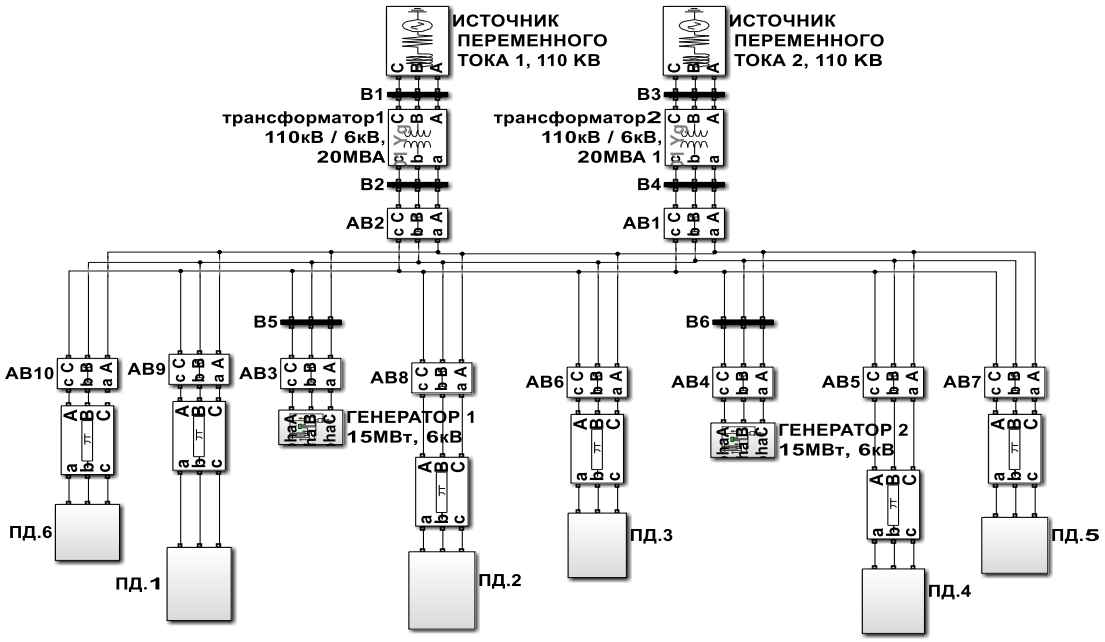


Рисунок 2.1 – Модель электрической системы глиноземного завода в Лам Донге

На рисунке 2.1 показана визуальная модель схемы распределительной системы напряжением 110 кВ с двумя главными силовыми трансформаторами 110/6 кВ, мощностью 20 МВА. Схема системы 110 кВ состоит из двух линий, которые резервируют друг друга и соединены друг с другом через шину. Распределение электроэнергии на стороне напряжением 6 кВ осуществляется на шести распределительных подстанциях: распределительная станция ПД-1 системы измельчения бокситов ($P_{ПД-1}$=14294 кВт); распределительная станция ПД-2 красного шлама ($P_{ПД-2}$=7749 кВт), станция распределения кристаллизации ПД-3 ($P_{ПД-3}$ =5366 кВт); распределительная станция для компрессоров ПД-4 ($P_{ПД-4}$=6790кВт), распределительная станция печи ПД-5 ($P_{ПД-5}$=3536 кВт), распределительная станция котельной ПД-6 ($P_{ПД-6}$ =13724 кВт).

На рисунках 2.2...2.7 приведены визуальные модели распределительных систем станций ПД-1...ПД-6, входящие в состав модели электрической системы глиноземного завода в Лам Донге (рисунок 2.1).

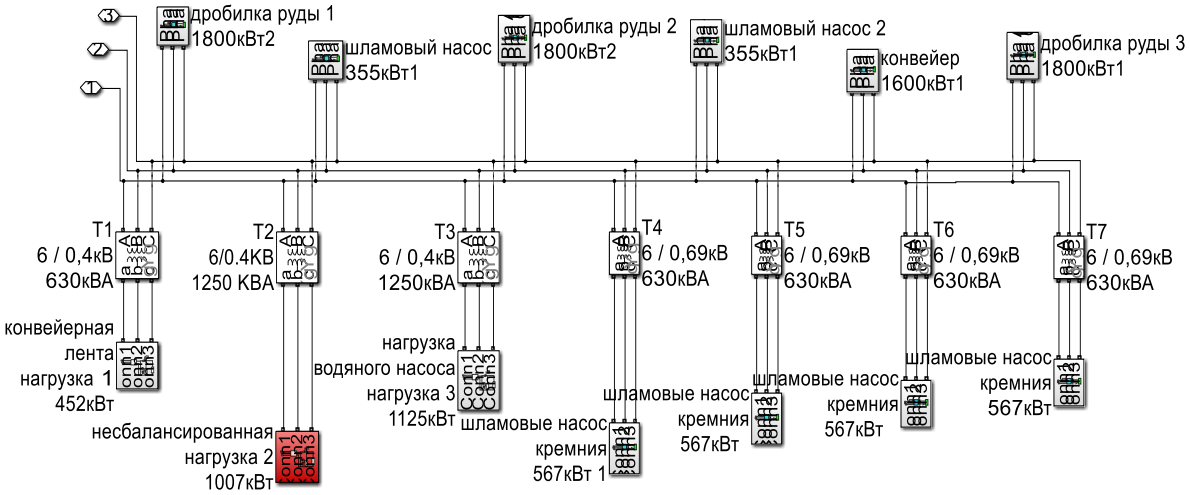


Рисунок 2.2 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-1 (6кВ, 14294 кВт)

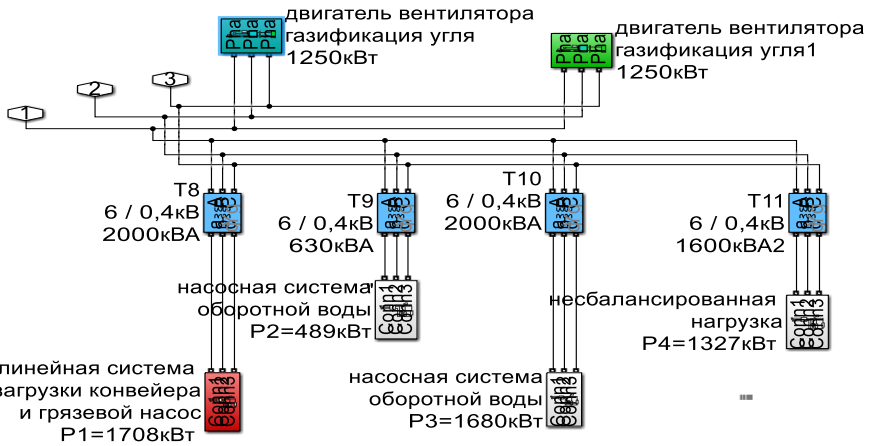


Рисунок 2.3 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-2 (6кВ, 7749 кВт)

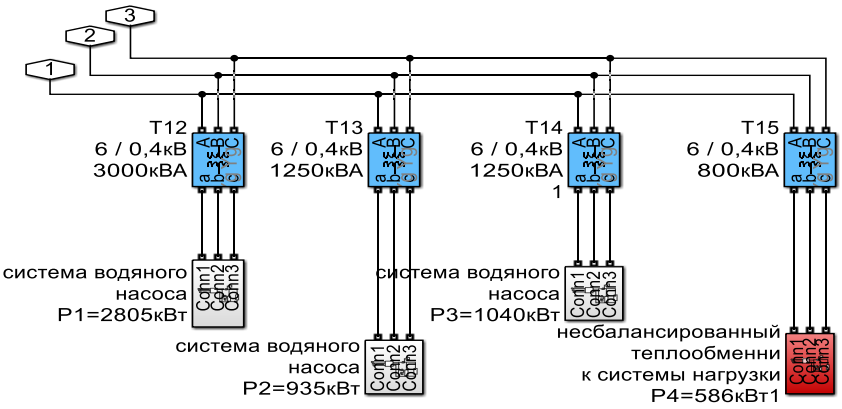


Рисунок 2.4 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-3 (6кВ, 5366 кВт)

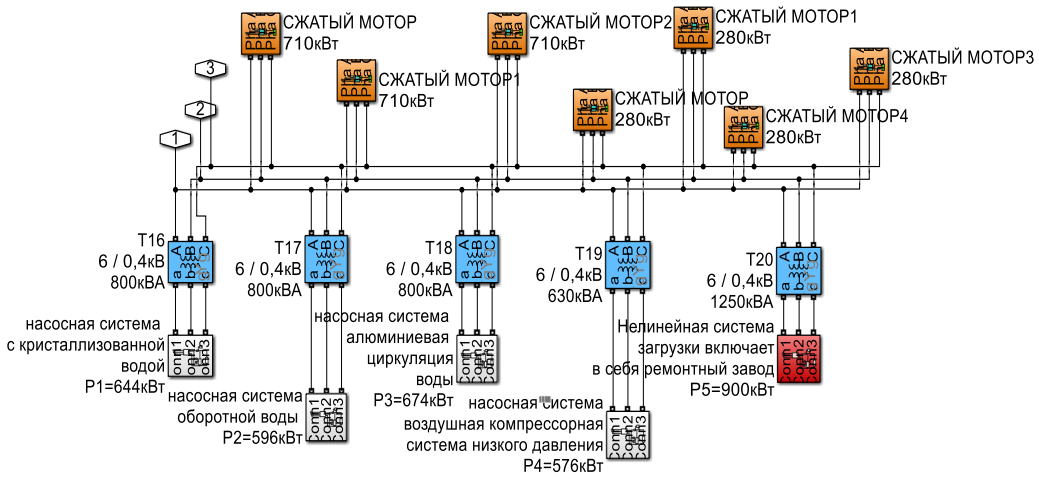


Рисунок 2.5 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-4 (6кВ, 6790 кВт)

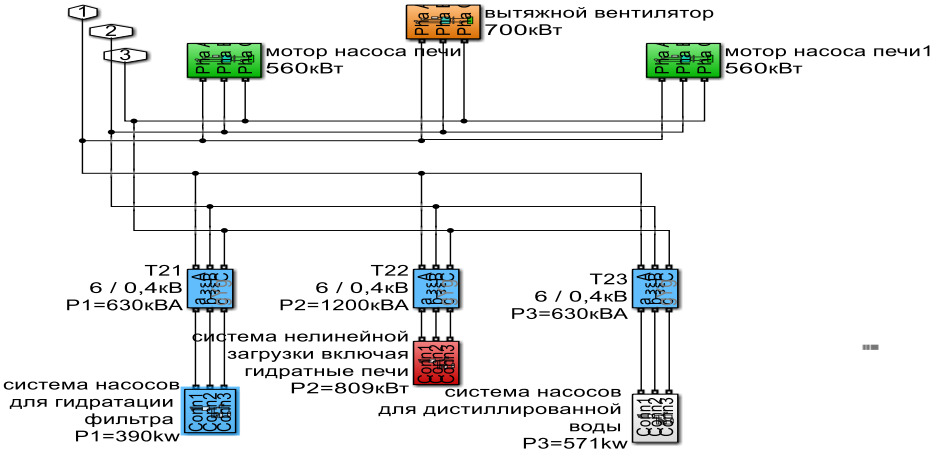


Рисунок 2.6 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-5 (6кВ, 3536 кВт)

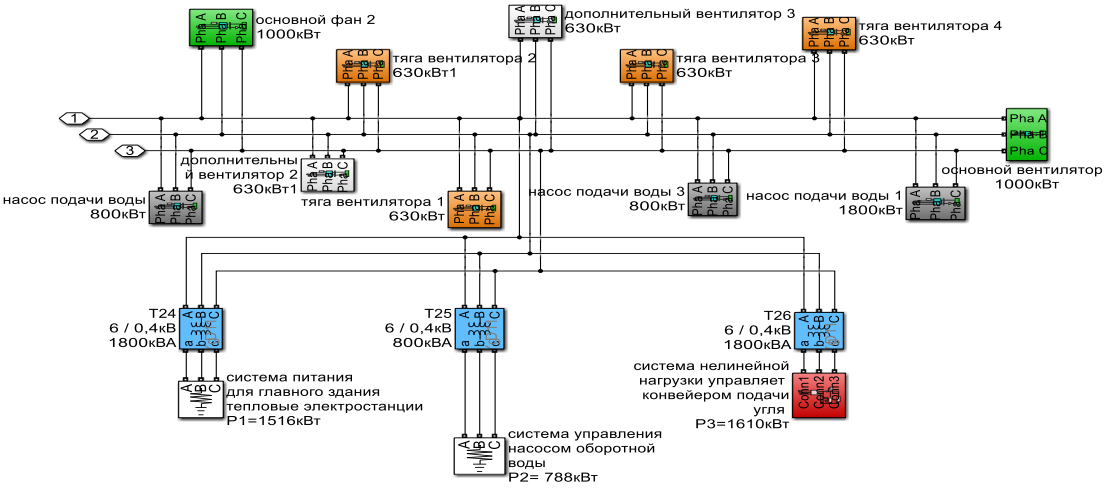


Рисунок 2.7 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-6 (6кВ, 13724 кВт)

Система электроснабжения глиноземного завода содержит нелинейные нагрузки в виде полупроводниковых преобразователей. Модель нелинейной нагрузки представлена на рисунке 2.7. Она представляет собой либо трёхфазный полупроводниковый управляемый выпрямитель, либо неуправляемый однофазный выпрямитель. Преоразователи нагружены на активно-индуктивную нагрузку. Параметры этой нагрузки подбираются таким образом, чтобы её активная мощность равнялась активной мощности электроприводов и другого электрооборудования, получающих питание от соответствующих полупроводниковых преобразователей.

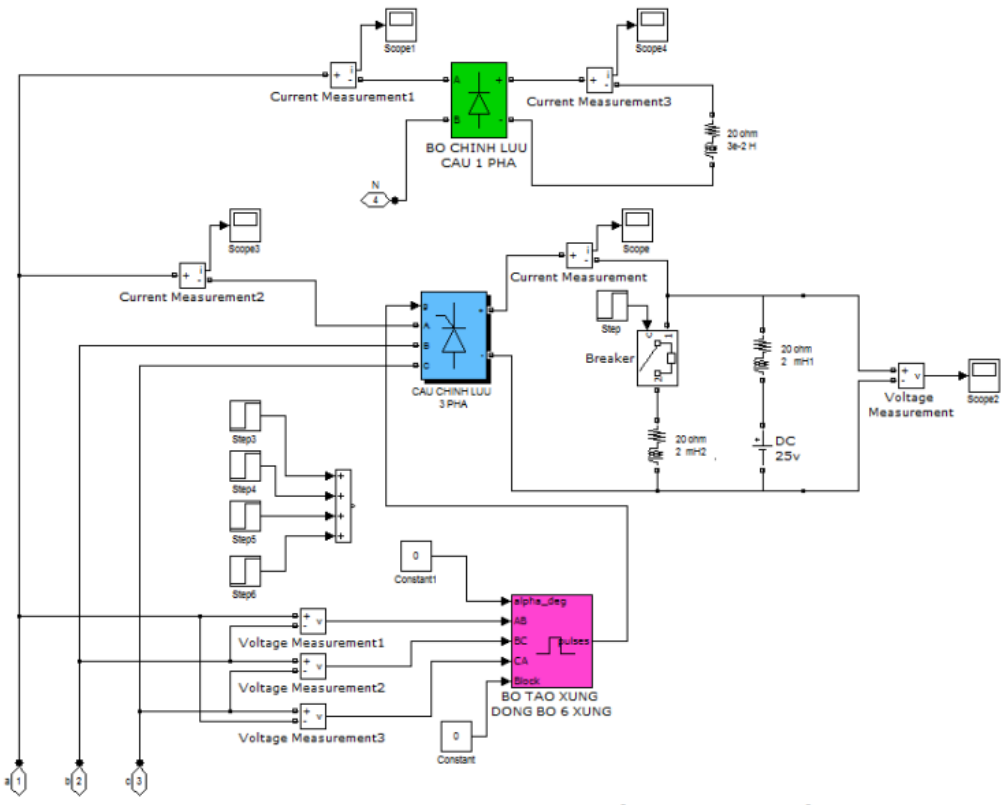


Рисунок 2.7 – Модель нелинейной нагрузки

Для измерения токов, напряжений, мощностей, построения графиков служат специальные измерительные блоки. Пример подключения измерительных блоков на станции распределения электроэнергии ПД-1 показан на рисунке 2.8.

Блоки подключаются к точкам, в которых необходимо провести соответствующие измерения и вычисления.

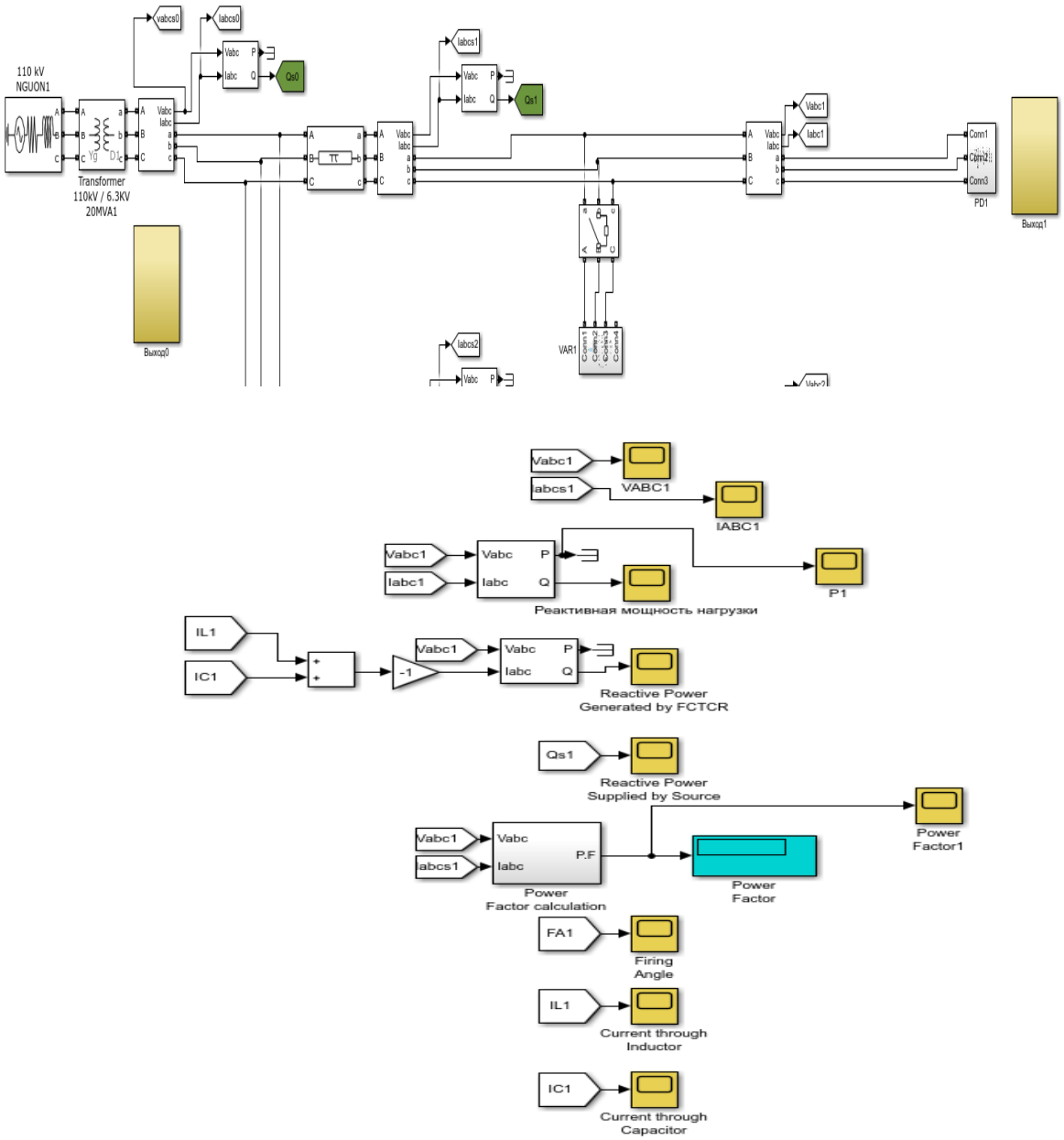


Рисунок 2.8 – Пример подключения измерительных блоков на станции распределения электроэнергии ПД-1

2.2 Результаты моделирования

В таблицах 2.1…2.7 приведены результаты моделирования процессов в системе электроснабжения глиноземного завода. Параметры для модели заданы в соответствии с исходными данными, приведёнными на рисунках 2.2...2.7.

Результаты моделирования на шинах 6 кВ системы электроснабжения глиноземного завода ПД-0 приведеныв таблице 2.1. Показаны формы кривых токов и напряжений, коэффициенты нелинейных искажений (КНИ) по напряжению и току для приведённых кривых,активные и реактивные мощности P, Q, коэффициент мощности cosφ.

Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ станций распределения электроэнергии ПД-1...ПД-6, значения коэффициентов нелинейных искажений по напряжению и току для приведённых кривых показаны в таблицах 2.2...2.7. Для шин 6 кВ распределительных станций ПД-1 до ПД-6 приведены значения активных и реактивных мощностей P, Q, коэффициента мощности cosφ.

Таблица 2.1 – Формы кривых токов и напряжений на шинах бокситового горного завода 6 кВ

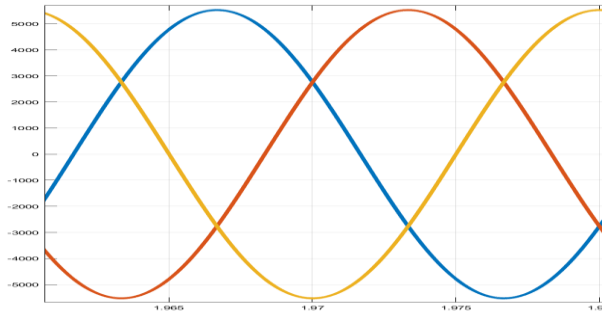
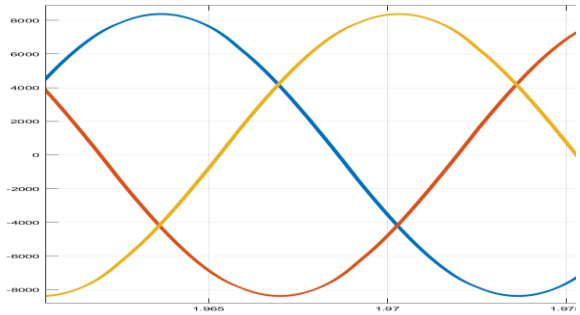
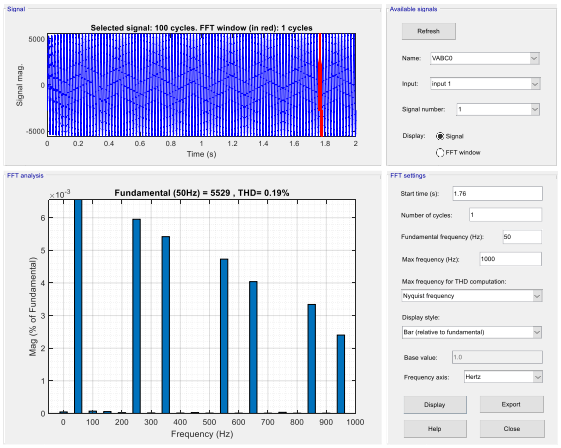
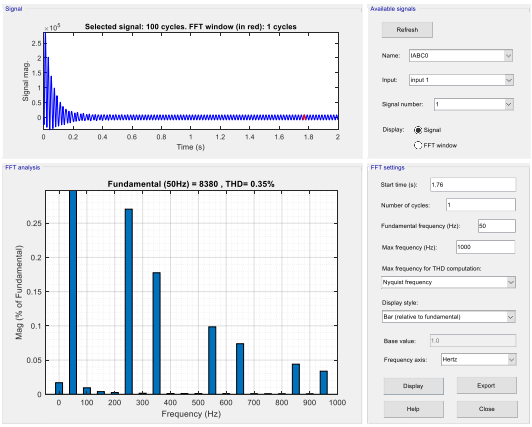
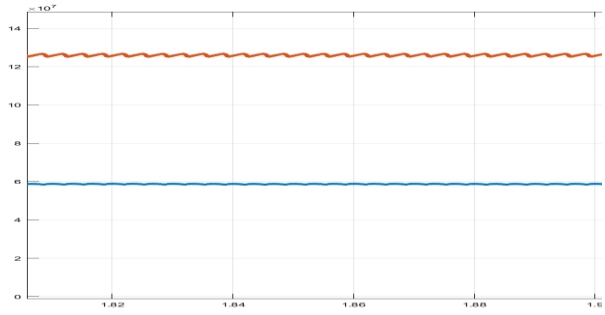
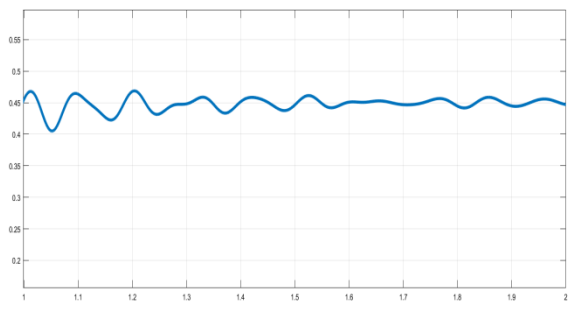
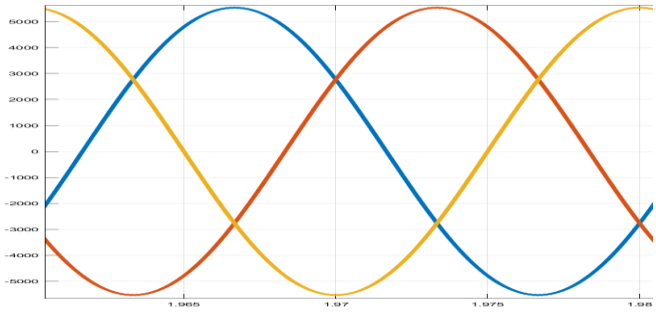
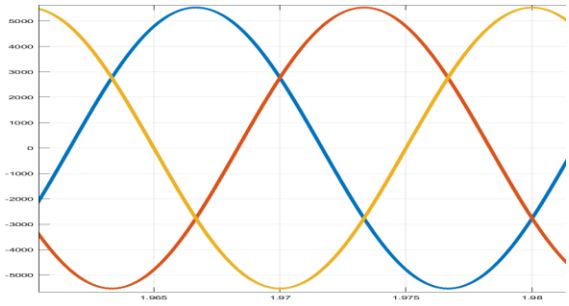
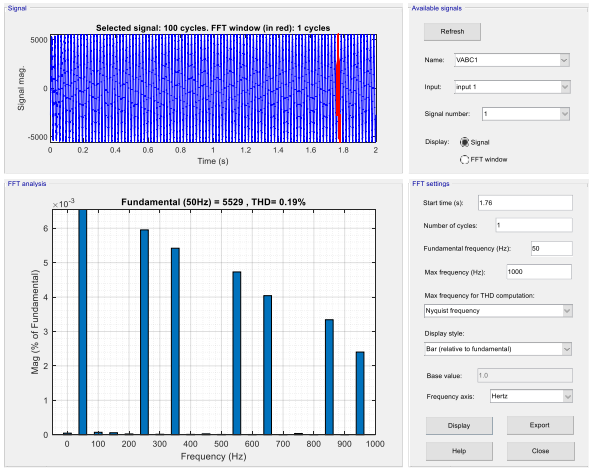
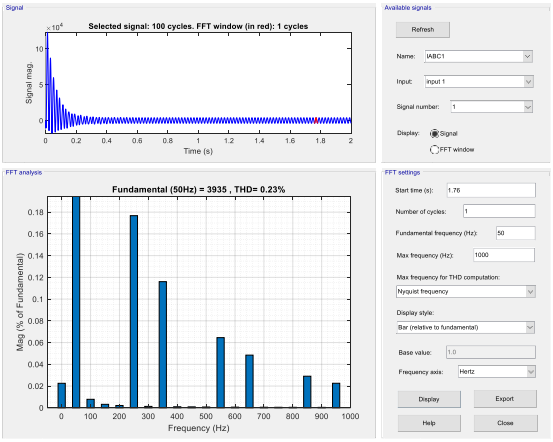
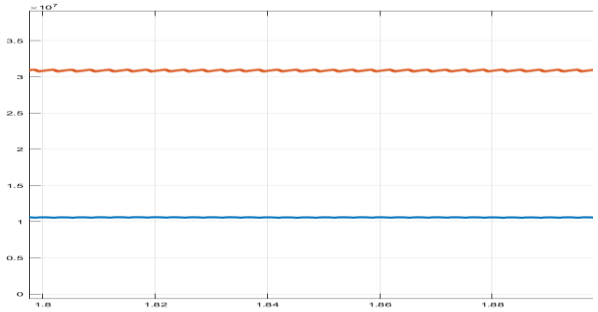
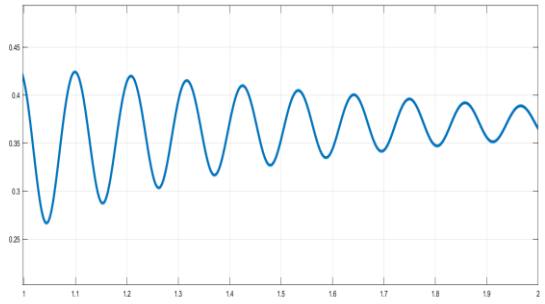
ПД-0Шины завода, 6кВ	
$U_{ПД0}$=6 кВ	$I_{ПД0}$=8,2 кА
	
КНИ$_{U\%}$=0,19	КНИ$_{I\%=}$=0,35
	
$P_{ПД-0}$=58,8МВт, $Q_{ПД-0}$=126МВар	cos(φ)=0,42
	

Таблица 2.2 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ,станции распределения электроэнергии ПД-1

ТаблицаПД-1, 6 кВ	
$U_{ПД-1}$=6 кВ	$I_{ПД-1}$=4 кА
	
$КНИ_{U\%}$=0,19	$КНИ_{I\%}$=0,23
	
$P_{ПД-1}$=10.57МВт, $Q_{ПД1}$=30.8МВар	cos(φ)=0,32
	

Продолжение таблицы 2.2

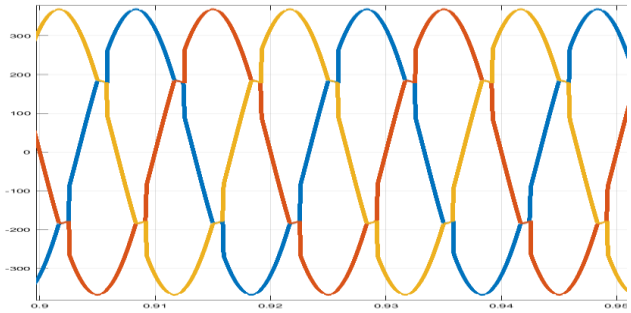
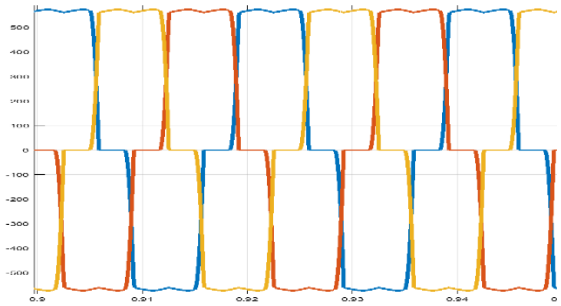
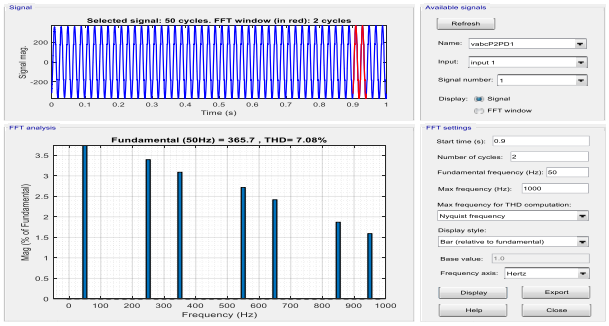
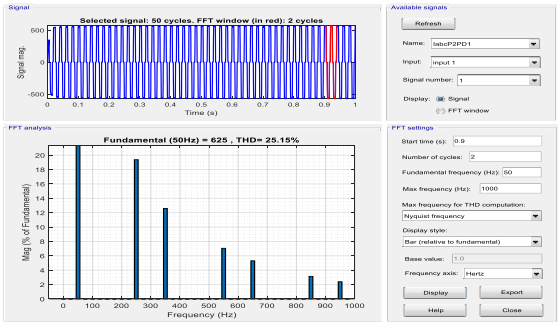
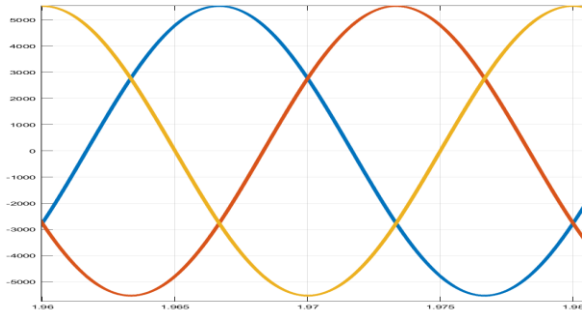
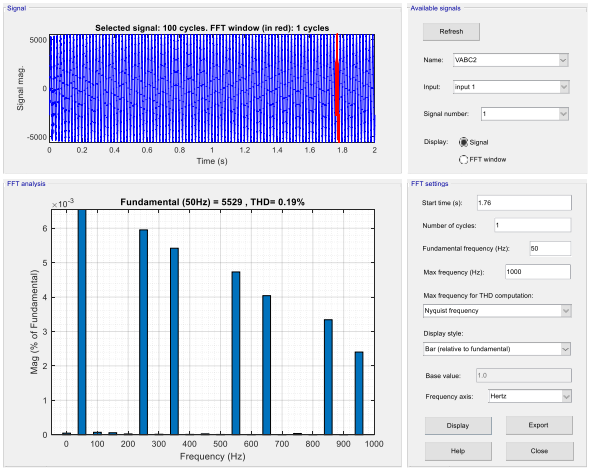
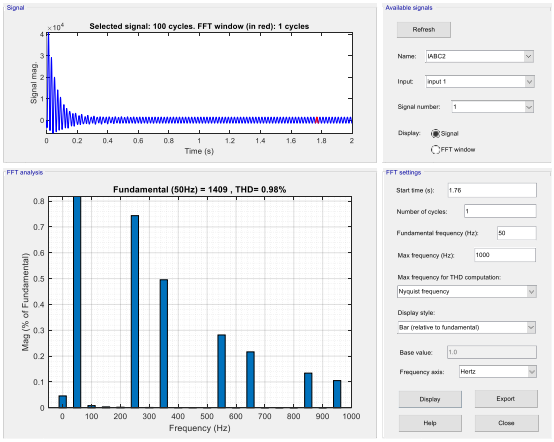
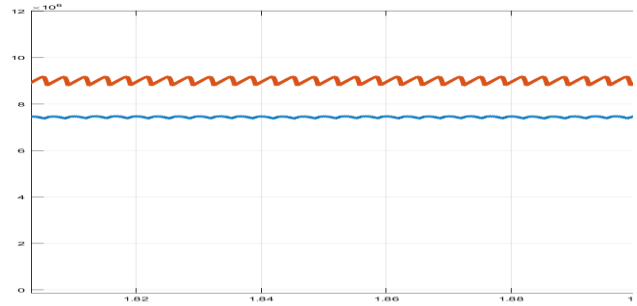
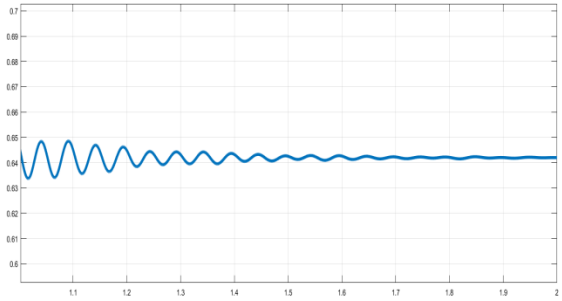
ТаблицаПД-1, 0,4кВ, нелинейная нагрузка Р2	
$U_{Р2\ ПД-1}$=0,4 кВ	$I_{Р2\ ПД-1}$=0,65кА
	
$КНИ_{Р2U\%}$=7,08	$КНИ_{Р2I\%}$=25,15
	

Таблица 2.3 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-2

ТаблицаПД-2, 6 кВ	
$U_{ПД-2}$=6 кВ	$I_{ПД-2}$=1,4 кА
	
КНИ$_{U\%}$=0,19	КНИ $_{I\%}$=0.98
	
P $_{ПД-2}$=7.47МВт, $Q_{ПД-2}$=9МВар	cos(φ)=0,64
	

Продолжение таблицы 2.3

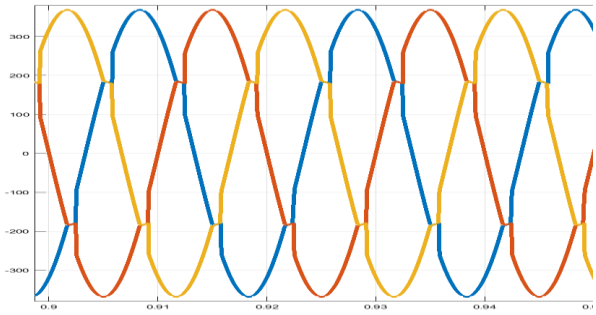
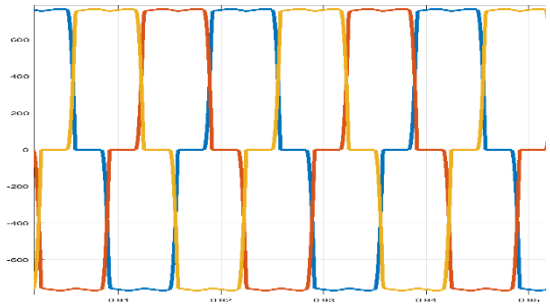
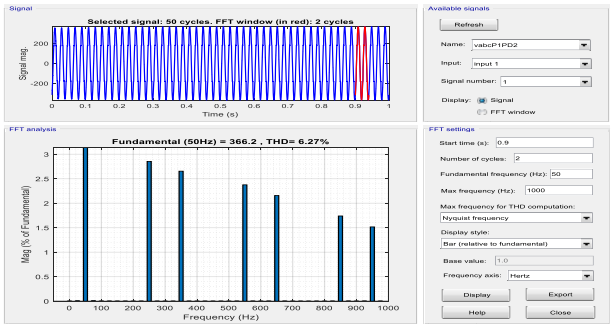
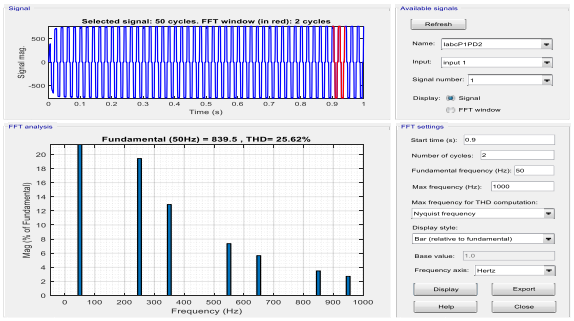
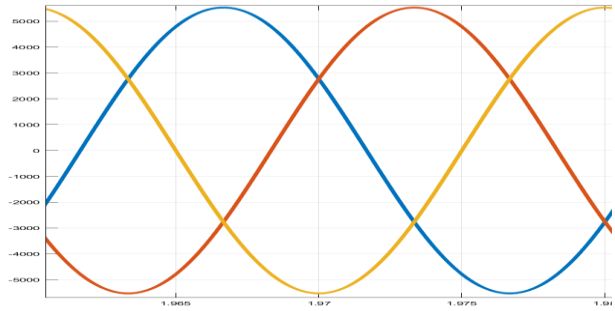
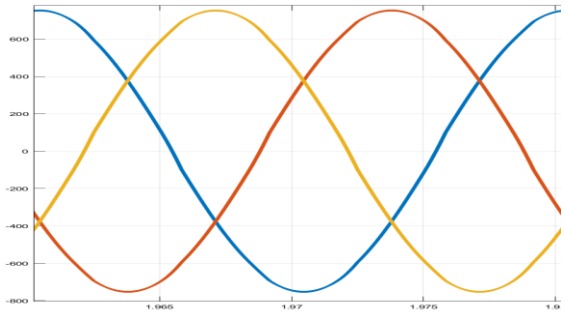
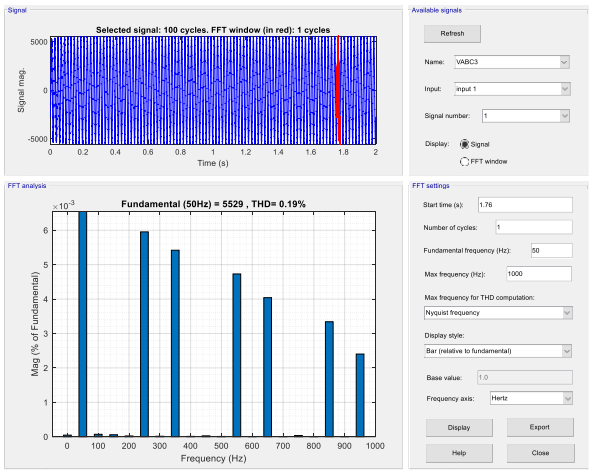
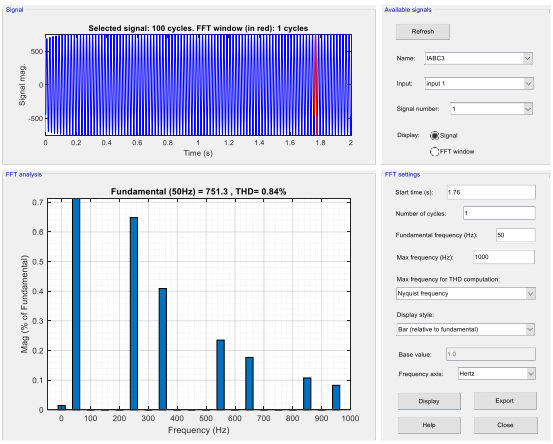
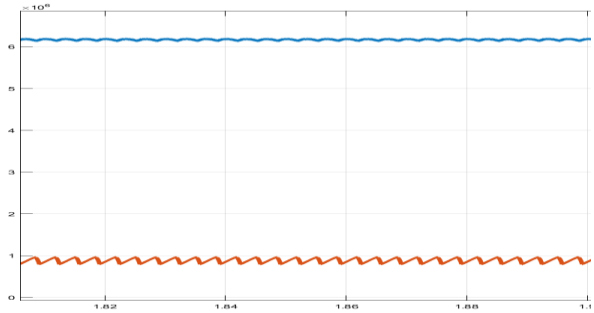
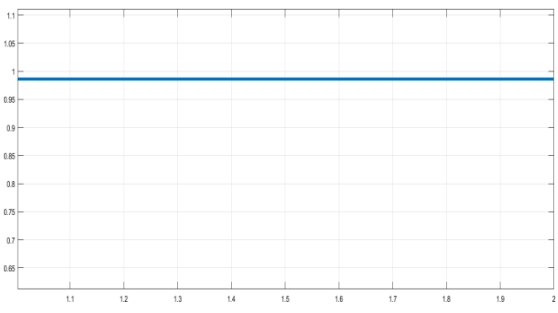
ТаблицаПД-2, 0.4 кВ, нелинейная нагрузка Р1	
$U_{Р1\ ПД-2}$=0,4 кВ	$I_{Р1\ ПД-2}$= 0,7 кА
	
КНИ$_{Р1U\%}$=6,27	КНИ$_{Р1I\%}$=25,52
	

Таблица 2.4 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-3

ТаблицаПД-3, 6кВ	
$U_{ПД-3}$=6 кВ	$I_{ПД-3}$= 0,8 кА
	
КНИ$_{U\%}$=0,19	КНИ$_{I\%}$=0,78
	
P $_{ПД-3}$=6,18МВт, $Q_{ПД-3}$=0,9МВар	cos(φ)=0,99
	

Продолжение таблицы 2.4

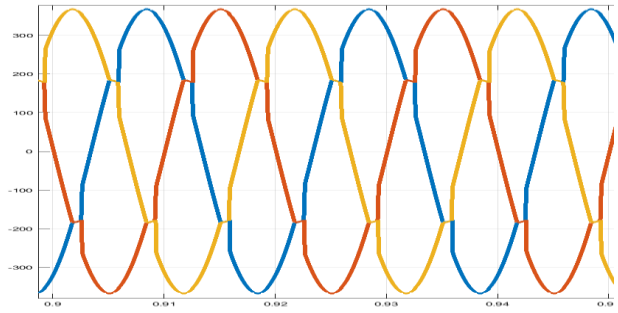
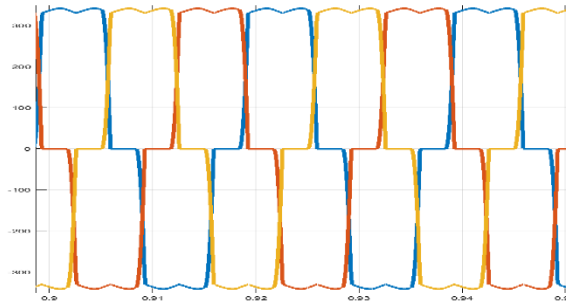
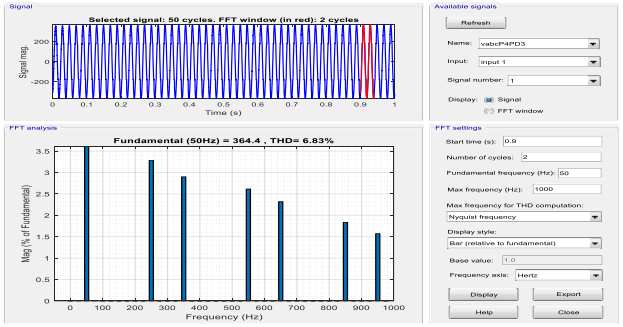
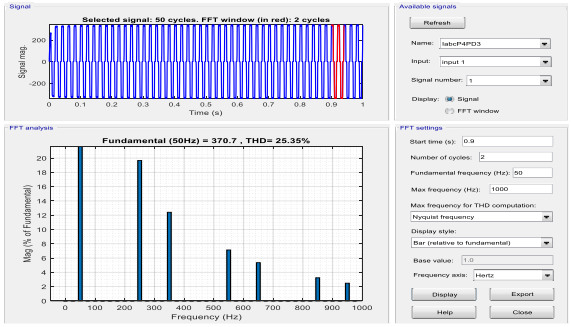
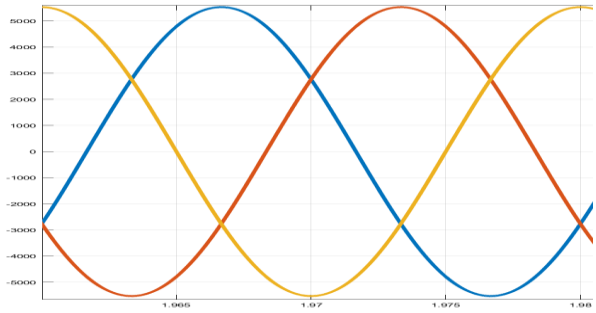
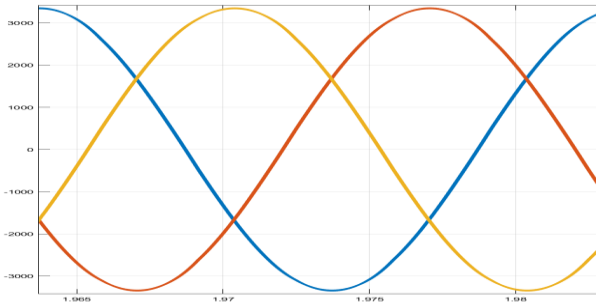
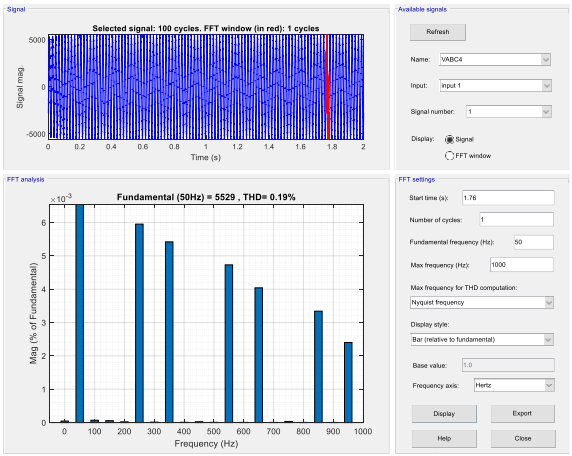
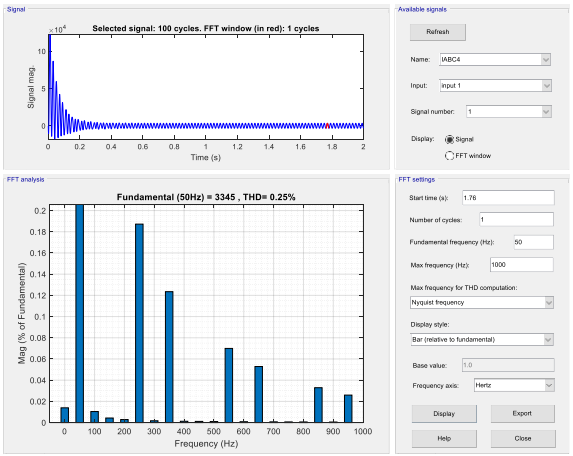
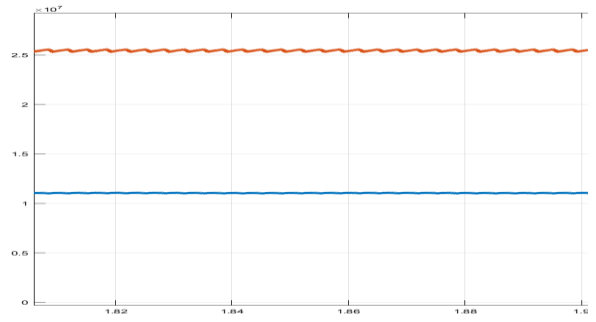
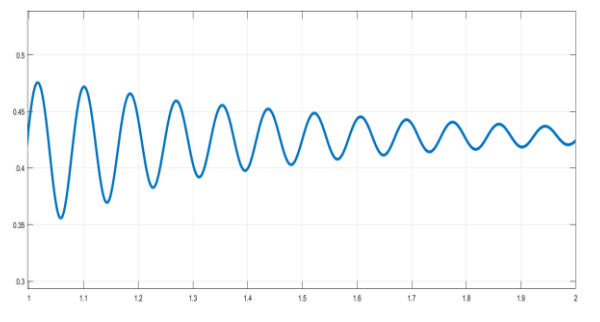
Таблица ПД-3, 0,4 кВ, нелинейная нагрузка Р4	
$U_{Р4\ ПД-3}$=0,4 кВ	$I_{Р4\ ПД-3}$=0,33 кА
	
$КНИ_{Р4U\%}$=6,83	$КНИ_{Р4I\%}$=25,35
	

Таблица 2.5 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-4

ТаблицаПД-4, 6 кВ	
$U_{ПД-4}$ =6 кВ	$I_{ПД-4}$= 3,4 кА
	
$КНИ_{U\%}$=0,19	$КНИ_{I\%}$=0,25
	
$P_{ПД-4}$=11,06МВт, $Q_{ПД-4}$=25.4МВар	cos(φ)=0,4
	

Продолжение таблицы 2.5

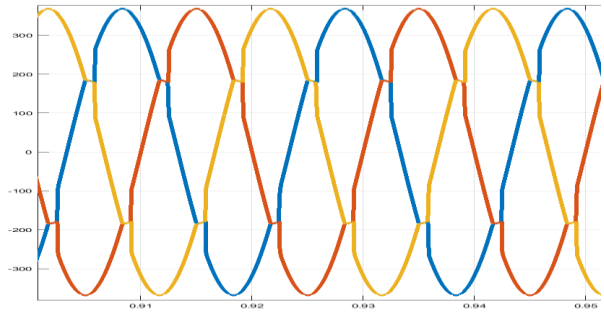
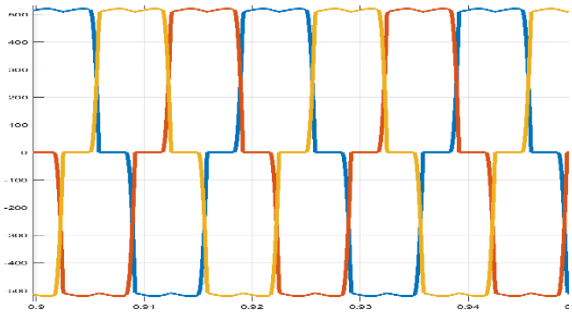
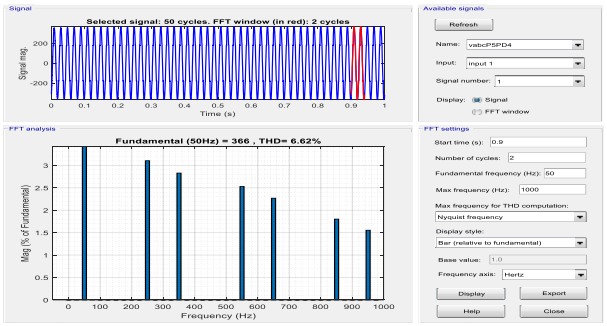
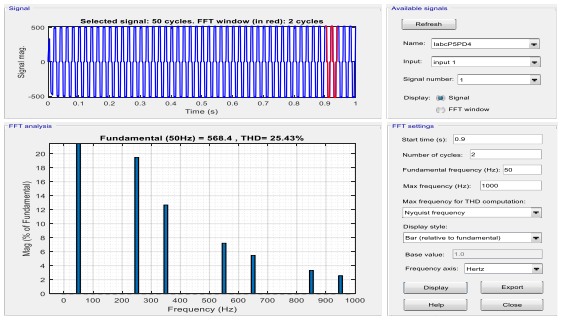
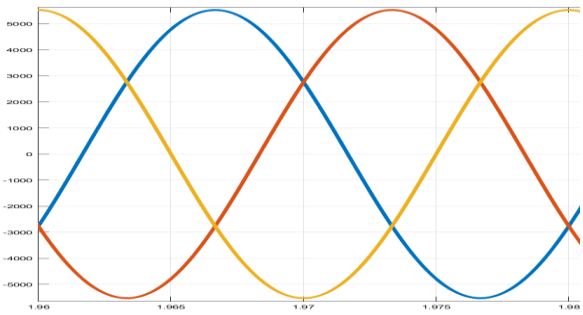
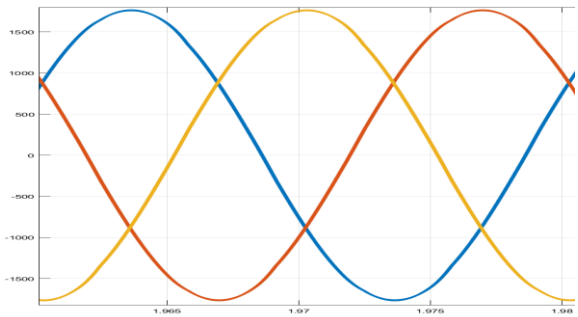
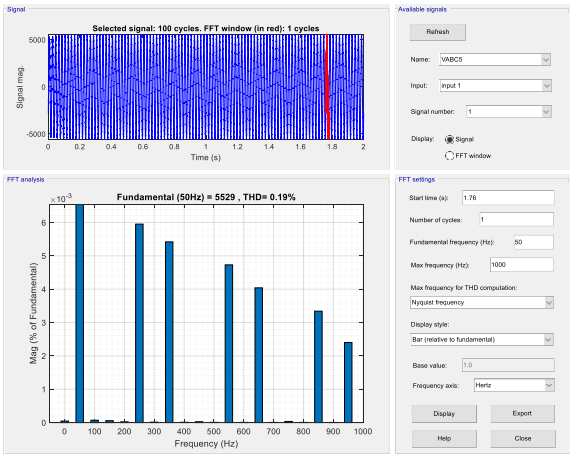
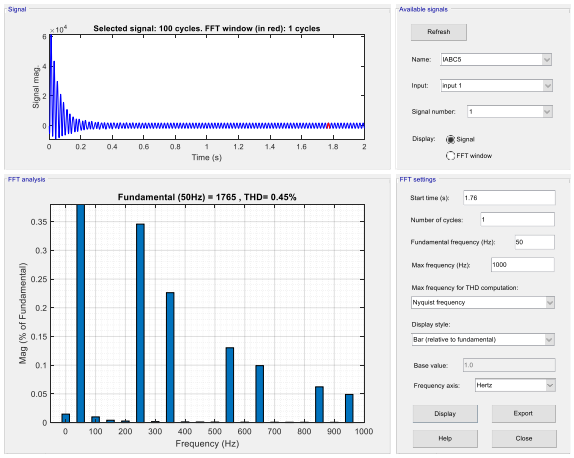
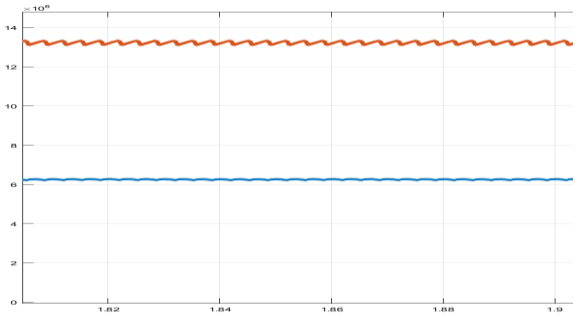
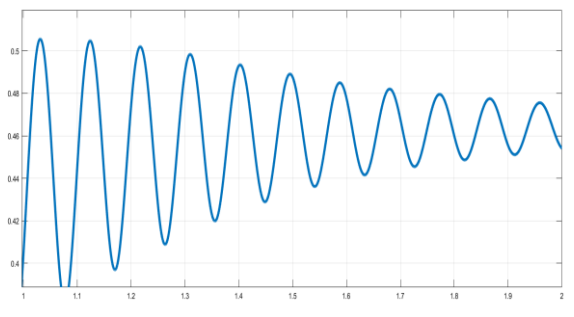
Таблица ПД-4, 0,4 кВ, нелинейная нагрузка Р5	
$U_{P5ПД-4}$=0,4 кВ	$I_{P5ПД-4}$=0,52 кА
	
$КНИ_{P5U\%}$=6,62	$КНИ_{P5I\%}$=25,43
	

Таблица 2.6 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6кВ и 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-5

ТаблицаПД-5, 6 кВ	
$U_{ПД-5}$=6 кВ	$I_{ПД-5}$=1,8 кА
	
КНИ$_{U\%}$=0,19	КНИ $_{I\%}$=
	
$P_{ПД-5}$=6.27МВт, $Q_{ПД5}$=13.2МВар	cos(φ)=0,43
	

Продолжение таблицы 2.6

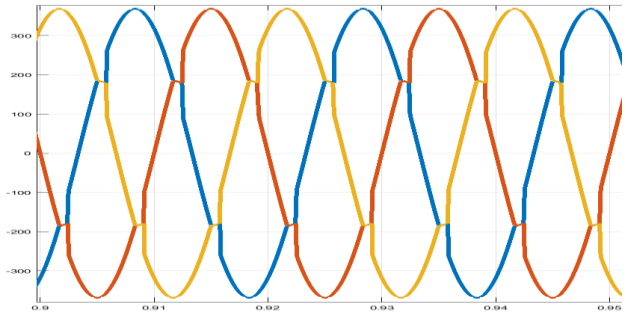
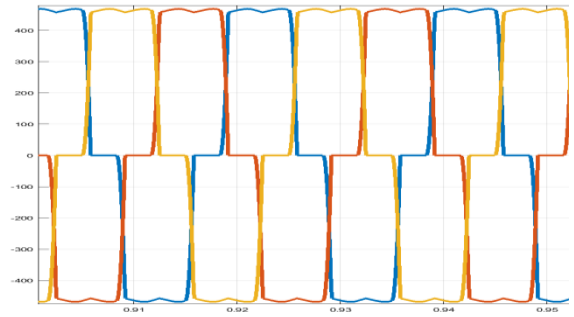
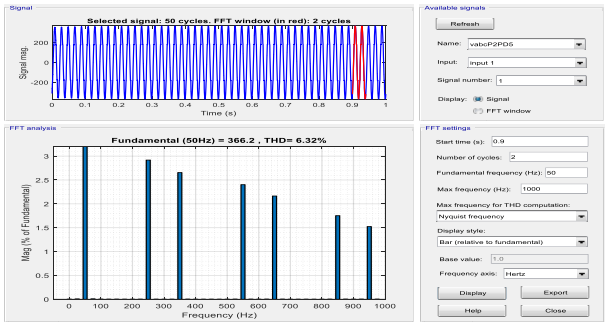
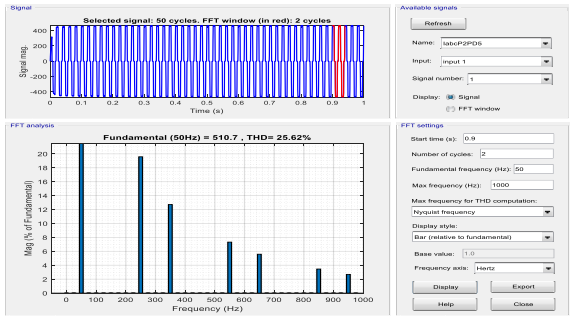
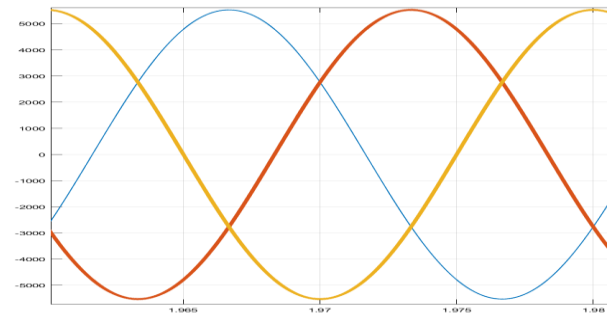
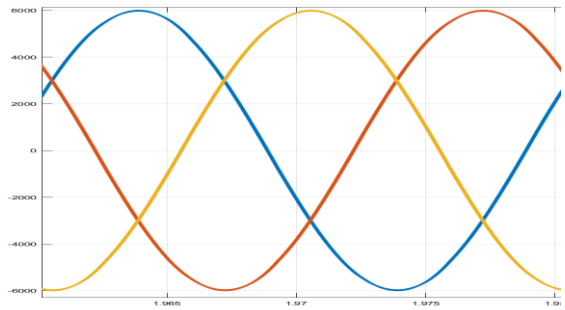
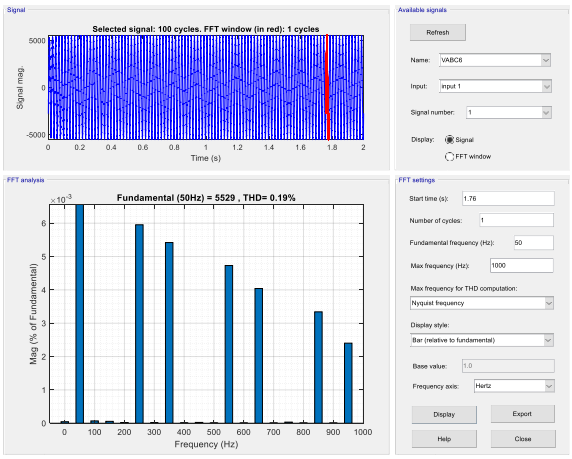
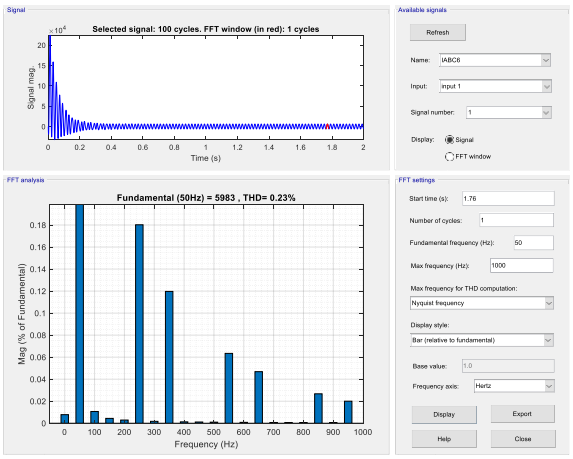
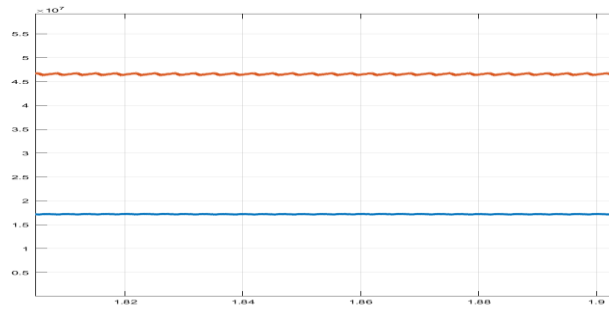
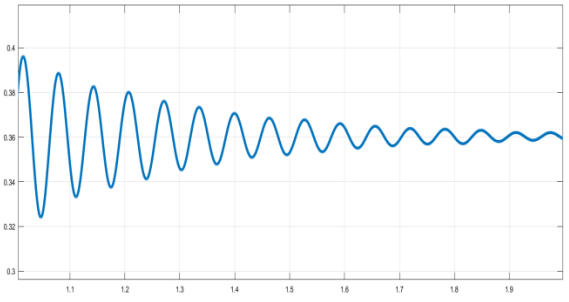
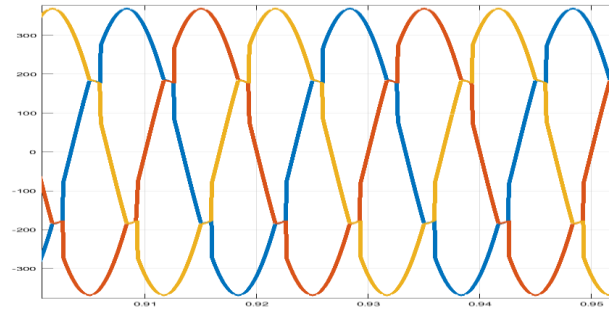
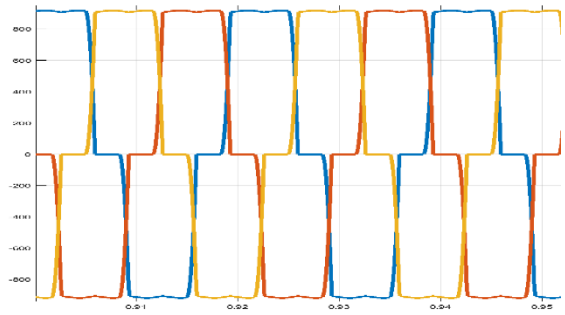
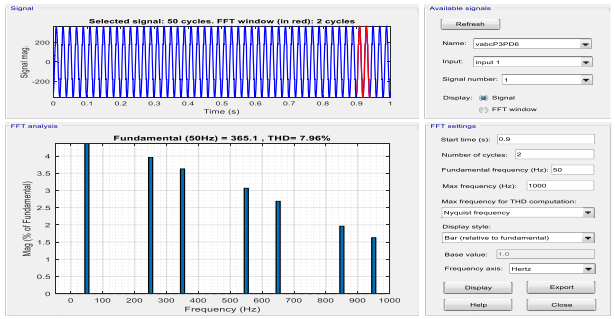
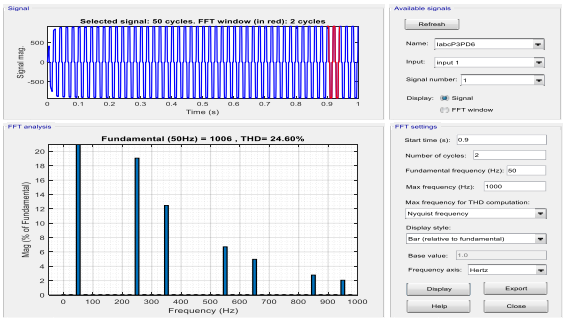
ТаблицаПД-5, 0,4 кВ, нелинейная нагрузка Р2	
$U_{P2ПД-5}$=0,4 кВ	$I_{P2\ ПД-5}$=0,48 кА
	
$КНИ_{P2U\%}$=6,32	$КНИ_{P2I\%}$=2,62
	

Таблица 2.7 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-6

ТаблицаПД-6, 6 кВ	
$U_{ПД-6}$ = 6 кВ	$I_{ПД-6}$ =6кА
	
$КНИ_{U\%}$=0,19	КНИ $_{I\%}$=0,23
	
$P_{ПД-6}$=17,25МВт, $Q_{ПД4}$=46,5 МВар	cos(φ)=0,35
	

Продолжение таблицы 2.7

ТаблицаПД-6, 0.4кВ, нелинейная нагрузка Р3	
$U_{Р3\ ПД-6}$= 0.4кВ	$I_{Р3\ ПД-6}$=0.87кА
	
$КНИ_{Р3U\%}$=7,96	$КНИ_{Р3I\%}$=24,60
	

Результаты моделирования, приведённые в таблицах 2.1…2.7, обобщены в таблице 2.8. В таблице 2.8 приведены коэффициенты нелинейных искажений по напряжению и току на шинах ПД-0 напряжением 6 кВ системы электроснабжения глиноземного завода и на шинах напряжением 6 и 0,4 кВ станций распределения электроэнергии ПД-1...ПД-6, полученные в результаты моделирования процессов в системе электроснабжения глиноземного завода. Также в таблице приведены значения коэффициента мощности на шинах ПД-0...ПД-6 напряжением 6 кВ.

Таблица 2.8 – Коэффициенты нелинейных искажений по напряжению и току на шинах напряжением 6 кВ и 0,4 кВи коэффициент мощности на шинах напряжением 6 кВ

6 кВ			
	$КНИ_{U\%}$	$КНИ_{I\%}$	cos(ϕ)
ПД-0	0,19	0,35	0,42
ПД-1	0,19	0,23	0,32
ПД-2	0,19	0,98	0,64
ПД-3	0,19	0,84	0,99
ПД-4	0,19	0,25	0,4
ПД-5	0,19	0,45	0,43
ПД-6	0,19	0,23	0,25

0,4 кВ		
	$КНИ_{U\%}$	$КНИ_{I\%}$
ПД-1	7,08	25,15
ПД-2	6,27	25,52
ПД-3	6,83	25,35
ПД-4	6,62	25,43
ПД-5	6,32	25,62
ПД-6	7,96	24,60

Анализ результатов, приведённых в таблицах 2.1…2.8, показывает, что наличие нелинейных нагрузок приводит к значительным искажениям синусоидальных форм напряжений и токов на шинах напряжением 0,4 кВ по сравнению с шинами напряжением 6 кВ. Этот вывод подтверждается также сравнением форм графиков токов на стороне 6 кВ и 0,4 кВ. Видно, что формы токов на стороне напряжения 0,4 кВ существенно отличаются от синусоидальных по сравнению с формой тока на стороне напряжения 6 кВ.

Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шинах низкого напряжения 0,4 кВ превышают допустимый предел по сравнению с международным стандартом IEEE Std 519-2014 [18], ($КНИ_{U\%} \leq 5$, $КНИ_{I\%} \leq 20$). Поэтому для компенсации высших гармоник тока и напряжения необходимо применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии [19].

Перспективным средством повышения качества электроэнергии является применение активных фильтров гармоник (АФГ). Работа АФГ основана на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерации в сеть гармоник тока с противоположной фазой. Как результат, высшие гармонические составляющие

тока компенсируются в точке подключения АФГ и не распространяются от нелинейной нагрузки в сеть [20].

Наличие нелинейной нагрузки приводит также к значительному снижению коэффициента мощности на шинах 6 кВ, что подтверждается результатами моделирования. Коэффициент мощности находится в диапазоне от 0,64 до 0,32 за исключением подстанции ПД-3. Низкий коэффициент мощности подразумевает необходимость компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ за исключением подстанции ПД-3 [21-23].

Выводы

1. Разработаны модели для имитационного моделирования системы электроснабжения глиноземного завода Лам Донг, которые позволили провести исследования режимов работы системы и отдельных ее компонентов. Проанализированы результаты моделирования с целью выработки решений по улучшению качества электрической энергии.

2. На шинах низкого напряжения 0,4 кВ под воздействием нелинейной нагрузки форма напряжения и тока существенно деформируется, что влияет на качество электроэнергии. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шинах низкого напряжения 0,4 кВ превышают допустимый предел по сравнению с международным стандартом IEEE Std 519-2014 для допустимого предела гармоник [18].

3. Для компенсации высших гармоник тока и напряжения необходимо применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии, например, активных фильтров гармоник.

4. На шинах 6 кВ за исключением подстанции ПД-3 коэффициент мощности находится в диапазоне от 0,64 до 0,32. Низкий коэффициент мощности подразумевает необходимость компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ за исключением подстанции ПД-3.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ГАРМОНИК ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

До недавнего времени основным решением проблемы повышения качества электроэнергии (КЭ) в системе электроснабжения, содержащей электроприводы с полупроводниковыми преобразователями, являлось применение фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), состоящих из набора параллельно включенных фильтров, которые в простейшем случае состоят из последовательно включенных конденсаторов и реакторов [24-25].

В настоящее время перспективным средством повышения КЭ являются активные фильтры гармоник (АФГ), в которых применяются запираемые полупроводниковые приборы. При соответствующем законе управления, осуществляется генерирование управляемых высших гармоник в противофазе с фактическими гармониками полупроводниковых преобразователей, что позволяет получить практически синусоидальную форму напряжения сети [26-27].

3.1 Гибридная топология многоуровневого инвертора

На рисунке 3.1 показана блок-схема базового активного фильтра гармоник, который подключен параллельно с системой шин низкого напряжения 0,4 кВ с целью фильтрации высших гармоник напряжения и тока, вызванных нелинейной нагрузкой. Нелинейными нагрузками в основном являются полупроводниковые преобразователи частоты для регулирования скорости электродвигателей переменного тока для водяных насосов, воздуходувок, конвейеров бокситовой руды, транспортных подъемных машин [28-29].

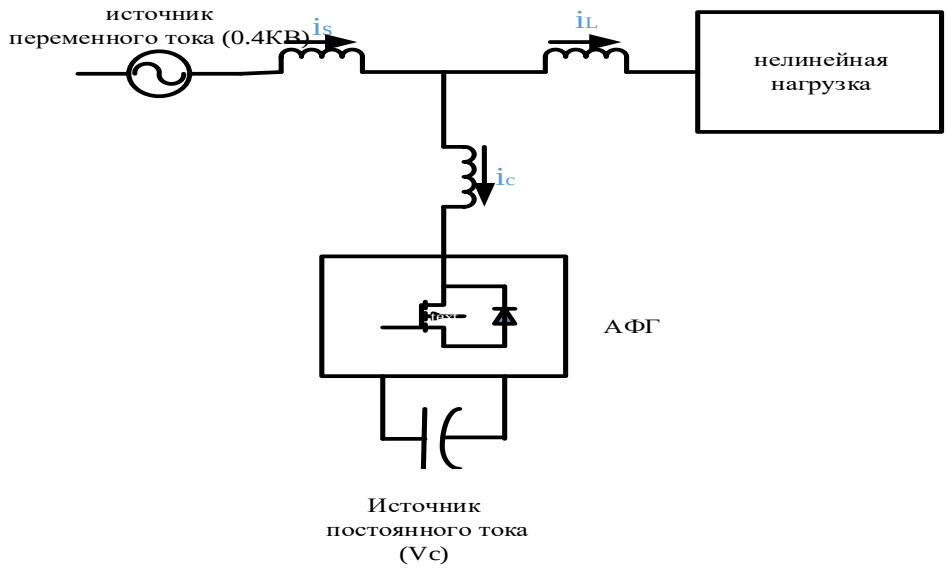


Рисунок 3.1 – Блок-схема базового фильтра активной мощности

В данной работе разработана схема активного фильтра гармоник на основе гибридной топологии многоуровневых инверторов,позволяющая обеспечить нормативные показатели качества электроэнергии для условий системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам.

Одним из достоинств многоуровневого инвертора по сравнению с двухуровневым заключается в том, что в схеме возможно получить высокое напряжение на выходе используя стандартные низковольтные полупроводниковые элементы, такие как IGBT- модули, не прибегая к применению высоковольтных дорогостоящих полупроводников. Другим преимуществом многоуровневого инвертора является многоступенчатость кривой выходного напряжения, что позволяет уменьшить содержание высших гармоник в кривой выходного напряжения. С увеличением количества уровней уменьшаются ступени выходного напряжения и улучшается его качество [30].

Многоуровневые топологии можно разделить на три основные категории: с фиксированной нейтральной точкой, с плавающими конденсаторами и многоуровневый каскадный инвертор [31-32].

С увеличением количества уровней в инверторе усложняется схема, увеличивается количество полупроводниковых ключей. Поэтому представляют

интерес топологии, которые позволяют получить увеличение уровней напряжения с уменьшением количества полупроводников, повысить производительность и надежность системы [33].

Гибридная топология заключается в том, что в гибридном каскадном инверторе несколько ячеек инвертора разных типов соединены последовательно в каждой фазе. Эти инверторные ячейки обычно представляют собой стандартные низкоуровневые инверторы, такие как однофазный инвертор по схеме Н-моста, двухуровневый инвертор и трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой (NPC) [34].

Иными словами, гибридные топологии– это топологии многоуровневых инверторов, основанные на применении существующих топологий для отдельных ячеек инвертора. Такое построение многоуровневого инвертора позволяет уменьшить содержание высших гармоник в выходном напряжении без увеличения количества силовых устройств [35], [36], [37], [38], [39].

Каждый силовой модуль этой гибридной структуры может работать при определенном напряжении постоянного тока и частоте переключения, что позволяет повысить эффективность работы инвертора. Для управления силовыми модулями используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Преимущества использования ШИМ для управления инвертором:

а) работа с более низкими частотами преобразования [40-41];

б) селективное исключение низкочастотных составляющих в спектре выходного напряжения [42-43];

в) минимизация коэффициента гармоник тока [44], и напряжения [45];

г) минимизация потерь в двигателе [46];

д) минимизация среднеквадратичного отклонения напряжения от желаемой формы [47].

Топология, предлагаемая в этой работе, представляет собой гибрид трехуровневого инвертора с фиксированной нейтральной точкой (NPC) и двухуровневого инвертора (Н-мост), соединенных последовательно [20], [48-49], [50].

Схема однофазной двухуровневой ячейки H-моста показана на рисунке 3.2.

В этой схеме выходное напряжение Va имеет два значения: +VDC и -VDC. Для получения уровня напряжения +VDC должны быть включеныключи S1 и S4; для получения уровня напряжения -VDC должны быть включеныключи S2 и S3.

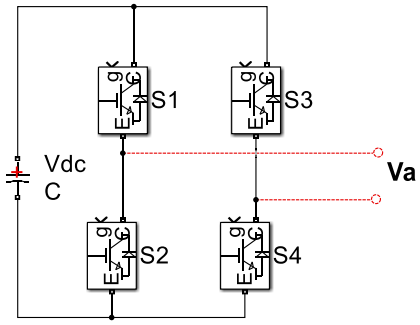


Рисунок 3.2 – Топология однофазной двухуровневой ячейки H-моста

Трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой для случая одной фазы показан на рисунке 3.3.

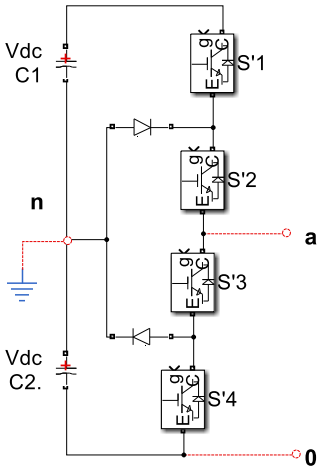


Рисунок 3.3 – Топология однофазной трехуровневой инверторной цепи с фиксированной нейтральной точкой

Схема содержит два последовательно соединенных конденсатора C1 и C2. Средняя точка двух конденсаторов n может быть определена как нейтральная точка. Выходное напряжение Van между точками a и n имеет три состояния: -VDC, 0 и +VDC. Для получения уровня напряжения +VDC должны быть включены ключи S'1 и S'2; для получения уровня напряжения -VDC должны быть

включены ключи S3 'и S4'; для получения уровня напряжения 0 должны быть включены S2’ и S3’.

На основе однофазных схем, приведённых на рисунках 3.2 и 3.3 получим трехфазную структуру гибридного инвертора, показанную на рисунке 3.4 [20].

В каждой фазе имеется восемь полупроводниковых ключей. Управляющие импульсы на 8 ключей фазыA, фазы B и фазы C подаются со сдвигом фазы на 120 эл. градусов к соответствующей клемме затвора.

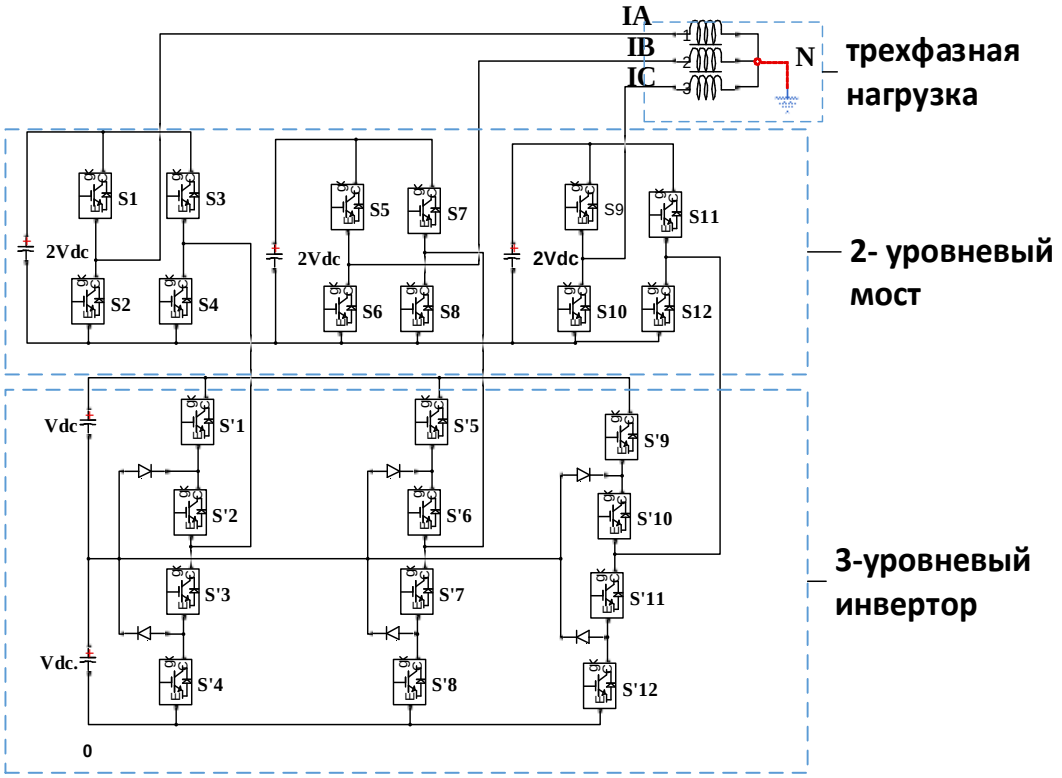


Рисунок 3.4 – Трехфазная структура гибридного инвертора, основанная на разработанной топологии

В таблице 3.1 приведены состояния ключей S и S’ для одной фазы напряжения U_{0A} нагрузки инвертора в случае разработаной топологии гибридного инвертора.

На рисунке 3.5 показаны графики последовательности состояния ключей S и S’ во времени и соответствующие им уровни напряжения нагрузки для одной фазы напряжения U_{0A} в случае разработаной топологии гибридного инвертора.

Таблица 3.1 – Состояния ключей S и S’ для одной фазы напряжения нагрузки инвертора в случае гибридного инвертора

N_0	Выходное напряжение 1 фазы(U_{0A})	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S’1**	**S’2**	**S’3**	**S’4**
1	4Vdc	1	0	0	1	1	1	0	0
2	3Vdc	1	0	0	1	0	1	0	0
3	2Vdc	0	1	0	1	1	1	0	0
4	Vdc	0	1	0	1	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0	0	1	1
6	-Vdc	0	1	1	0	0	1	0	0
7	-2Vdc	0	1	1	0	0	0	1	1
8	-3 Vdc	1	0	0	1	0	1	0	1
9	-4 Vdc	1	0	0	1	0	0	1	1

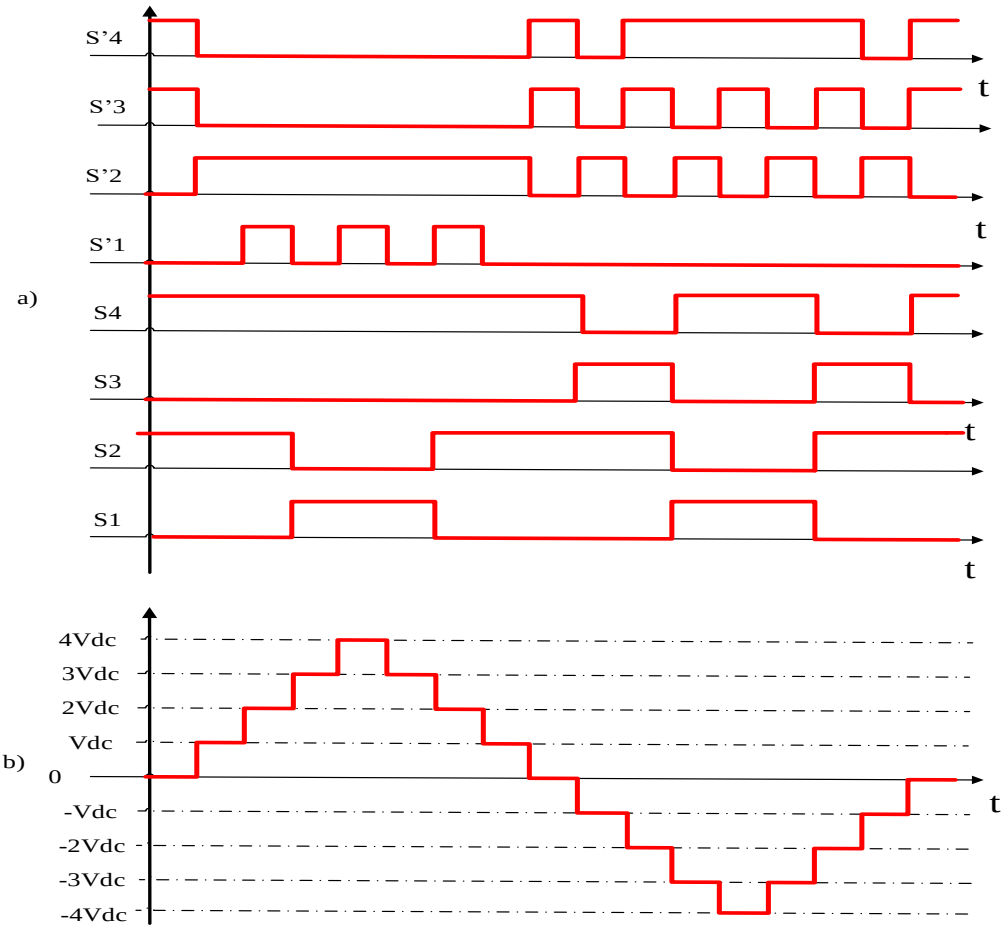


Рисунок 3.5 – Последовательность состояния ключей S и S’ во времени (a) и соответствующие им уровни напряжения нагрузки для одной фазы U_{0A} в случае гибридного инвертора (b)

Разработанная топология гибридного инвертора позволяет получить 9 значений фазного напряжения нагрузки и тем самым получить кривую выходного напряжения близкую к синусоиде. Это делает возможным снижение частоты переключения и снижения скачков напряжения на силовых компонентах.

Алгоритм управления инвертором должен обеспечивать поддержание баланса источников напряжения постоянного тока и устранять генерацию синфазного напряжения [39, 51], под которым понимается напряжение между нейтралью источника постоянного тока (точка 0) и нейтралью нагрузки (точка N «земля» нагрузки).

Для управления гибридным инвертором в составе активного фильтра гармоник в работе предложен метод несущей [52-54], [55].

Метод широтно-импульсной модуляции для разработаной схемы позволяет уменьшить синфазное напряжение, коммутационные потери, минимизировать гармоники тока и гармоники напряжения [45, 56], получить близкую к синусоидальной волну напряжения и волну тока.

На рисунке 3.6 показана схема подачи управляющих сигналов на полупроводниковые ключи, где ξ_x...(x= фаза a, фаза b, фаза c) – это управляющий сигнал. Данный управляющий сигнал модулируется в соответствии с алгоритмом, приведённым на рисунке 3.7, и далее сравнивается с треугольной несущей для генерации управляющих импульсов, которые включают или выключают ключи на IGBT-транзисторах (S…и S'…).

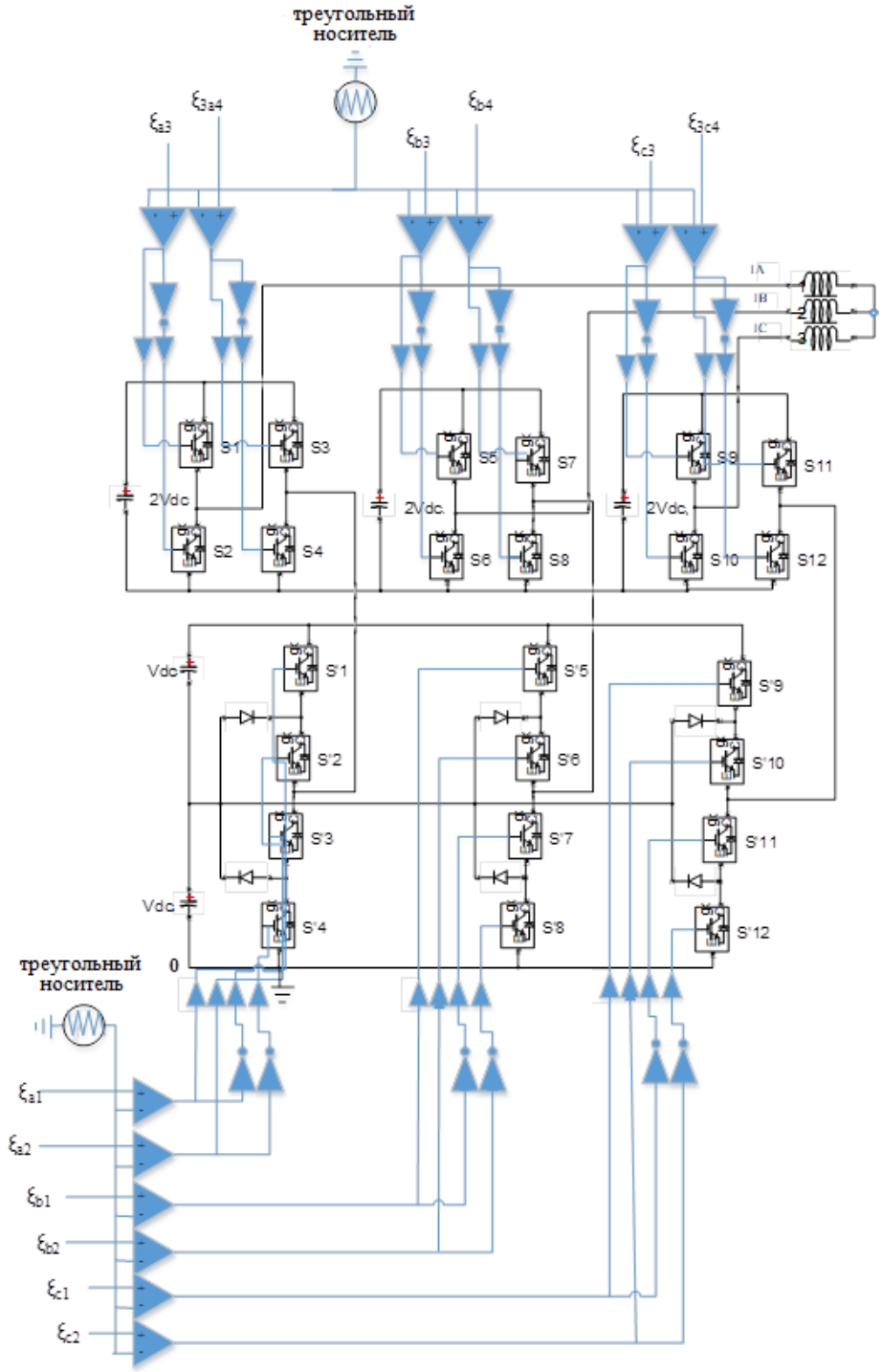


Рисунок 3.6 – Схема подачи управляющих сигналов ξx...на полупроводниковые ключи (IGBT-транзисторы)

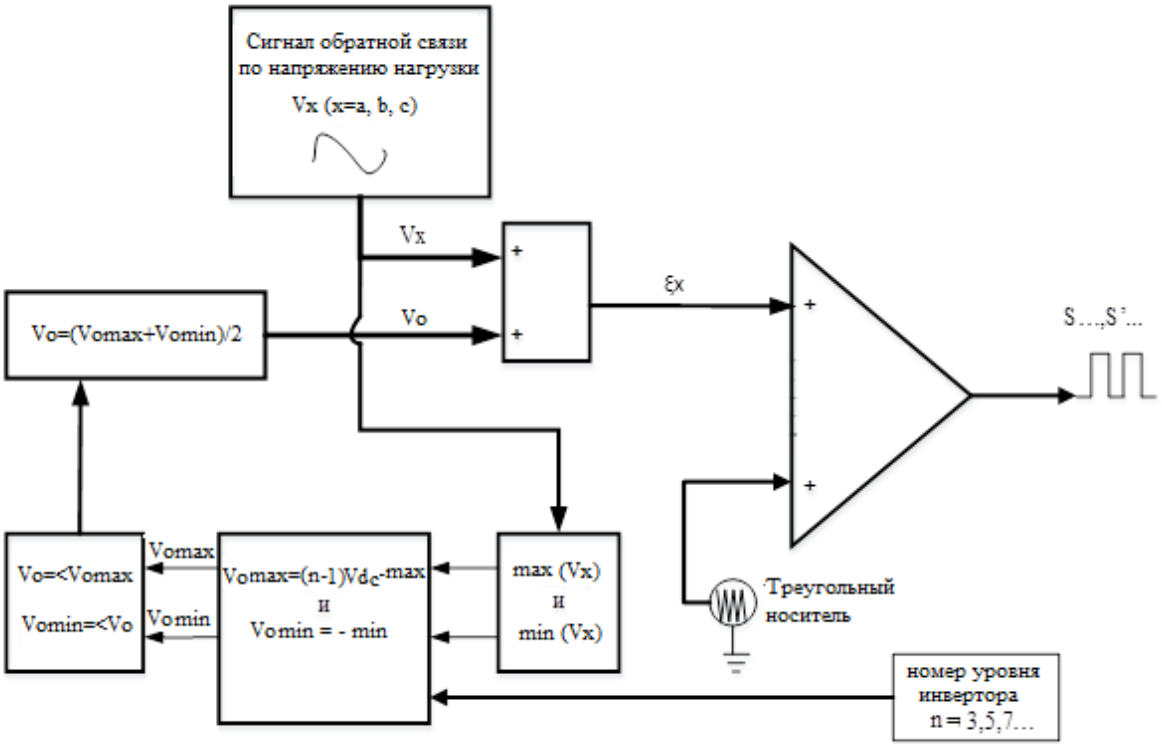


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма ШИМ на основе несущей для гибридного каскадного инвертора

На рисунке 3.7 показана блок-схемы алгоритма ШИМ, на основе которого осуществляется модуляция управляющих сигналов ξx и затем сравнениеих с треугольной несущей для генерации последовательности импульсов включающих или отключающих 24 полупроводниковых ключа (S...,S'...) в соответствии с таблицей 3.1 и рисунком 3.5.

На блок-схеме алгоритма ШИМ сигнал V_x (x=a,b,c) является напряжением обратной связи от измерительного трансформатора инвертора [51].

Сигнал обратной связи по напряжению нагрузки V_x (изменяется в зависимости от нагрузки, колеблющейся во времени) преобразуется в сигнал ξx, затем ξx сравнивается с треугольной несущей (фиксированная установка) для переключения полупроводниковых приборов IGBT [57].

Сигнал обратной связи по напряжению нагрузки равен:

$$V_a = V_A \cos\theta$$
$$V_b = V_B \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.1)$$
$$V_c = V_C \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})$$

Управляющий сигнал ξx ($0 \le \xi_x \le 1$) равен:

$$\xi x = V_x + V_{см}; \quad (3.2)$$

где сигнал $V_{см}$ – синфазное смещение напряжения.

Добавление сигнала $V_{см}$ к управляющему напряжению V_x позволяет получить сбалансированное, близкое к синусоиде выходное напряжение инвертора U_{0A}.

Значение $V_{см}$ находится следующим образом.

Определимвеличины max и min как максимальное и минимальное значения для трехфазных напряжений:

$$\max = max(V_a, V_b, V_c); \quad (3.3)$$

$$\min = min(V_a, V_b, V_c); \quad (3.4)$$

Запишем неравенство

$$V_{смMin} \le V_{см} \le V_{смMax}; \quad (3.5)$$

где

$$V_{смMax} = (n-1)V_{dc} - \max; \quad (3.6)$$

$$V_{смMin} = -\min; \quad (3.7)$$

n – номер уровня инвертора;

V_{dc} –напряжение конденсатора постоянного тока.

Отсюда находим $V_{см}$

$$V_{см} = \frac{(V_{смMax} + V_{смMin})}{2}; \quad (3.8)$$

Номер уровня инвертора n=3,5,7…, так как многоступенчатая гибридная инверторная структура генерируют уровни напряжения n > 3, и не содержит четные числа уровней напряжения [58, 59].

На рисунке 3.8 приведены формы выходного напряжения инвертора U_{0A} с одинаковой нагрузкой при отсутствии сигнала $V_{см}$ (рисунок 3.8, а) и при его добавлении к управляющему напряжению V_x в соответствии с алгоритмом на рисунке 3.7 (рисунок 3.8, б). Сравнение выходных напряжений инвертора для этих двух случаев, позволяет сделать вывод о том, что добавление сигнала $V_{см}$ приводит к сбалансированному выходному напряжению, форма которого близка к синусоидальной.

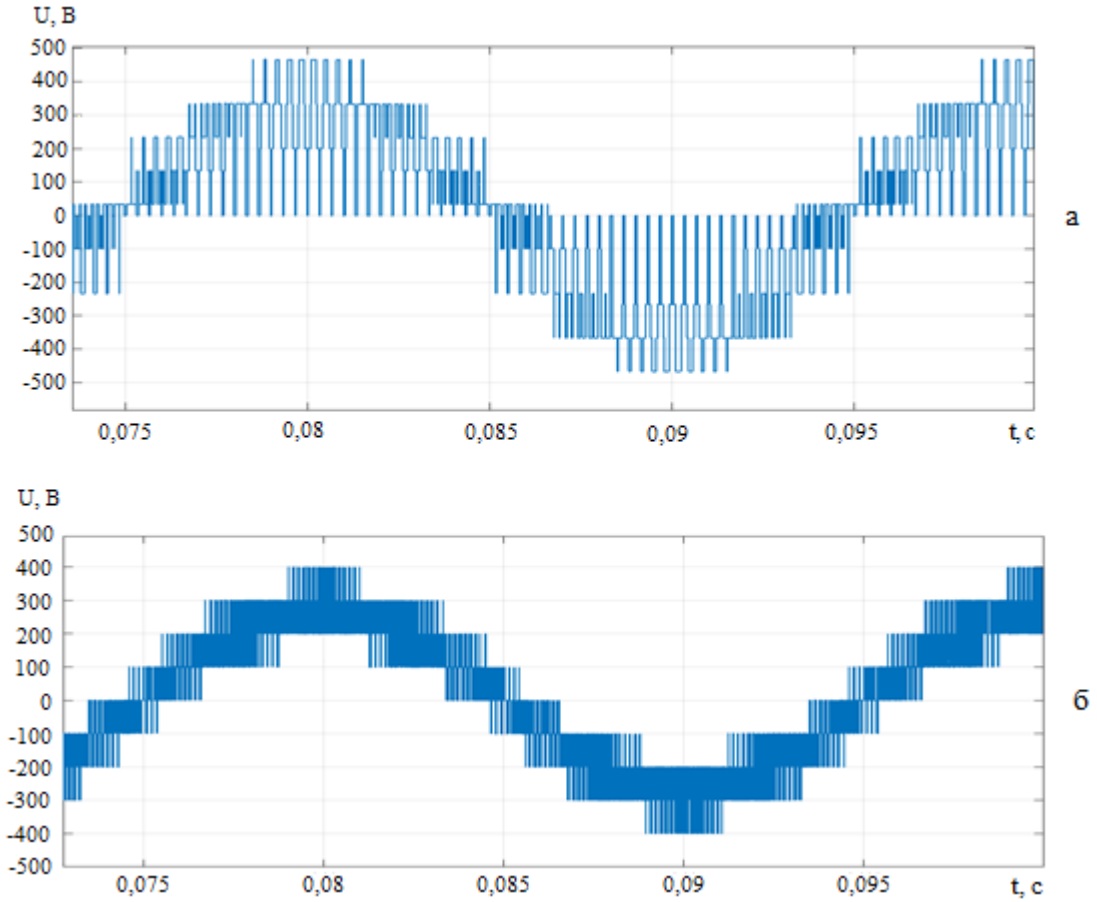


Рисунок 3.8 – Выходное напряжение инвертора U_{0A} при отсутствии сигнала$V_{см}$ (а) и его наличии (б).

3.2 Принцип работы параллельного активного фильтра гармоник

Принцип работы параллельного трехфазного активного фильтра гармоник основан на теории мгновенной мощности.

В теории мгновенной мощности трехфазные системы делятся на системы с нейтральным проводом и без нейтрального провода. Три мгновенных мощности – мгновенная активная p, мгновенная реактивная q и мощность нулевой последовательности p_0 - находят из мгновенных линейных токов и фазных напряжений в осях α-β [60].

В трехфазной трехпроводной сети нулевая последовательность токов отсутствует, поэтому $i_0 = 0$. В этом случае в α-β осях определяются только мгновенные мощности, так как произведение $i_0 u_0$ всегда равно нулю. В трехфазной трехпроводной сети мгновенная активная мощность p представлена как сумма потоков мощности через составляющие α-β в единицу времени [61].

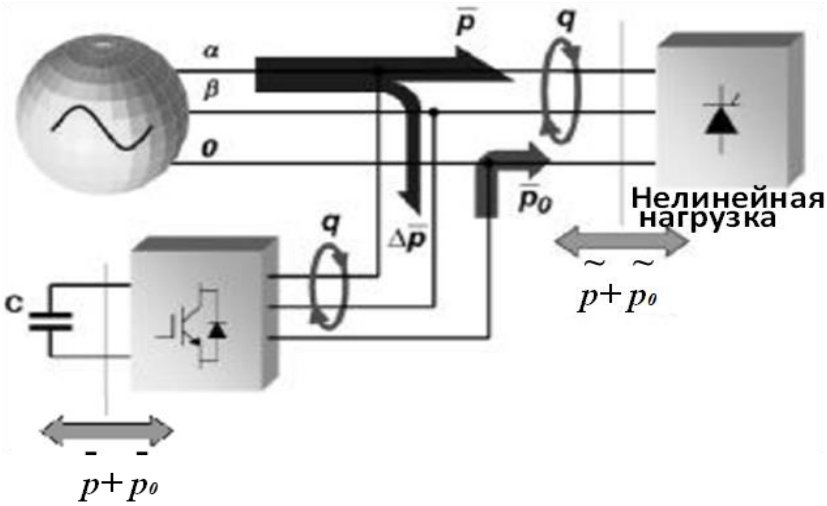


Рисунок 3.9 –Схема соединения АФГ с электрической сетью

На рисунке 3.9 приведена схема соединения активного фильтра гармонтик с электрической сетью в осях α, β, где указаны генерируемые и потребляемые мощности элементами схемы [41], [62-65]. Определение p и q основано на следующем выражении:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.9).$$

Каждая мощность состоит из постоянной и колебательной составляющих. Разделим мощности p и q на две составляющие:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (3.10)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}, \quad (3.11)$$

где $\bar{p}$ – постоянная составляющая p; $\tilde{p}$ – колебательная составляющая p; $\bar{q}$ - постоянная составляющая q; $\tilde{q}$ -колебательная составляющая q.

На основе теории мгновенной мощности возможно выполнить компенсацию нежелательных токов посредством применения параллельного компенсатора тока. Данный принцип реализуется следующим образом. На рисунке 3.10 показан источник энергии (сеть) к которому подключена нелинейная нагрузка, генерирующая высшие гармоники тока. Для их компенсации параллельно нагрузке включается параллельный компенсатор. Предположим, что параллельный компенсатор ведет себя как трехфазный управляемый источник тока, который может генерировать токи i_{Ca}^*, i_{Cb}^* и i_{Cc}^*.

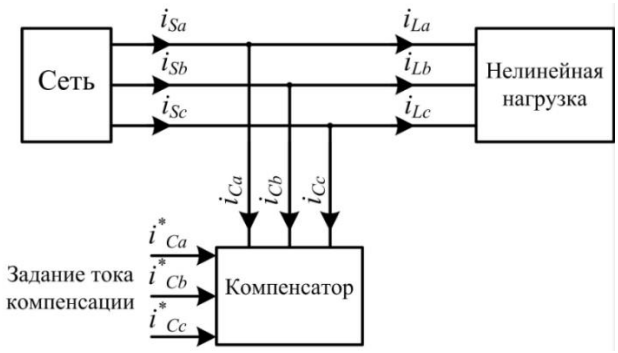


Рисунок 3.10 – Принцип параллельной токовой компенсации

Основной метод управления параллельным компенсатором показан на рисунке 3.11. Вычисленная активная мощность нагрузки p делится на среднюю $\bar{p}$ и колебательную $\tilde{p}$ части. Реактивная мощность нагрузки q также делится на среднюю $\bar{q}$ и колебательную $\tilde{q}$ части. Для компенсации выбираются

соответствующие части активной и реактивной мощности нагрузки. Мощности для компенсации принимаются равными: $-p_c^*$ и $-q_c^*$. Появление отрицательного знака в мощностях для компенсации объясняется тем, что компенсатор должен вырабатывать компенсационный ток, который генерирует инверсную от компенсируемой мощности. После этого применяют обратное преобразование от осей α-β к осям a-b-c для определения мгновенных значений трехфазного тока компенсации i_{Ca}^*, i_{Cb}^* и i_{Cc}^*.

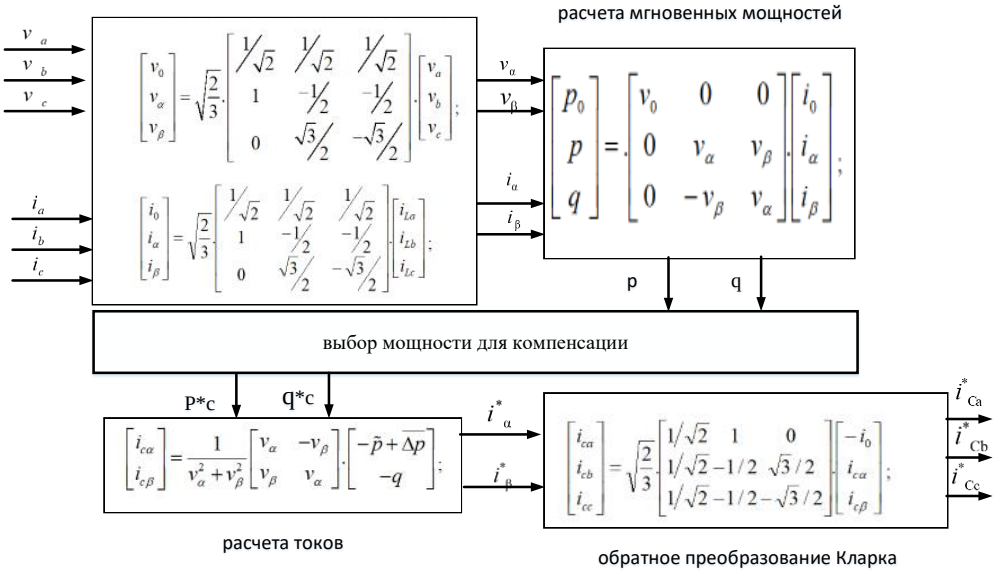


Рисунок 3.11 – Метод управления параллельной токовой компенсацией

Регуляторы параллельного активного фильтра гармоник определяют в реальном времени компенсационный ток и управляют таким образом активным фильтром, чтобы точно компенсировать ток. Контроллер параллельного активного фильтра работает с обратной связью. Он непрерывно измеряет ток нагрузки $\boldsymbol{i_L}$ и рассчитывает мгновенные значения компенсационного тока i^*_C, которые далее поступают на вход блока широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В случае высокой частоты модуляции преобразователь с ШИМ может быть представлен линейным усилителем мощности, где компенсационный ток i_C соответствует току задания i^*_C [66-67]. Структурная схема алгоритма расчета

компенсационного тока, основанная на теории мгновенной мощности, показана на рисунке 3.12 [68-73].

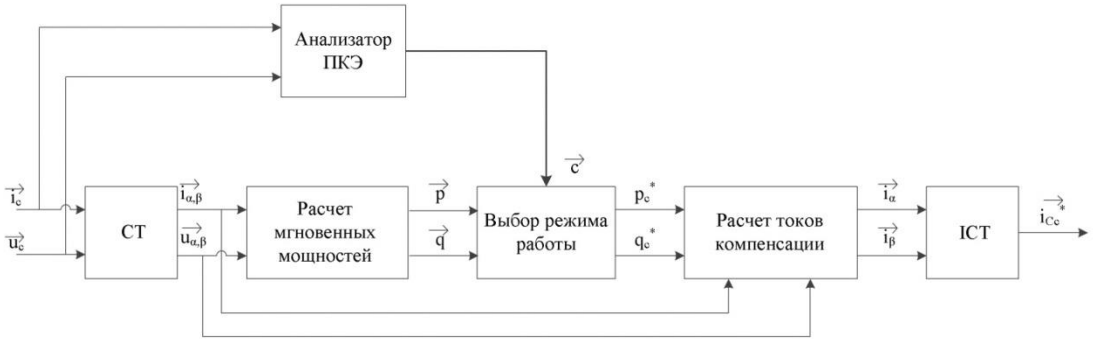


Рисунок 3.12 – Структурная схема алгоритма расчета компенсационного тока, основанная на теории мгновенной мощности

На рисунке 3.12 показаны следующие блоки:

1. Блок СТ – прямое преобразование Кларка:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}; \quad (3.13)$$

2. Блок расчета мгновенных мощностей:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \cdot \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}; \quad (3.14)$$

3. Блок выбора режима работы:

Данный блок в зависимости от управляющего сигнала, поступающего с блока «Анализатор ПКЭ» (ПКЭ – показатели качества электроэнергии), выбирает мощности для компенсации $\tilde{p}, \bar{p}, \tilde{q}$ или $\bar{q}$, где $\bar{p}$ - постоянная составляющая

активной мощности; $\tilde{p}$ – колебательная составляющая активной мощности; $\bar{q}$ - постоянная составляющая реактивной мощности; $\tilde{q}$ - колебательная составляющая реактивной мощности.

Чтобы компенсировать мощности, применяют следующие варианты:

- $\tilde{p} + \tilde{q}$ – при компенсации только высших гармоник (ВГ);

- $\tilde{q} + \bar{q}$ – при компенсации только реактивной мощности;

- $\tilde{p} + \tilde{q} + \bar{q}$ – при компенсации ВГ и реактивной мощности.

4. Блок расчета токов компенсации:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c^* \\ q_c^* \end{bmatrix}; \quad (3.15)$$

5. Блок ICT – обратное преобразование Кларка

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} . \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix}; \quad (3.16)$$

3.3 Блоки модели схемы активного фильтра гармоник

При создании модели схемы активного фильтра гармоник на основе пакета MATLAB разработаны следующие блоки [74-78]:

блоки, преобразующие координаты *a-b-c* в α-β-0 согласно формулам 3.12 и 3.13 [79] (рисунки 3.13 ... 3.16);

блоки расчета мощности источника и нагрузки по формулам (3.14) [79] (рисунки 3.17 ... 3.19);

блок вычисления тока смещения в системе координат *a-b-c* из системы координат α-β по формулам (3.15) и (3.16) [79] (рисунки 3.20 ... 3.21);

измерительный блок, который вычисляет активные и реактивные мощности нагрузки, источника и схемы компенсации активного фильтра по напряжению источника (V), току нагрузки (i_L), току источника (i_S) и компенсационному току(i_C) согласно выражениям (3.17) и (3.18) (рисунок 3.21) [79].

$$P = V_\alpha . i_\alpha + V_\beta i_\beta + V_o i_o ; \tag{3.17}$$

$$Q = V_\alpha . i_\beta - V_\beta i_\alpha \tag{3.18}$$

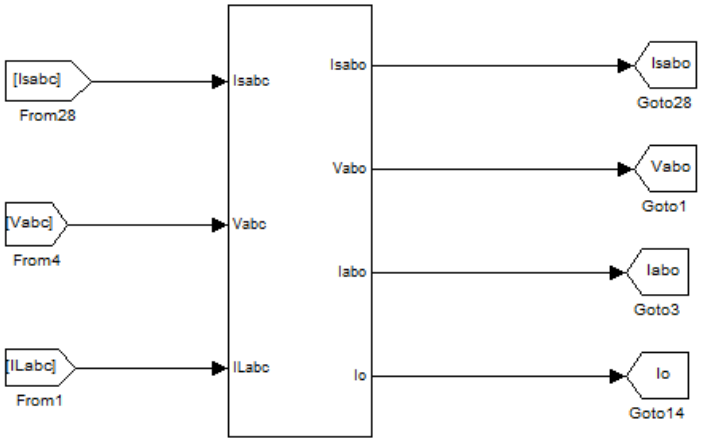


Рисунок 3.13 – Блок преобразования координат *a-b-c* в систему координат α-β-0

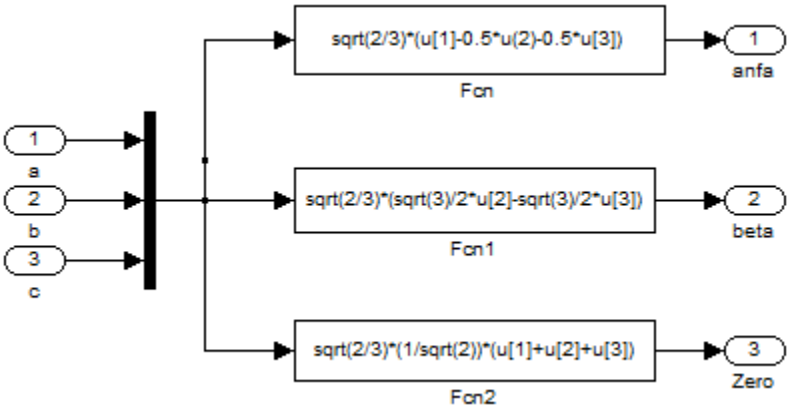


Рисунок 3.14 – Блок определения координат α и β

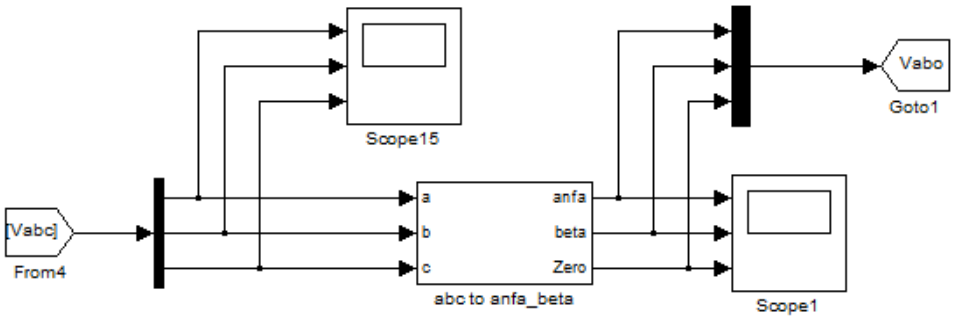


Рисунок 3.15 – Блок преобразователя напряжения *Vabc*
из системы координат *a-b-c* в α- β

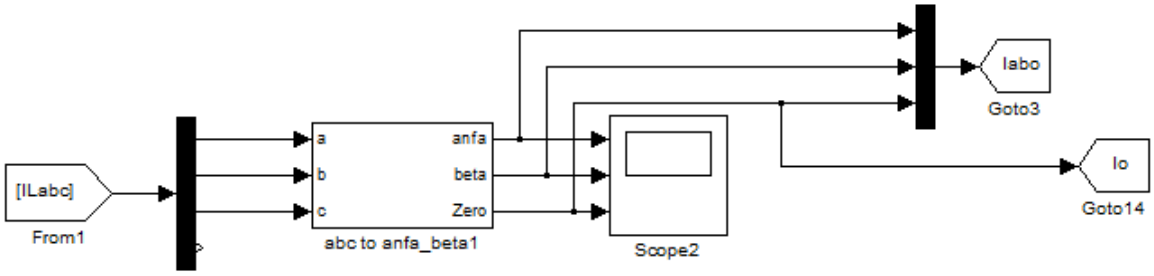


Рисунок 3.16 – Блок преобразования тока нагрузки I_{Labc}
из системы координат *a-b-c* в α- β

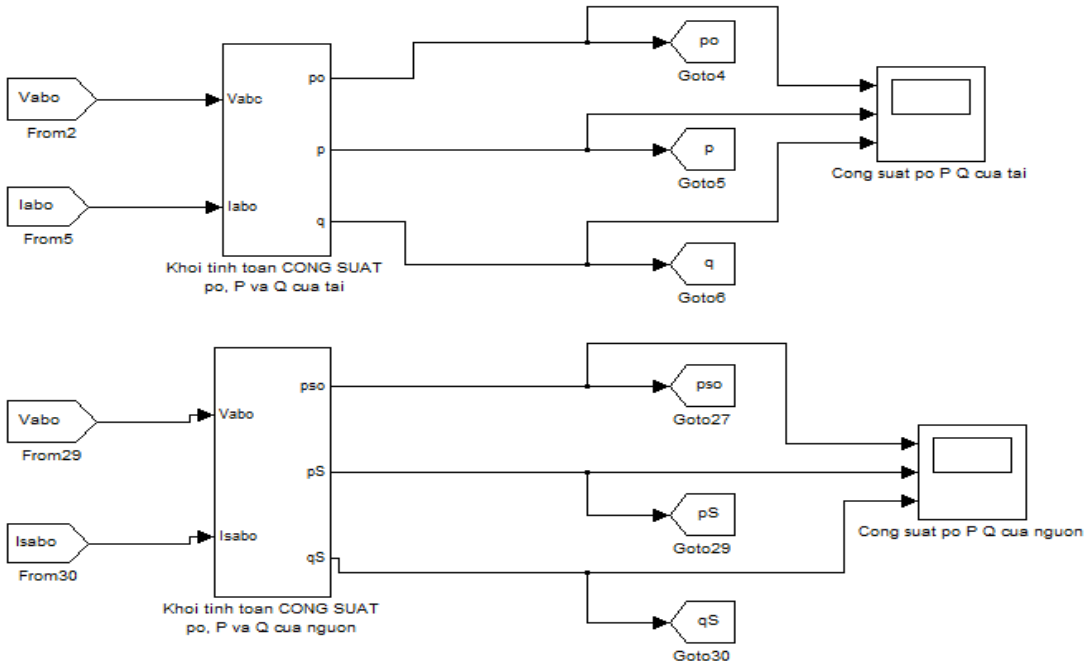


Рисунок 3.17 – Блок расчета мощности нагрузки и источника

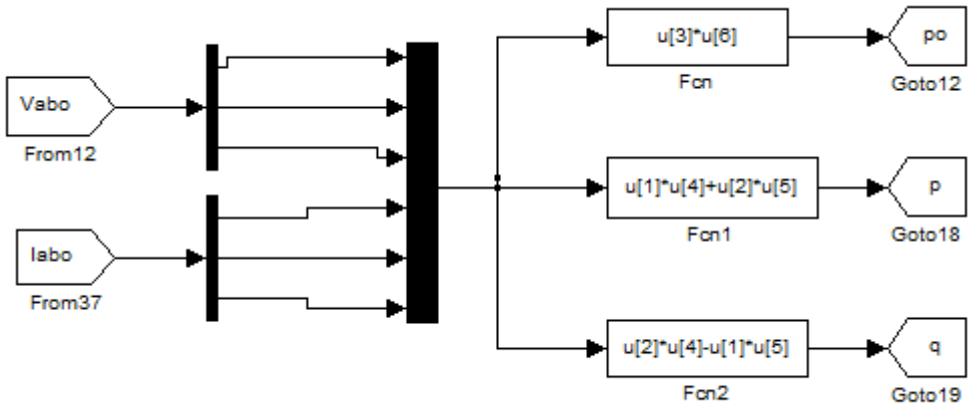


Рисунок 3.18 – Блок определения значений потребляемой мощности нагрузок P_{oL}, P_L, Q_L

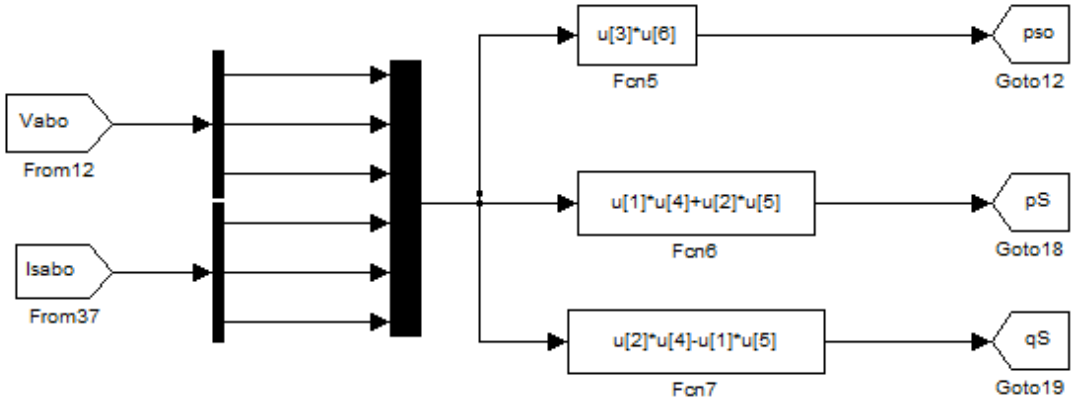


Рисунок 3.19–Блок расчета мощности источников *Po*, *Ps* и *Qs*

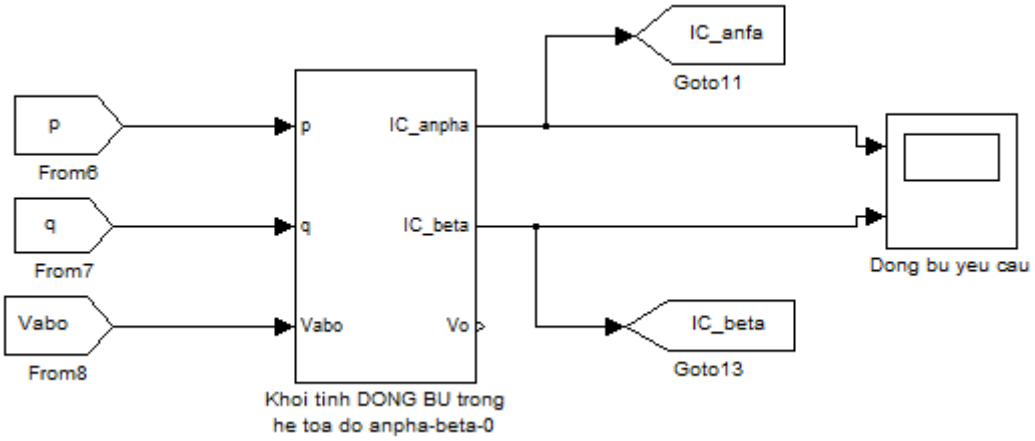


Рисунок 3.20 – Блок преобразования компенсационного тока изсистемы координат α-β-0 в систему координат *a-b-c*

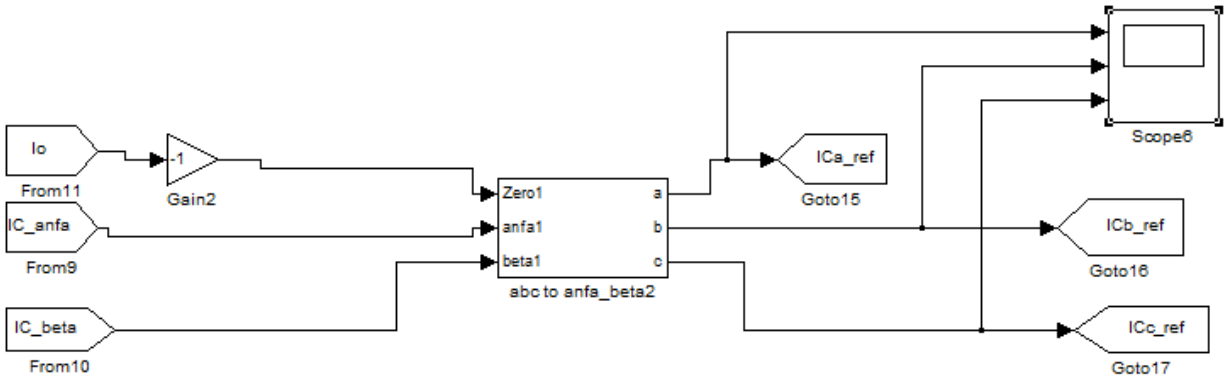


Рисунок 3.21 – Блок преобразования компенсационного токав систему координат *a-b-c* из системы координат α- β

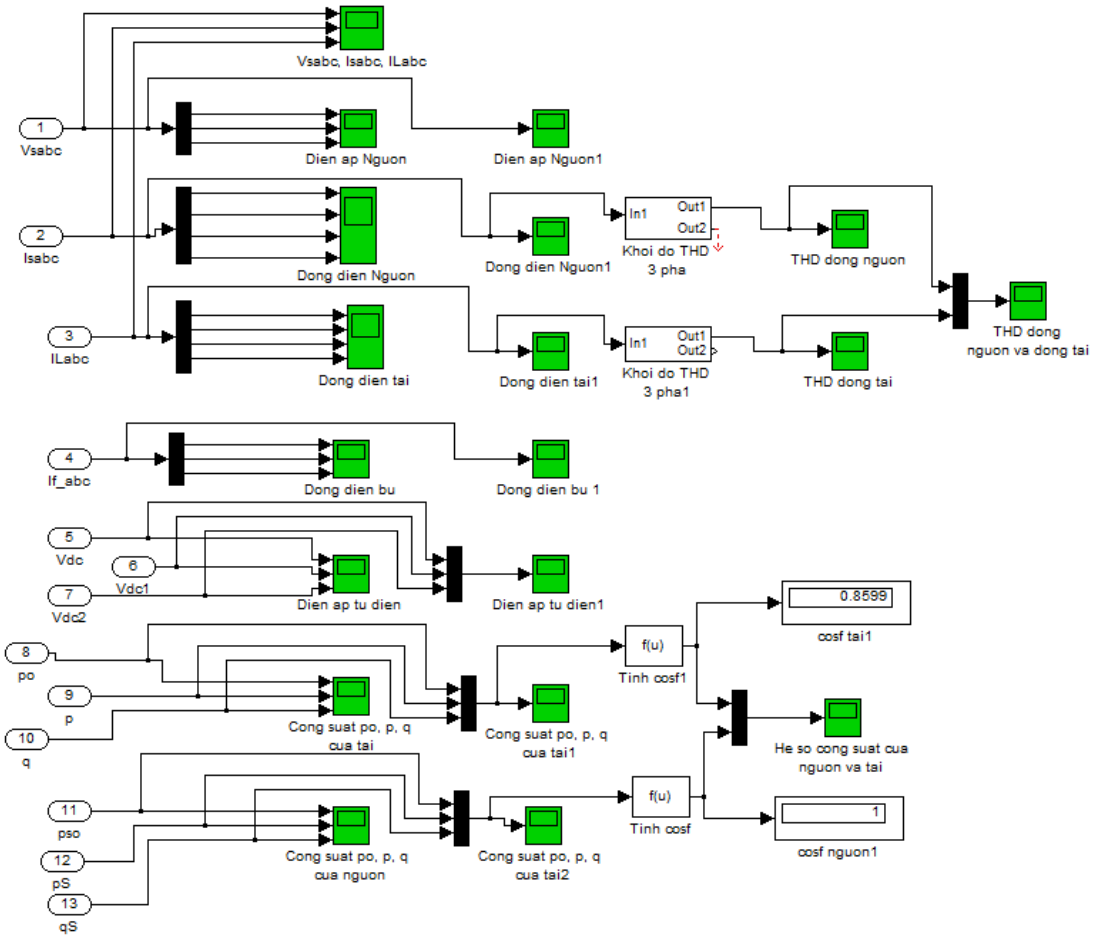


Рисунок 3.22 – Блок расчета мощностей *P*, *Q*

3.4 Модель активного фильтра гармоник

Для изучения свойств разработанной структуры АФГ и алгоритмаего управления разработа на модель с использованием пакета MATLAB и его инструментов Sim Power System и Simulink [80-81].

На рисунке 3.23 приведена схема соединения модели АФГ и модели электрической сети. В состав схемы входят: трехфазный выключатель, трехфазное измерительное устройство, сбалансированное индуктивное сопротивление фильтра АФГ (L=0,2 Гн), 5-уровневый гибридный инвертор и его система управления.

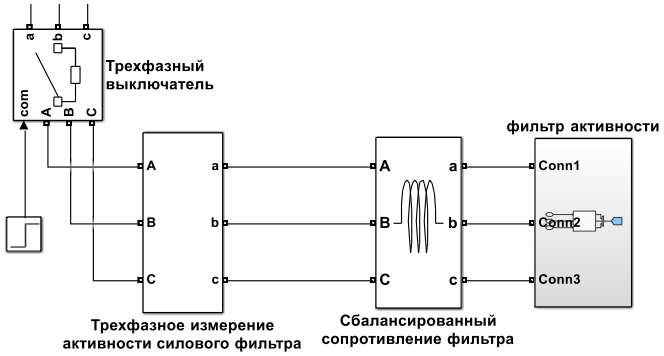


Рисунок 3.23 – Схема соединения модели АФГ и модели электрической сети

На рисунке 3.24 приведена модель структуры гибридного инвертора и его системы управления. В модели инвертора применяется 5 комплектов конденсаторов с напряжением Vdc1…5, несущая частота треугольника 6000 Гц, амплитуда несущей 1.

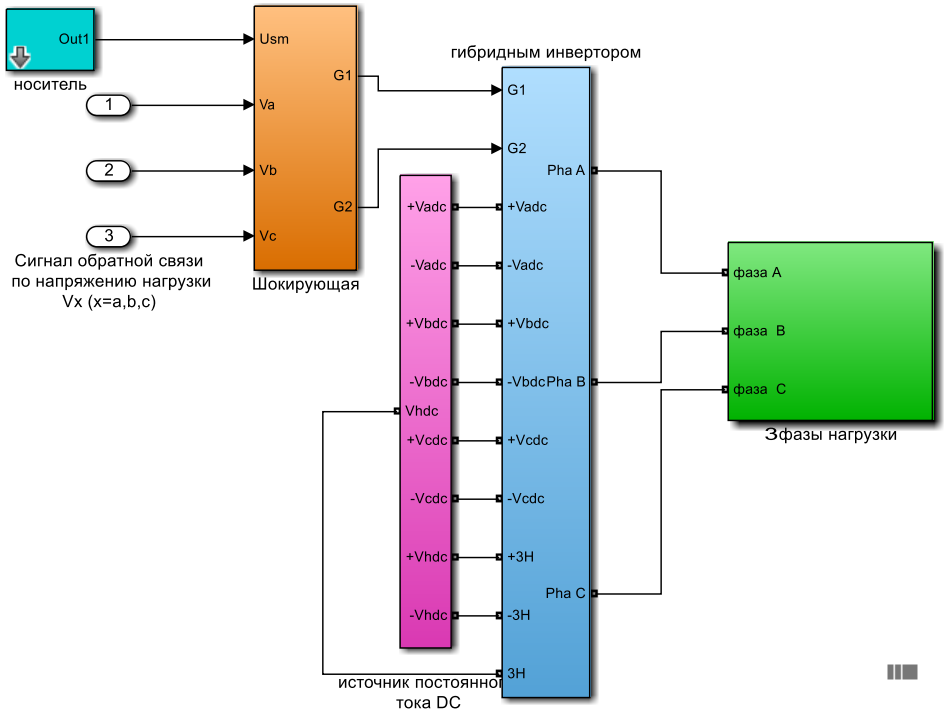


Рисунок 3.24 – Модель структуры гибридного инвертора и его системы управления

На рисунке 3.25 приведена модель трехфазного гибридного каскадного 5-уровневого инвертора напряжения, полученная на основе схемы, приведённой на рисунке 3.4.

На рисунке 3.26 приведена модель источника постоянного тока, которая используется при моделировании трехфазного гибридного каскадного 5-уровневого инвертора напряжения. Конденсаторы $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $C5$ при моделировании имеют значения емкостей C=5e-3 Ф и напряжения на конденсаторах равны $V_{C1}=V_{C2}=V_{C3}$ = 200 В, $V_{C4}=V_{C5}$= 100 В.

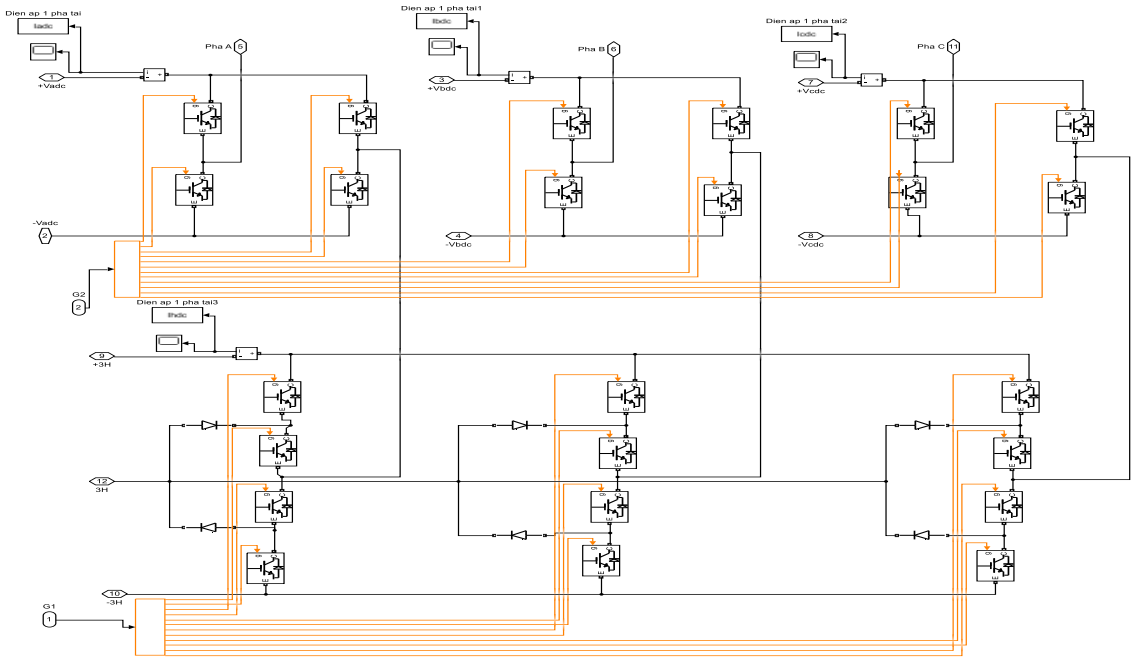


Рисунок 3.25 – Модель трехфазного гибридного каскадного 5-уровневого инвертора напряжения

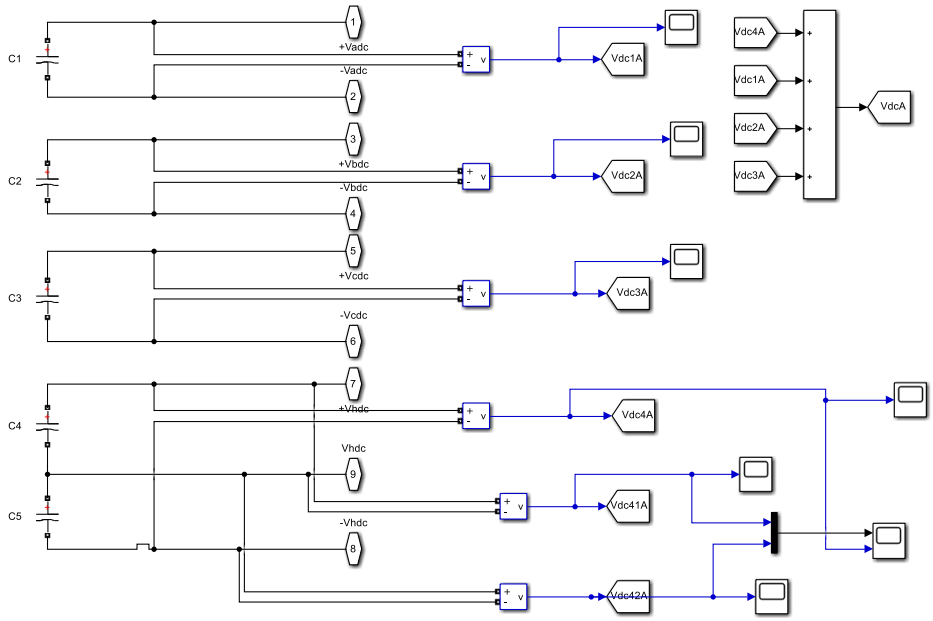


Рисунок 3.26 – Модель источника постоянного тока, используемого в схеме инвертора

На рисунке 3.27 приведена модель трёхфазной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой. Действующее значение трехфазного симметричного источника питания переменного тока равно 400 В, частота сети равна 50 Гц. В качестве нелинейной нагрузки взяты частотно-регулируемые электроприводы системы дробилки руды общей мощностью 1007 кВт.

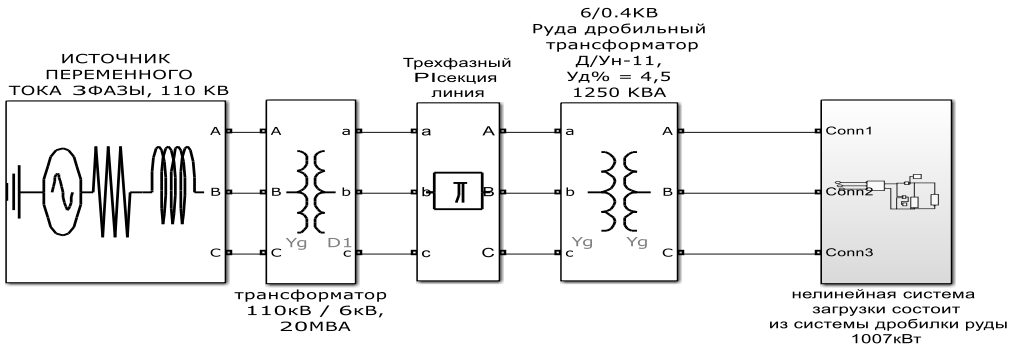


Рисунок 3.27 – Модель трёхфазной системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой

На рисунке 3.28 приведена модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ. Основу моделиАФГ представляет рассмотренный ранее гибридный 5-уровневый каскадный инвертор с использованием ШИМ. Активный фильтр подключен параллельно нелинейной нагрузке.

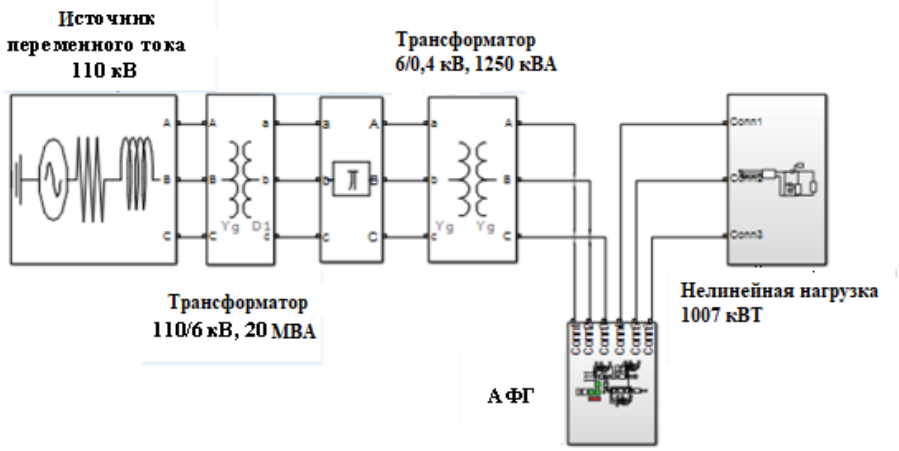
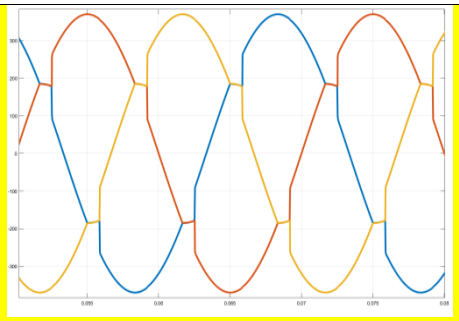
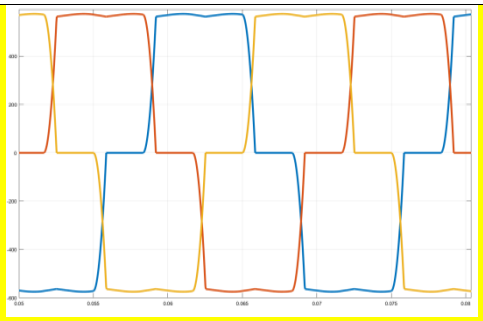
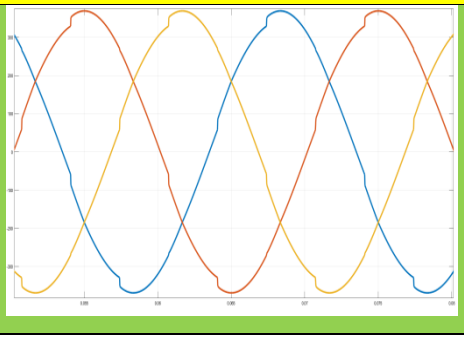
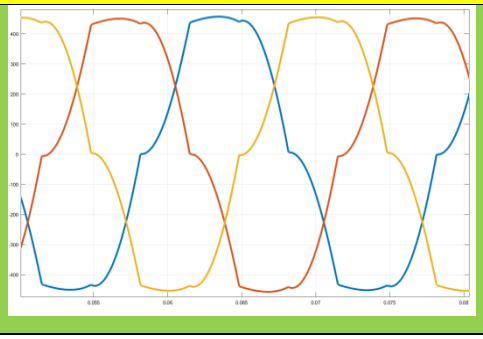
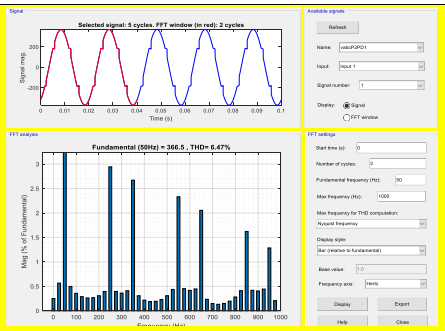
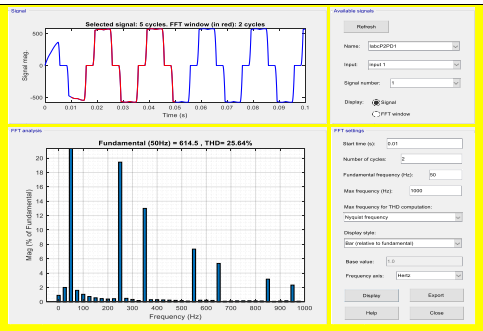
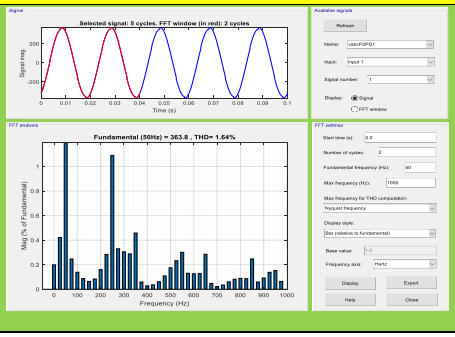
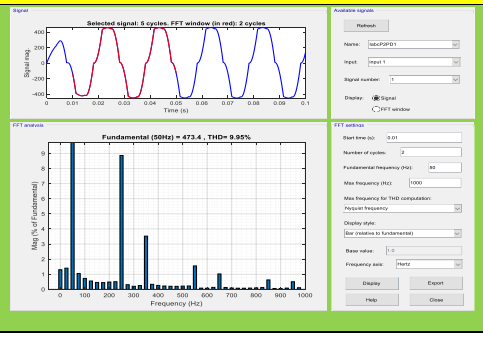


Рисунок 3.28 – Модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ

3.5 Моделирование системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении активного фильтра гармоник

При моделировании параметры модели устанавливаются в соответствии с исходными данными, приведенными на рисунках 3.23...3.27. Результаты моделирования приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты моделирования

Шина 0.4кВ	Vabc	Iabc
АФГ отсутствует		
АФГ включён		
Шина 0.4кВ	$КНИ_{U\,\%}$	$КНИ_{I\%}$
АФГ отсутствует $КНИ_{U\%}$=6.47 $КНИ_{I\%}$=26.64		
АФГ включён $КНИ_{U\%}$=1.64 $КНИ_{I\%}$=9.95		

На рисунке 3.29 приведено сравнение искажений синусоидальной формы напряжения на шинах 0,4 кВ и тока при отсутствии АФГ и при включении АФГ с международным стандартом IEEE Std 519-2014 [18].

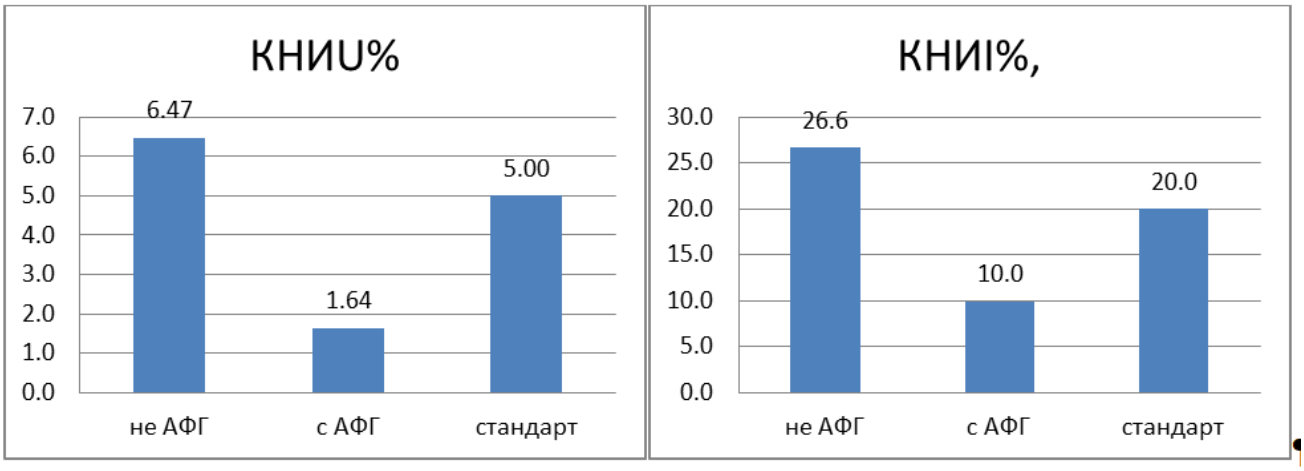


Рисунок 3.29 – Сравнение искажений синусоидальной формы напряжения на шинах 0,4 кВ и тока с международным стандартом IEEE Std 519-2014

На основе анализа результатов моделирования, приведённых в таблице 3.2 и на рисунке 3.29 сделаны следующие выводы.

При наличии нелинейной нагрузки и отсутствии АФГ коэффициент нелинейных искажений напряжения на шине низкого напряжения 0,4 кВ равен $КНИ_U$=6,47%, коэффициент нелинейных искажений тока $КНИ_I$=26,64%, что существенно превышает допустимые пределы $КНИ_U \leq 5\%$, $КНИ_I \leq 20\%$, установленные международным стандартом IEEE Std 519-2014 [18].

При включении АФГ и наличии нелинейной нагрузки коэффициент нелинейных искажений напряжения на шине низкого напряжения 0,4 кВ уменьшился с 6,47 до 1,64%, коэффициент нелинейных искажений тока уменьшился с 26,64 до 9,95%, что значительно меньше допустимых норм, установленных международным стандартом IEEE Std 519-2014.

Таким образом АФГ наоснове 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом ШИМ является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной

нагрузки, что позволяет решить задачу по устранению воздействия высших гармоник на производственную деятельность предприятия.

Выводы

Разработана схема активного фильтра гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом ШИМ для систем электроснабжения 0,4 кВ при нелинейной нагрузке.

Выполнено моделирование электрической системы для условий системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам. Результаты моделирования позволили оценить эффективность применения активного фильтра гармоник для улучшения качества электроэнергии.

Анализ результатов моделирования показал, что при наличии нелинейной нагрузки и отсутствии АФГ коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шине низкого напряжения 0,4 кВ превышают допустимые пределы, установленные международным стандартом IEEE Std 519-2014.

Включение активного фильтра гармоник при наличии нелинейной нагрузки приводит к существенному уменьшению уровня высших гармоник напряжения и тока на шине низкого напряжения 0,4 кВ по сравнению со случаем отсутствия АФГ. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока не превышают допустимых пределов, установленных международным стандартом IEEE Std 519-2014.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что разработанный активный фильтр гармоник на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом ШИМ является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки.

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА

Результаты исследований и анализа во второй главе показывают, что реактивная мощность в системе электроснабжения глиноземного завода слишком высока из-за наличия большого количества работающих двигателей 6 кВ и нагрузок 0,4 кВ, что приводит к значительному уменьшению коэффициента мощности станций распределения электроэнергии ПД1, ПД2, ПД4, ПД5, ПД6 и всей системы электроснабжения, который колеблется в диапазоне от 0,32 до 0,64. Поэтому необходимо применение средств компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ и низковольтных шинах на распределительных станциях.

Компенсация реактивной мощности является одним из наиболее эффективных способов снижения потребляемой электрической энергии и улучшения энергетических показателей. Компенсация реактивной мощности позволяет [82]:

– снизить затратына электроэнергию;

– уменьшить потери в сети;

– избежать штрафных санкций со стороны коммунальных служб за чрезмерное потребление реактивной мощности;

– увеличить пропускную способность системы и уменьшить затраты на новые установки,

– улучшить регулирования напряжения в сети.

4.1 Решение компенсации реактивной мощности для электрической системы на основе FACTS

На рисунке 4.1 показан треугольник мощностей системы электроснабжения до компенсации реактивной мощности и после её компенсации посредством подключения конденсаторной установки. Сторонами треугольника до компенсации являются активная мощность P, реактивнная мощность Q_1 и полная мощность S_1.Сторонами треугольника после компенсации являются активная мощность P, реактивнная мощность Q_2 и полная мощность S_2. Как видно из рисунка, при включении конденсаторной установки реактивная мощность системы уменьшается на величину реактивной мощности конденсаторной установки Q_c, т.е. $Q_2=Q_1-Q_c$ [83]. Наряду с уменьшением реактивной мощности, компенсация уменьшает также полную мощность. Если до компенсации коэффициент мощности равен $\cos\varphi_1$, а после компенсации реактивной мощности его значение должно быть равно $\cos\varphi_2$, то мощность конденсатора, необходимая для этой компенсации, рассчитывается следующим образом: $Q_c=P(\mathrm{tg}\varphi_1-\mathrm{tg}\varphi_2)$.

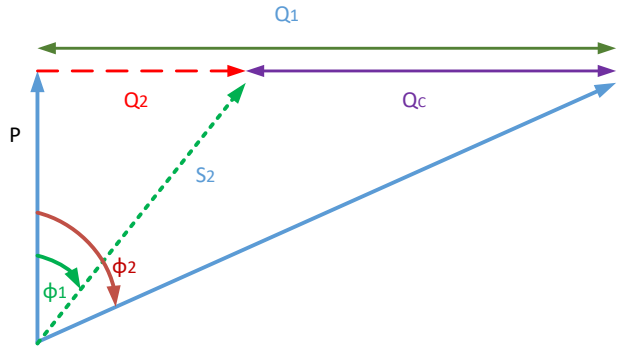


Рисунок 4.1 – Треугольник мощностей до компенсации и после компенсации реактивной мощности

Для обеспечения надёжности систем передачи переменного тока, а также снижения потерь при передаче энергии применяется гибкая система передачи переменного тока FACTS (от англ.flexible alternating current transmission system). Как правило, в таких системах применяются силовые электронные устройства.

FACTS улучшает качество передачи и повышает эффективность передачи энергии путём подачи дополнительной реактивной энергии в энергосистему [84-85].

Согласно определению IEEE, FACTS– это система, основанная на силовой электронике (и других элементах), обеспечивающая контроль за одним или более параметрами системы передачи переменного тока для повышения управляемости и увеличения передаваемой мощности [86-89].

Для повышения производительности системы электропередачи используются следующие типы устройств FACTS [90-91].

Шунтирующие устройства (статический компенсатор VAR (SVC). Статические системы VAR применяются для нескольких целей. Основная цель, как правило, заключается в быстром контроле напряжения в слабых точках сети. Установки могут располагаться в средней точке соединительных линий передачи или на концах линий. Статические компенсаторы VAR представляют собой шунтирующие статические генераторы/поглотители, выходы которых изменяются таким образом, чтобы регулировать напряжение в системах электроснабжения. В самой простой форме SVC подключен в виде конфигурации реактора с фиксированным конденсатором и тиристорным управлением (FC-TCR), как показано на рисунке 4.2. SVC подключен к соединительному трансформатору, который подключен непосредственно к шине переменного тока, напряжение которой должно регулироваться. Эффективное реактивное сопротивление FC-TCR изменяется путем регулирования угла управления антипараллельных тиристоров. Углом управления можно управлять с помощью контроллера, реализующего ПИ-регулятор (пропорциональный-интегральный) таким образом, чтобы напряжение шины, к которой подключен SVC, поддерживалось на уровне опорного значения [92-93].

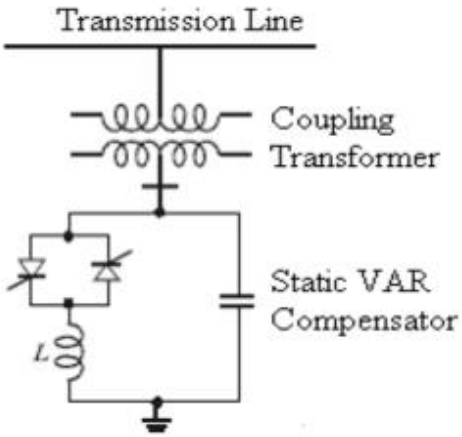


Рисунок 4.2 – Статический компенсатор VAR (SVC)

Основным преимуществом SVC перед простыми схемами компенсации с механическим переключением является их почти мгновенная реакция на изменения напряжения в системе, чтобы максимизировать коррекцию реактивной мощности, которую они могут обеспечить с высоким быстродействием. Они, как правило, дешевле, производительнее, быстрее и надежнее, чем схемы динамической компенсации, такие как синхронные компенсаторы. Однако статические компенсаторы VAR дороже конденсаторов с механической коммутацией.

Сериесные устройства (тиристорный управляемый последовательный конденсатор TCSC). TCSC является одним из наиболее важных и наиболее известных устройств FACTS, которое используется в течение многих лет для увеличения передачи мощности, а также для повышения стабильности системы. Основная схема TCSC показана на рисунке 4.3. TCSC состоит из трех основных компонентов: конденсаторной батареи *C*, байпасного индуктора *L* и двунаправленных тиристоров SCR1 и SCR2. При регулировании углов управления тиристоров меняется реактивное сопротивления TCSC в соответствии с алгоритмом управления системой, обычно в ответ на некоторые изменения параметров системы [94].

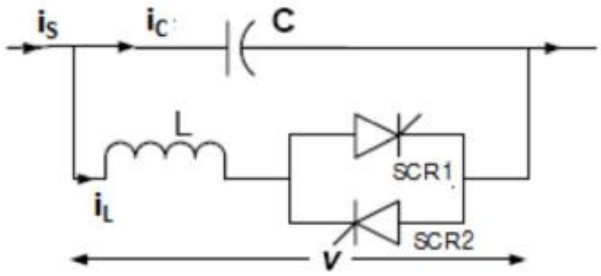


Рисунок 4.3 – Последовательный конденсатор стиристорным управлением (TCSC)

TCSC представляет ряд важных преимуществ при применении последовательной компенсации:

- устранение рисков подсинхронного резонанса;
- демпфирование колебаний активной мощности;
- улучшение стабильности после непредвиденных обстоятельств;
- динамическое управление потоком мощности.

Статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC) [95] - это тип гибкой системы передачи переменного тока, которая состоит из твердотельного инвертора источника напряжения, соединенного с трансформатором, который последовательно соединен с линией передачи. Это устройство может подавать почти синусоидальное напряжение последовательно с линией. Это подаваемое напряжение можно рассматривать как индуктивное или емкостное реактивное сопротивление, которое подключено последовательно с линией передачи. Эта функция может обеспечить управляемую компенсацию напряжения. Кроме того, SSSC может реверсировать поток мощности, подавая достаточно большое последовательное реактивное компенсирующее напряжение. Базовая конфигурация SSSC показана на рисунке 4.4.

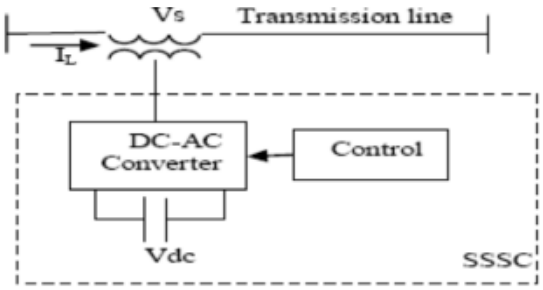


Рисунок 4.4 – Статический синхронный последовательный компенсатор (SSSC)

Преимуществами использования FACTS в энергосистеме являются: смягчение потенциального асинхронного резонанса; управление потоками действительной и реактивной мощностей; повышение качества транспорта электроэнергии; повышенная надежность и доступность системы передачи; увеличение устойчивости электрической сети; лучшее использование существующих активов системы передачи.

Задачами использования FACTS являются:увеличение контроля мощности, передаваемой по линии; смягчение синхронного резонанса (SSR); улучшение предела устойчивости переходного процесса системы; увеличение загрузки системы; улучшение качества электроэнергии; улучшение демпфирования системы; повышение стабильности напряжения; компенсация реактивной нагрузки [96].

4.2 Компенсация реактивной мощности на шинах 6 кВ

4.2.1 Компенсация реактивной мощности при помощи СТАТКОМов

В настоящее время для компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ алюминиевого завода в Лам Донге, Вьетнам, используются статические компенсаторы реактивной мощности (СТАТКОМ). СТАТКОМы включаются и выключаются напрямую с помощью системы ручного переключения. На рисунке 4.5 показана типовая структурная схема СТАТКОМа. Задачей СТАТКОМов является улучшение качества электроэнергии и повышение эффективности ее передачи и распределения за счет компенсации реактивной мощности,

регулирования напряжения и повышения устойчивости работы энергетической системы электростанции глиноземного завода Лам Донг.

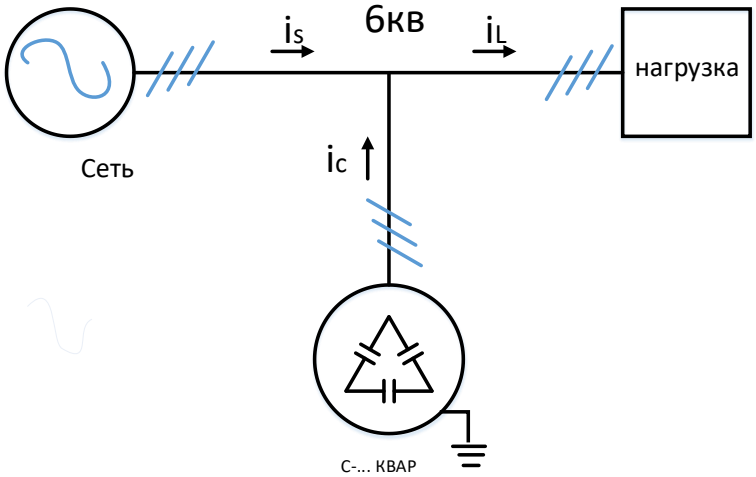


Рисунок 4.5 – Типовая структурная схема подключения СТАТКОМа

На рисунке 4.6 показана визуальная модель схемы распределительной системы 110 кВ с двумя главными силовыми трансформаторами 110/6 кВ, 20 МВА[11]. Схема системы 110 кВ состоит из двух линий, которые резервируют друг друга и соединены друг с другом через шину. Распределение электроэнергии на стороне 6 кВ осуществляется на шести распределительных подстанциях: распределительная станция ПД-1 системы измельчения бокситов ($P_{ПД1}$ =14294 кВт); распределительная станция ПД-2 красного шлама ($P_{ПД.2}$ =7749 кВт); станция распределения кристаллизации ПД-3 ($P_{ПД.3}$ =5366 кВт); распределительная станция для компрессоров ПД-4 ($P_{ПД.4}$=6790кВт), распределительная станция печи ПД-5 ($P_{ПД.5}$=3536 кВт), распределительная станция котельной ПД-6 ($P_{ПД.6}$=13724 кВт). Система снабжена также резервным питанием от двух генераторов 6 кВ, 15 МВА [97].

Статические компенсаторы подключены параллельно на шины 6 кВ станций ПД-1...ПД-6 за исключением сборной шины станции ПД-3, где коэффициент мощности превышает 0,9. Каждый статический компенсатор имеет следующую номинальную реактивную мощность: Q СТАТКОМ1=18,5МВАр,Q СТАТКОМ2 = 4МВАр, Q СТАТКОМ3 = 0 МВАр, Q СТАТКОМ4 = 14,5МВАр, Q СТАТКОМ5 = 7,5МВАр, Q СТАТКОМ6 = 26,4МВАр.

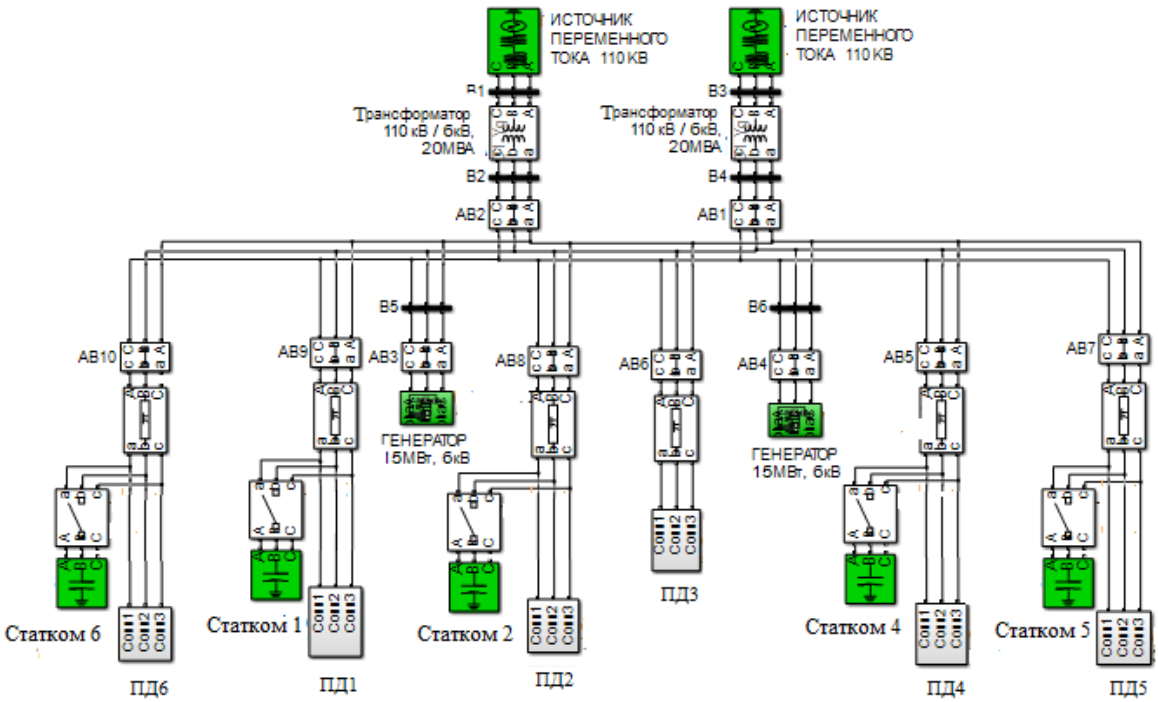


Рисунок 4.6 – Модель системы электроснабжения глиноземного завода при наличии СТАКОМов на шинах 6 кВ

Модельные исследования проводились для двух случаев:

случай I – без компенсации реактивной мощности;

случай II – с компенсацией реактивной мощности.

На рисунке 4.7 приведены результаты расчёта коэффициента мощности на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД-6 при отсутствии СТАТКОМов (вариант I) и при включении СТАТКОМов (вариант II).

На основании анализа рисунка 4.7 сделан вывод о том, что включение СТАТКОМов приводит к увеличению коэффициента мощности. Коэффициент мощности электростанции (ПД-0) увеличился с 0,42 до 0,85. Однако, согласно правилам вьетнамской энергетики, коэффициент мощности завода должен быть больше 0,9. Поэтому включение СТАТКОМов не позволяет добиться дальнейшего увеличения коэффициента мощности на шинах 6 кВ за исключением шины ПД-3.

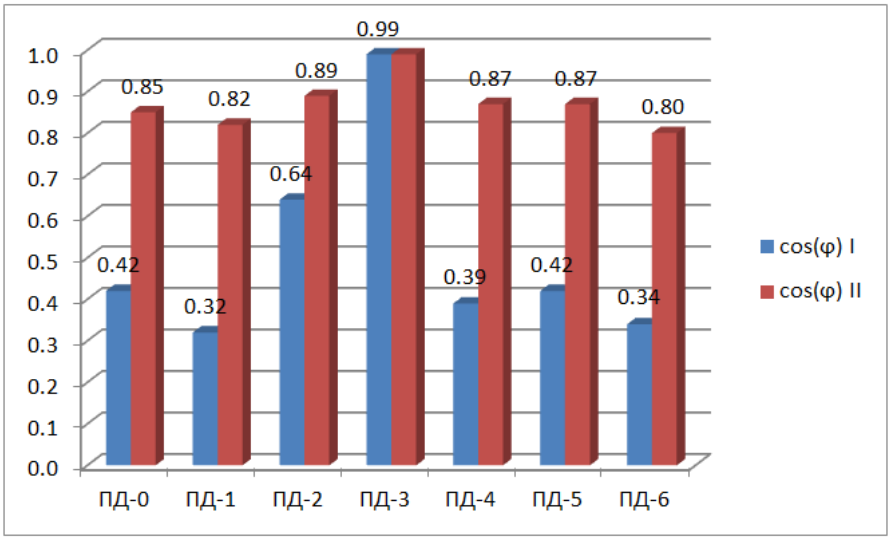


Рисунок 4.7 – Результаты расчёта коэффициента мощности на шинах 6 кВПД-0... ПД-6 при отсутствии СТАТКОМов (вариант I) и при включении СТАТКОМов (вариант II)

Неуправляемые статические компенсаторы СТАТКОМ, используемые для компенсации реактивной мощности, имеют такие преимущества, как регулирование напряжения на нагрузке**,** снижение потерь активной мощности**,** увеличение коэффициента мощности**,** уменьшение нагрузки на генераторы, дополнительный рост нагрузки, снижение потребности при покупке электроэнергии и снижение инвестиций в оборудование системы на киловатт подаваемой нагрузки.

Однако неуправляемые статические компенсаторы имеют также серьезные недостатки: повышенный уровень гармоник в энергосистеме, возникновение гармонического резонанса в результате применения конденсаторов, особенно при использовании устройств, генерирующих гармоники, таких как полупроводниковые преобразователи. Если точка резонанса оказывается близкой к одной из частот, генерируемых источниками гармоник в системе, может возникнуть либо шунтирующее, либо последовательное состояние резонанса, либо их комбинация. Это может привести к протеканию чрезмерных гармонических токов или гармонических перенапряжений, либо к тому и

другому, что может привести к срабатыванию защиты оборудования конденсаторов (например, предохранителей), отказу конденсатора, перегреву другого электрического оборудования и помехам в электрической системе.

На рисунке 4.8 приведены полученные на модели значения коэффициента нелинейных искажений тока на шинах 6 кВ ПД-0...ПД-6 при отсутствии СТАТКОМов (вариант I) и при включении СТАТКОМов (вариант II). Из приведённых графиков видно, что гармонические искажения тока значительно увеличились, когда используются неуправляемые статические компенсаторы СТАТКОМы и отсутствуют фильтры высших гармоник.

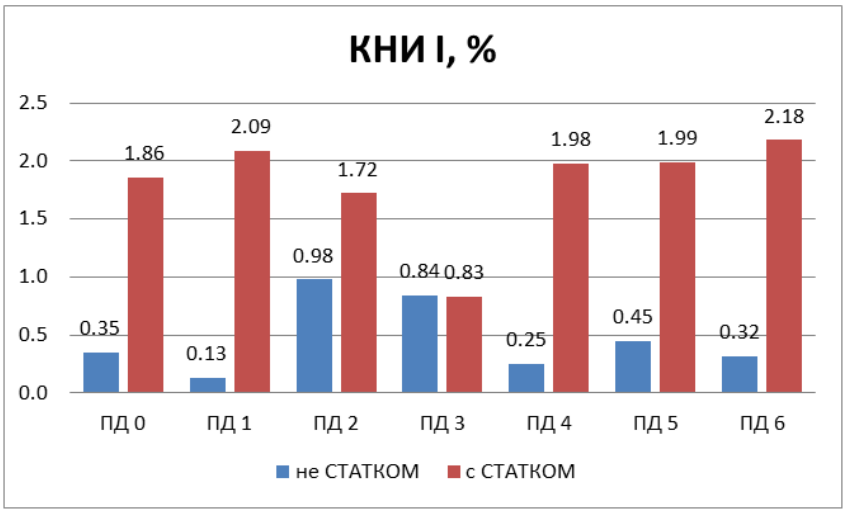


Рисунок 4.8 – Значения коэффициента нелинейных искажений тока (КНИ I) на шинах 6 кВ ПД-0...ПД-6 при отсутствии СТАТКОМов (вариант I) и при включении СТАТКОМов (вариант II)

Поэтому было принято решение повысить на шинах 6 кВ системы электроснабжения коэффициент мощности с 0,85 до 0,95 (согласно правилам вьетнамской энергетики), снизить повреждения конденсаторов и электрооборудования и улучшить качество электроэнергии станции путем замены устройств СТАТКОМ на устройства реактивной статической компенсации VAR [98].

4.2.2 Статический компенсатор VAR (SVC)

Статические компенсаторы VAR (SVC) содержат шунтирующие конденсаторы и реакторы, которые управляются тиристорами.

Они позволяют решить дв езадачи, обычно встречающихся в реальных энергосистемах: компенсация реактивной нагрузки, когда необходимо снизить потребность в реактивной мощности промышленных нагрузок и сбалансировать реальную мощность, потребляемую из линий питания; поддержание напряжения на линиях электропередачи в определенной точке в ответ на нарушения как нагрузки, так и генерации [99].

Основными целями динамической компенсации VAR являются увеличение предела устойчивости энергосистемы, уменьшение колебаний напряжения во время колебаний нагрузки и ограничение перенапряжений из-за больших возмущений.

Статические компенсаторы VAR (SVC) с шунтовым подключением бывают двух типов, а именно:

– реактор с тиристорным управлением (TCR);

– тиристорный коммутируемый конденсатор (TSC).

На рисунке 4.9 представлена схема статического компенсатора VAR (SVC), состоящего из двух параллельных ветвей: реактора с тиристорным управлением (TCR) и конденсатора с фиксированной ёмкостью. Приняты следующие обозначения: i_s - ток системы, i_L- ток нагрузки, i_r - ток реактора, i_c - ток конденсатора. Это устройство позволяет генерировать или поглащать реактивную мощность посредством изменения угла упраления тиристорами, что позволяет обеспечить стабилизацию напряжения шины и демпфирование колебаний энергосистемы.

Контроль угла управления тиристорами используется для контроля тока в реакторе от максимума до нуля [100-102].

Преимущества статического компенсатора VAR: увеличение пропускной способности линий электропередачи; улучшение переходной стабильности

системы; контроль установившихся и временных перенапряжений; улучшение коэффициента мощности нагрузки и, следовательно, уменьшение потерь в линии; улучшение возможностей системы.

Статический компенсатор VAR не имеет вращающихся частей и используется для компенсации импульсного перенапряжения путем секционирования длинной линии передачи [103-105].

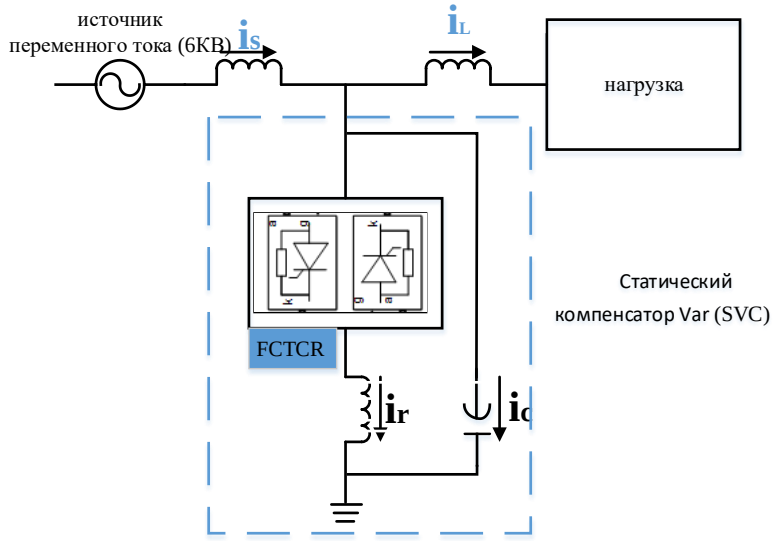


Рисунок 4.9 – Схема статического компенсатора VAR (SVC)

На рисунке 4.10 приведена функциональная схема системы управления статического компенсатора VAR(SVC).

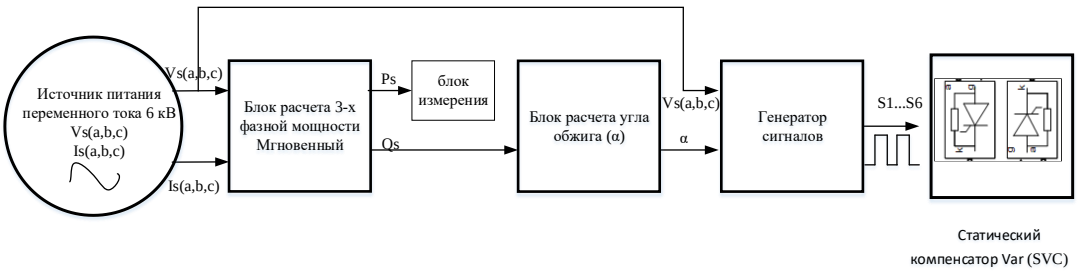


Рисунок 4.10 – Функциональная схема системы управления статического компенсатора VAR(SVC)

Сигнал управления тиристорами формируется из сигнала напряжения и тока источника, реактивной мощности (Qs) и активной мощности (Ps) источника.

После вычисления фазового угла (α) подаются управляющие сигналы на тиристоры (FC-TCR). Тем самым обеспечивается подключение реактора и конденсатора к электрической системе 6 кВ, чтобы компенсировать в ней реактивную мощность [106-108].

4.2.3 Модель статического компенсатора VAR (SVC)

На рисунках 4.11…4.15 представлены модель статического компенсатора VAR и модели блоков, которые входят в состав модели статического компенсатора VAR: блок анализа мощностей Ps, Qs источника, блок расчета угла управления тиристорами, блок генератора импульсов управления тиристорами, блок измерения выходного сигнала [109].

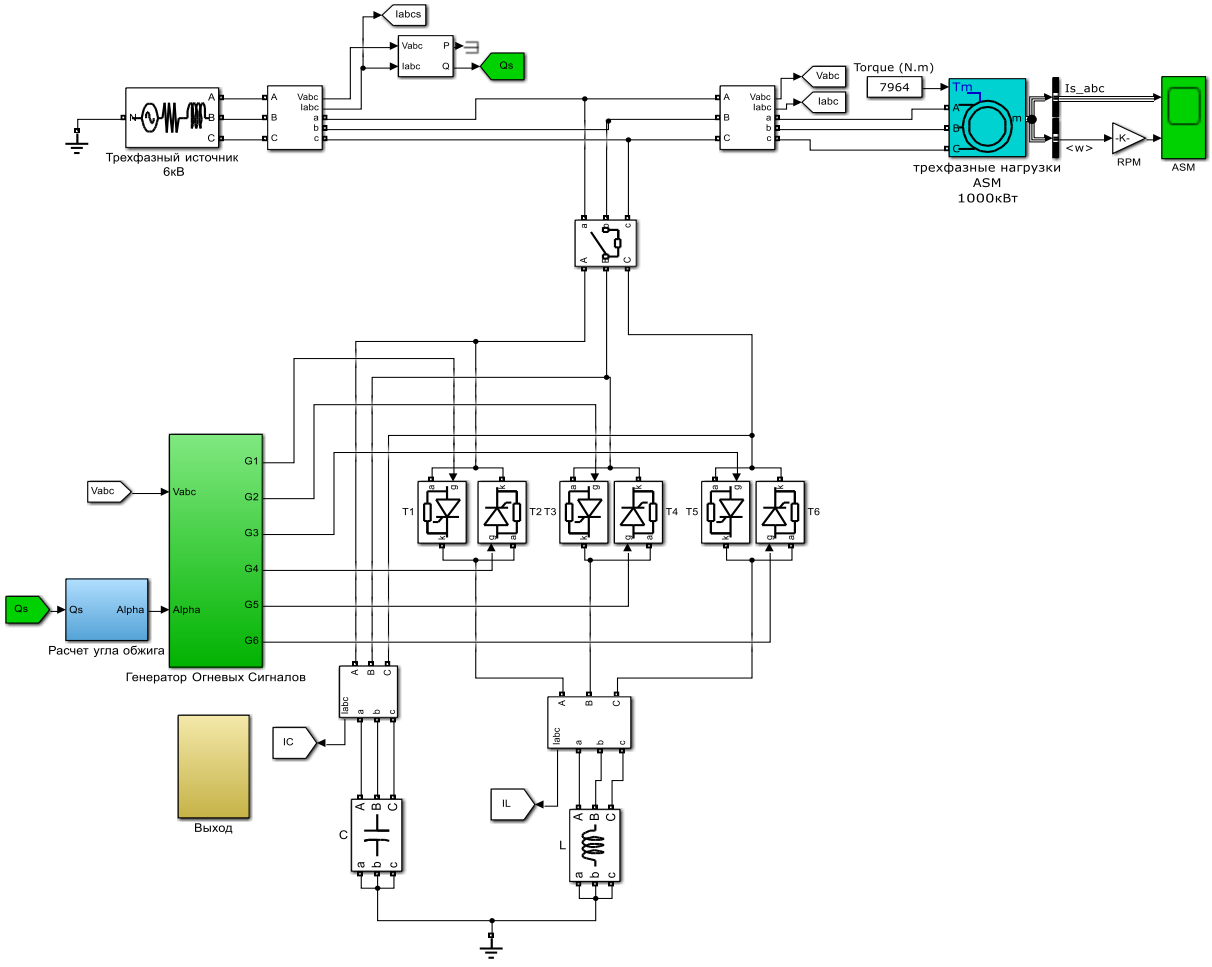


Рисунок 4.11 – Модель статического компенсатора VAR (SVC)

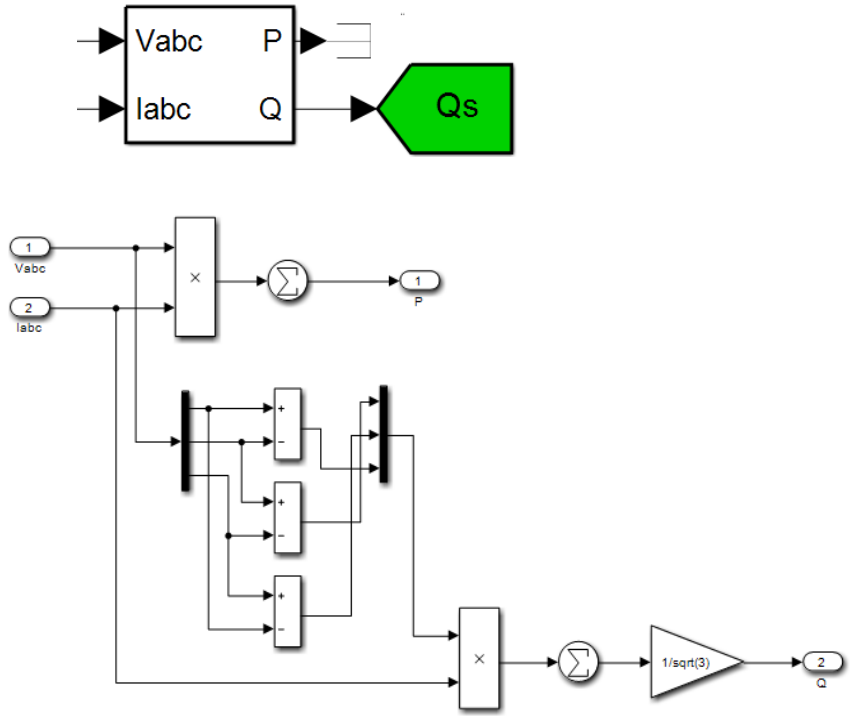


Рисунок 4.12 – Блок анализа мощностей Ps и Qs источника

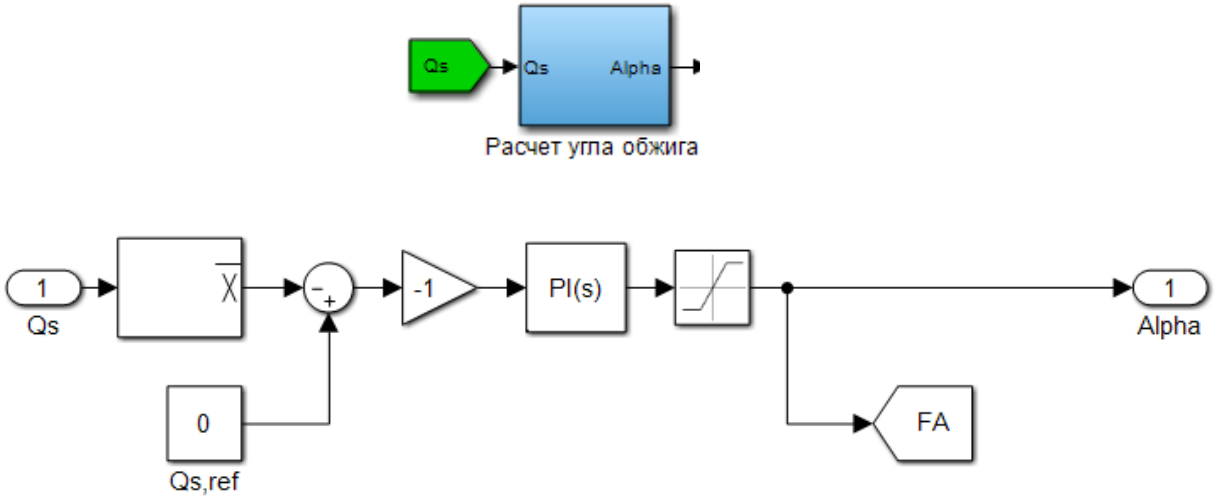


Рисунок 4.13 – Блок расчета угла управления тиристорами

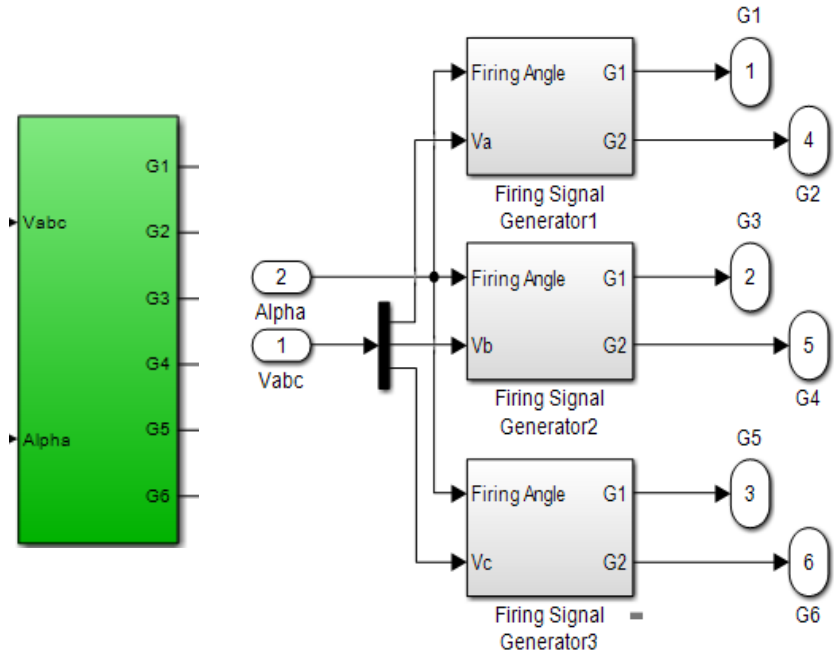


Рисунок 4.14 – Блокгенераторaимпульсов управления тиристорами

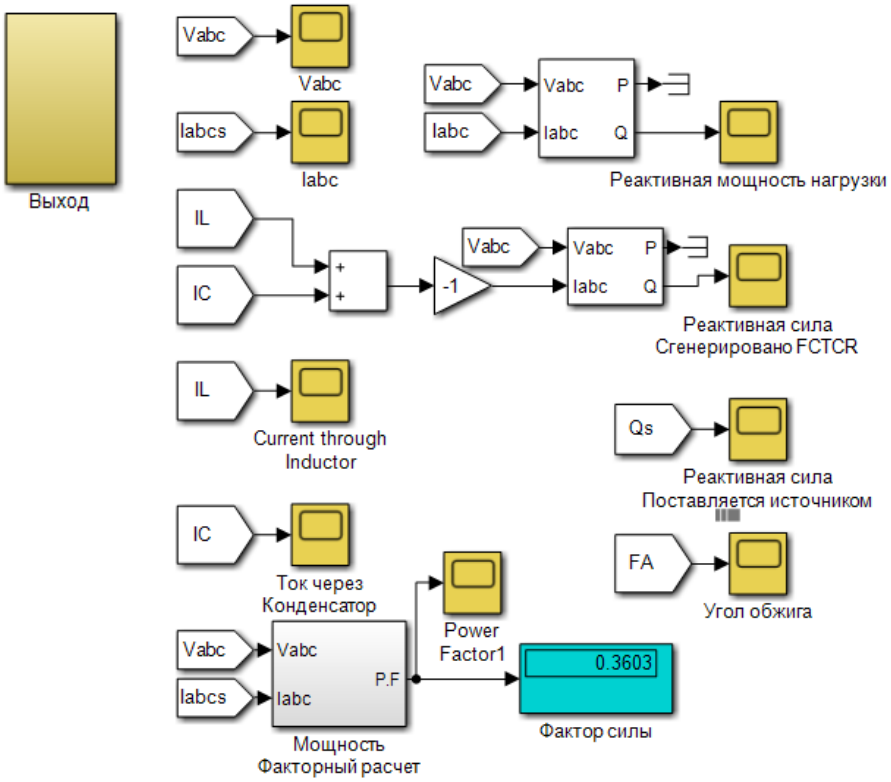


Рисунок 4.15 – Блок измерения выходного сигнала

Моделирование проводилось при следующих условиях. В качестве источника питания взят трёхфазный источник питания переменного тока напряжением 6 кВ частотой 50 Гц. В качестве нагрузки используется трехфазный асинхронный двигатель 6 кВ, активная мощность которого равна P=1000 кВт, реактивная мощность Q=3266 кВАр. Параметры элементов компенсатора: ёмкость конденсатора C=295 мкФ, индуктивность реактора L = 5мГ.

4.2.4 Результаты моделирования

Результаты моделирования электрической системы 6 кВ, полученные при помощи разработанной модели до и после включения статического компенсатора VAR (SVC) приведены в таблице 4.1. В данной таблице показаны напряжение и ток источника, реактивная мощность и коэффициент мощностиисточника до и после компенсации.

На основании результатов моделирования системы электроснабжения при использовании устройства компенсации реактивной мощности SVC сделаны следующие выводы.

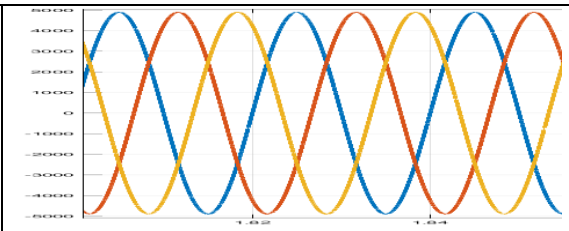
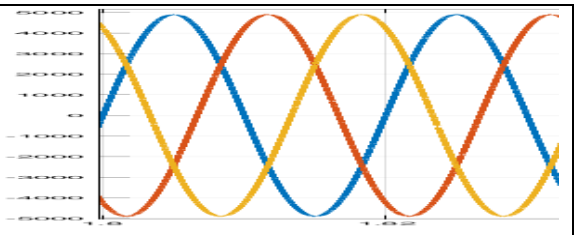
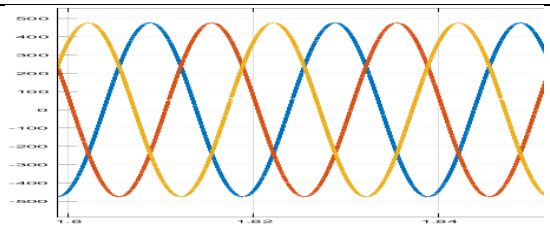
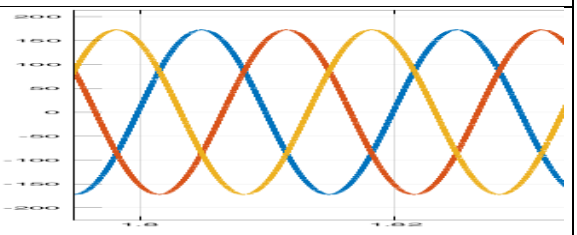
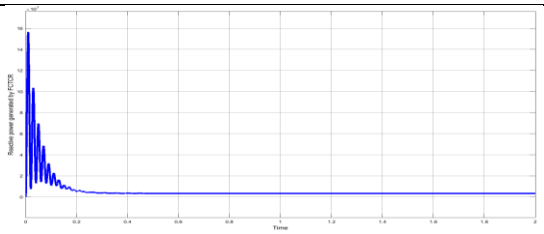
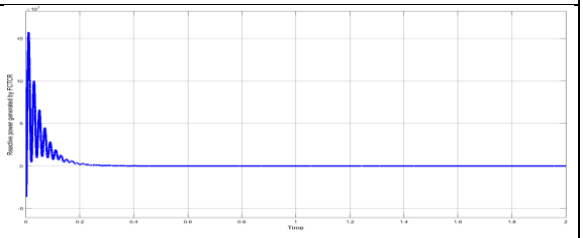
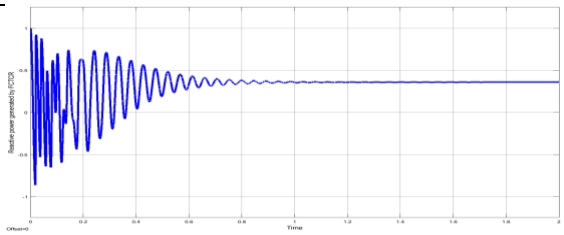
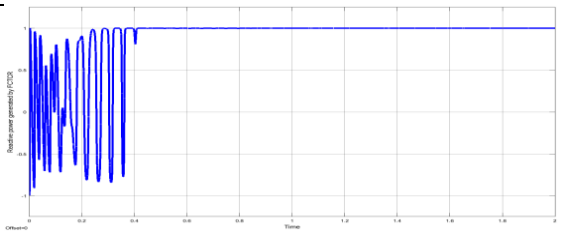
Амплитуда тока источника при компенсации реактивной мощности уменьшена с 480 А до 170 А.

Коэффициент мощности источника значительно улучшается, увеличившись с 0,36 до 0,99.

Снижение реактивной мощности источника Qs максимально, с 3200 кВАр до нуля.

Полученные результаты исследования реакции компенсаторов SVC на изменение реактивной мощности показали возможность решения компенсации реактивной мощности на их основе для всей электрической системы бокситовой шахты на шинах 6 кВ.

Таблица 4.1 – Результаты моделирования электрической системы 6 кВ до и после включения статического компенсатора VAR (SVC)

Напряжение источника до и после компенсации VAR		
Ток источника до и после компенсации VAR	 Is=480 ампер до компенсации	 Is=170 ампер после компенсации
Реактивная мощность источника до и после компенсации VAR	 Q= 3260квар до компенсации	 Q= 0квар после компенсации
Коэффициент мощности источника до и после компенсации VAR	 Cosφ= 0.36 до компенсации	 Cosφ= 0.99 после компенсации

4.2.5 Применение статического компенсатора VAR (SVC) для повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного завода

На рисунке 4.16 показана визуальная модель системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) на шинах 6 кВ распределительных систем станций ПД-1...ПД-6 [110].

Задачей статических компенсаторов VAR (SVC) является улучшение качества электроэнергии и повышение эффективности систем ее передачи и распределения за счет компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения и увеличения устойчивости работы энергосистем. Они подключены параллельно на шинах 6 кВ станций ПД-1 (VAR1)... ПД-6 (VAR6). Только на сборной шине ПД3 не устанавливается статический компенсатор, потому что коэффициент мощности здесь превышает 0,9. Каждый статический компенсатор VAR1…VAR6 имеет реактивную емкостную мощность соответственно 23,1; 6,5; 0; 18,8; 9,9; 36,5 МВАр,при индуктивности реактора L = 5 мГ. Трёхфазный источник питания напряжением 6 кВ, частотой 50 Гц. Параметры модели, которые устанавливаются в соответствии с исходными данными, показаны на рисунке 4.16 [100].

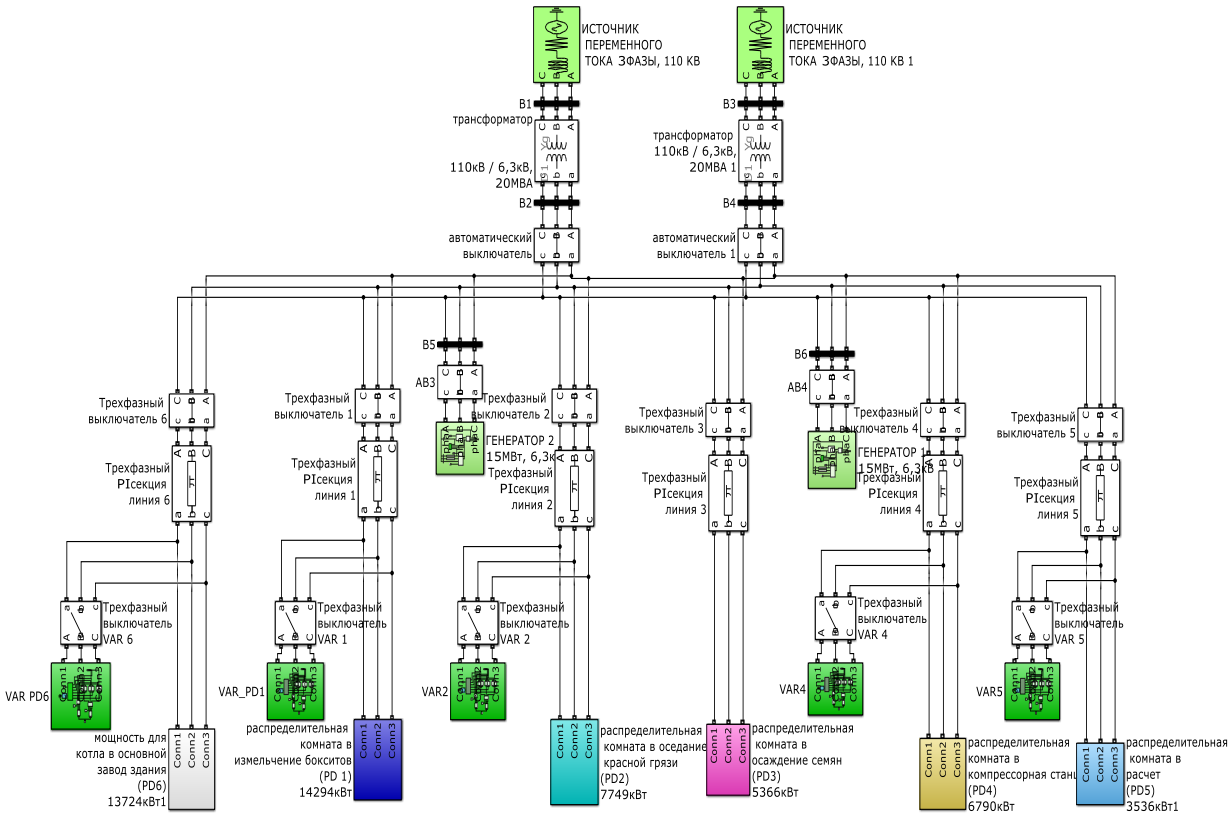


Рисунок 4.16 – Модель системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) на шинах 6 кВ

В таблицах 4.2…4.8 приведены результаты моделирования системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации СТАТКОМ и устройствами VAR (SVC) на шинах 6 кВ станций ПД-0...ПД-6. Показаны графики следующих величин: напряжение и ток нагрузки, активная мощность, реактивная мощность и коэффициент мощностина шинах 6 кВ, значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИU% и тока КНИ I%.

На рисунках 4.17…4.21 показано сравнение коэффициентов мощности, активных и реактивных мощностейпри включении STATKOM и VAR (SVC).

Анализ результатов моделирования, приведённых в таблице 4.2…4.8 и на рисунках 4.17…4.21 позволяет сделать следующие выводы.

Включение устройства компенсации реактивной мощности VAR (SVC) гарантирует синусоидальную форму волны напряжения и тока на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД-6 с постоянной амплитудой.

Коэффициент мощности на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД-6 при включении VAR (SVC) был значительно улучшен по сравнению с применяемой в настоящее время установкой STATKOM, общий коэффициент мощности на станции ПД-0 увеличился с 0,85 до 0,99.

Благодаря высокому быстродействию компенсаторов VAR (SVC), предложенное решение компенсации реактивной мощности для всей электрической системы бокситовой шахты на шинах 6 кВ повышает качество мощности, эффективность электрооборудования, а также производительность глиноземного завода в Лам Донге.

Таблица 4.2 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-0 при включении статических компенсаторов

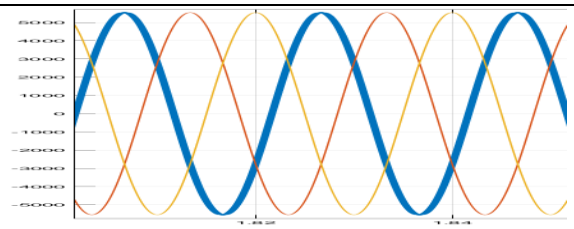
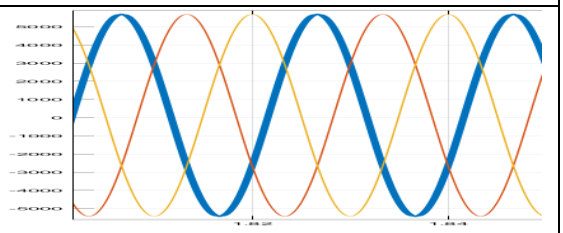
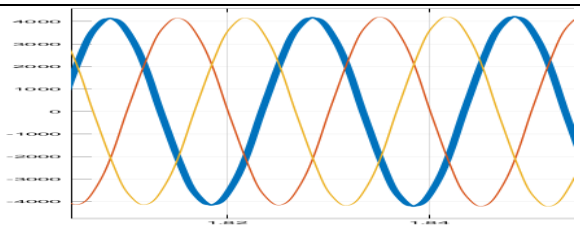
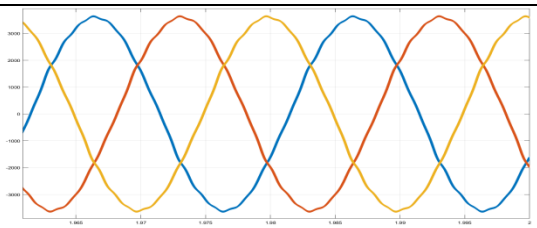
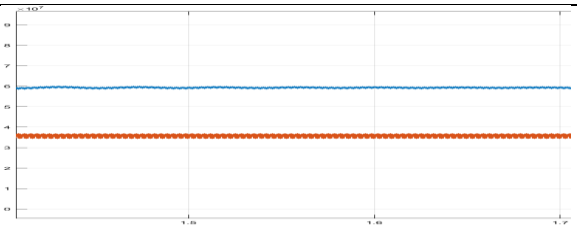
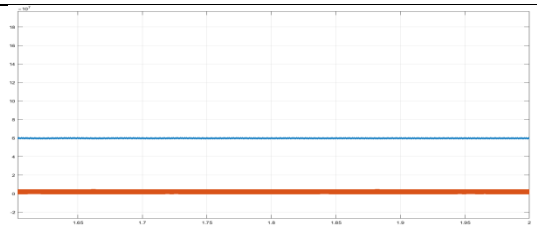
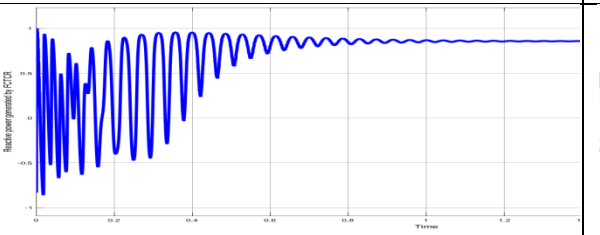
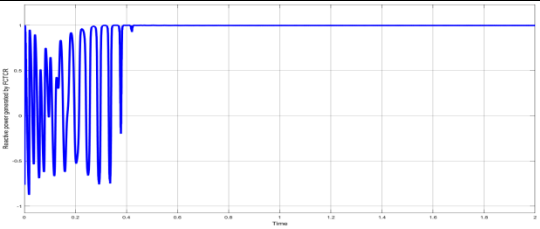
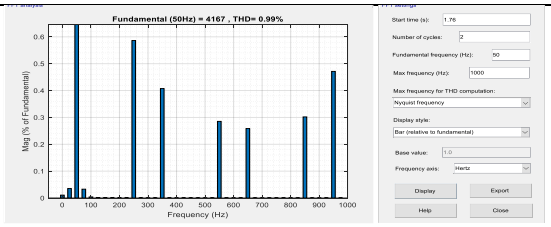
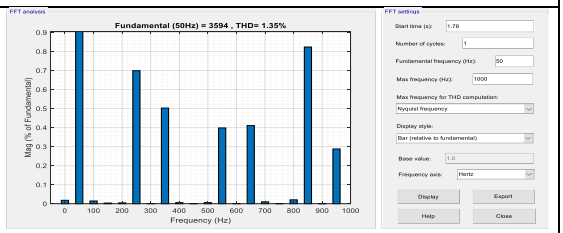
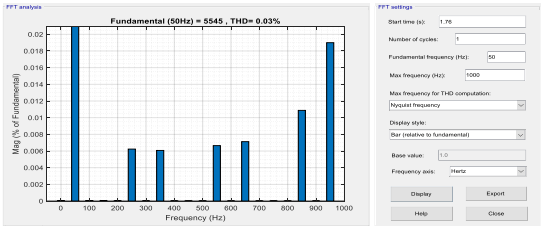
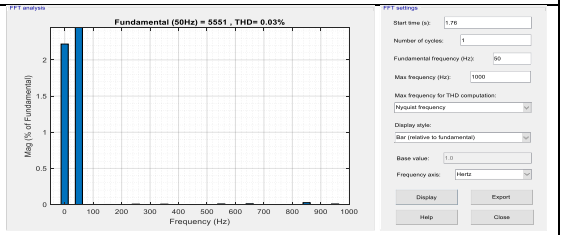
Таблица ПД-0, 6 кВ (Сборная шина всего завода)		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=4200A	 I=3600A
Реактивная мощность	 P=59МВт,Q=36 Мвар	 P=60МВт,Q=0,5 Мвар
Коэффициент мощности	 Cosφ= 0,85	 Cosφ = 0,99
КНИI, %		
КНИU, %		

Таблица 4.3 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-1 при включении статических компенсаторов

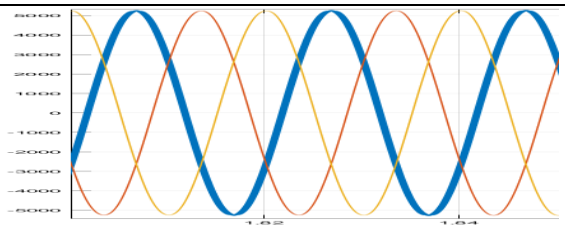
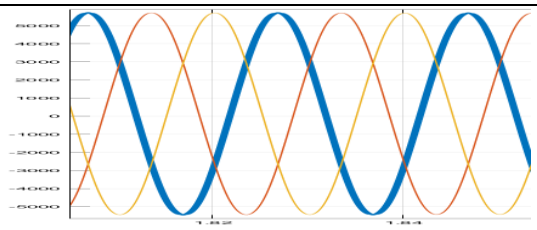
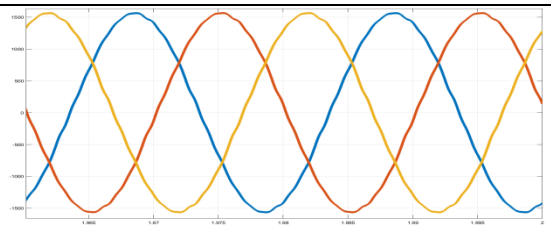
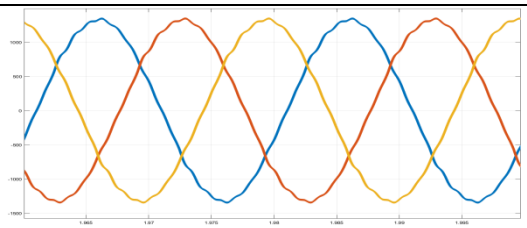
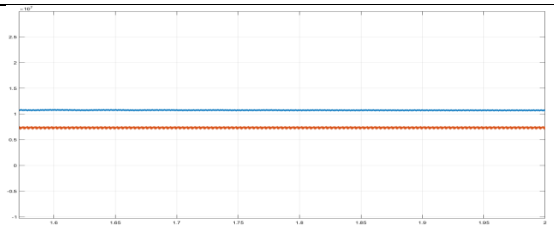
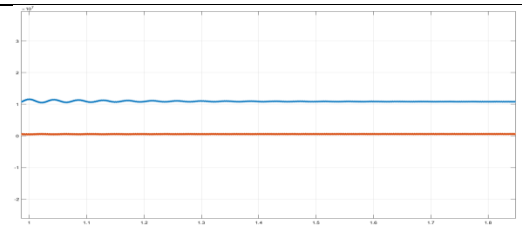
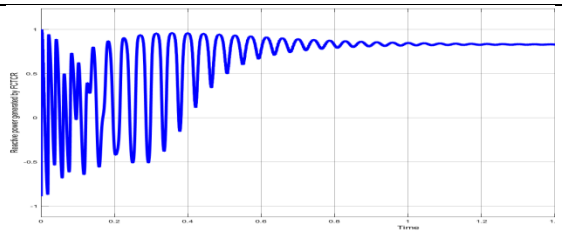
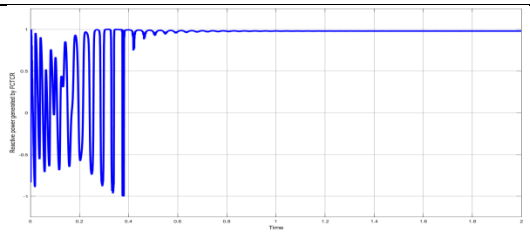
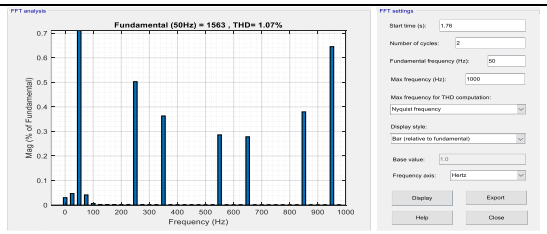
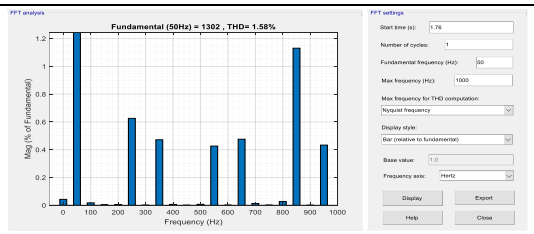
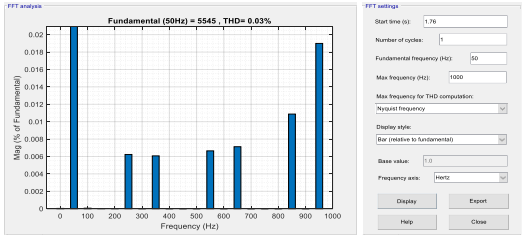
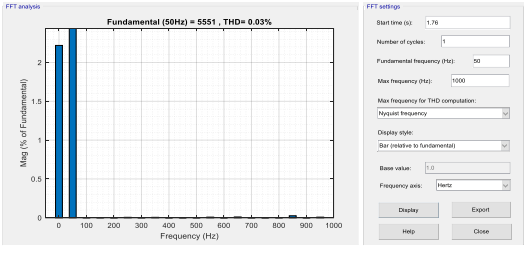
Таблица ПД-1, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=1565A	 I=1300A
Реактивная мощность	 P=10.7МВт, Q= 7,3Мвар	 P=10,8 МВт, Q= 0 Мвар
Коэффициент мощности	 Cosφ$_1$= 0,82	 Cosφ = 0,99
КНИ I, %		
КНИ U, %		

Таблица 4.4 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-2 при включении статических компенсаторов

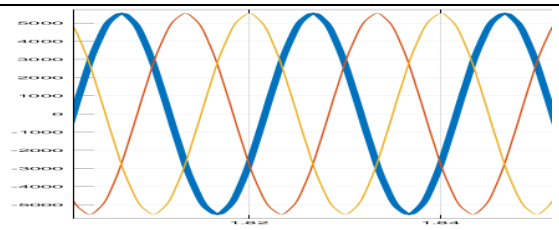
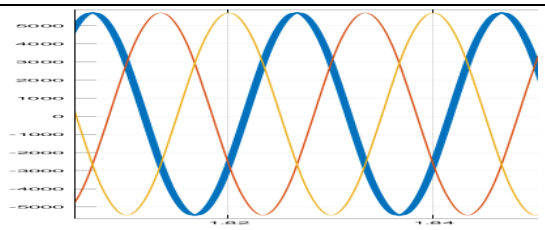
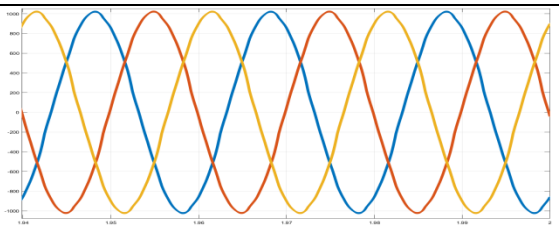
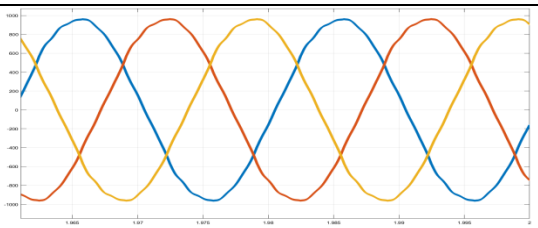
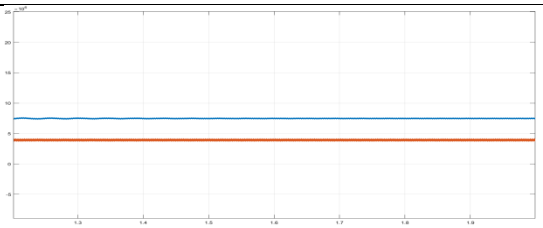
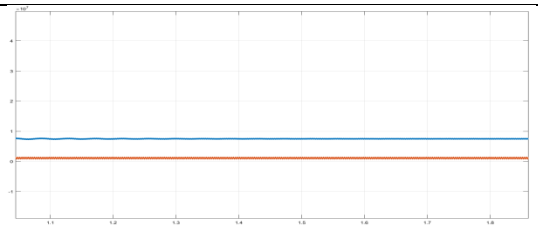
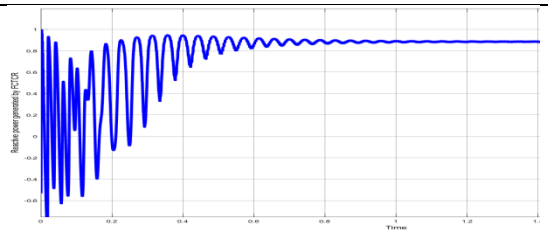
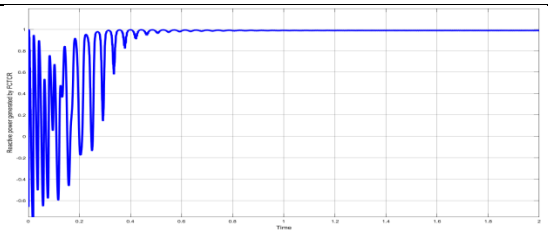
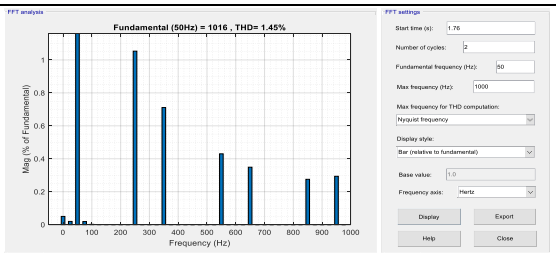
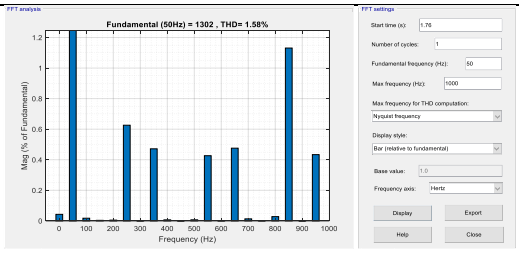
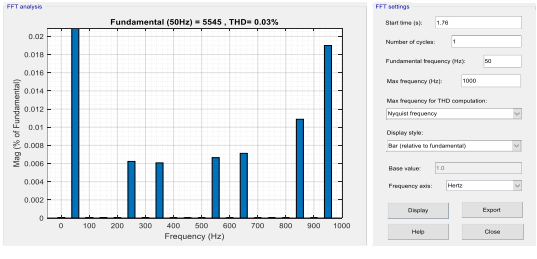
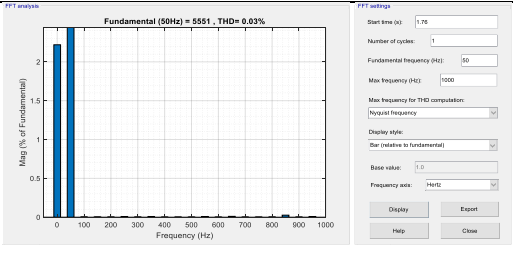
Таблица ПД-2, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=1020A	 I=915A
Реактивная мощность	 P=7.46МВт, Q= 4Мвар	 P=7.5 МВт, Q= 0
Коэффициент мощности	 Cosφ= 0,89	 Cosφ= 0,99
КНИ I, %		
КНИU, %		

Таблица 4.5 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-3 при включении статических компенсаторов

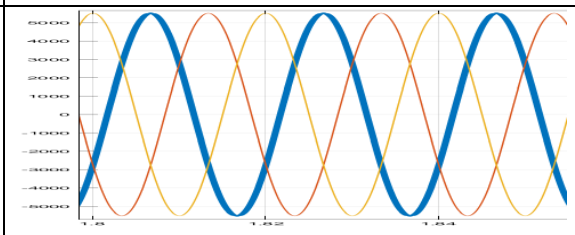
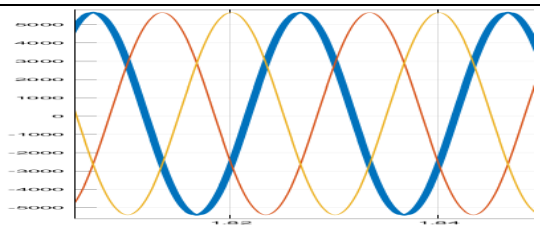
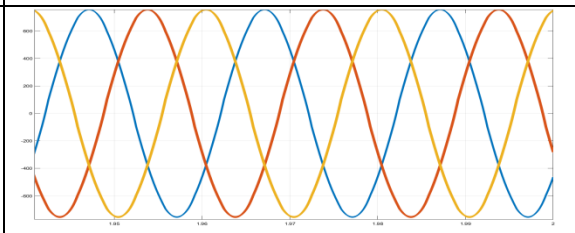
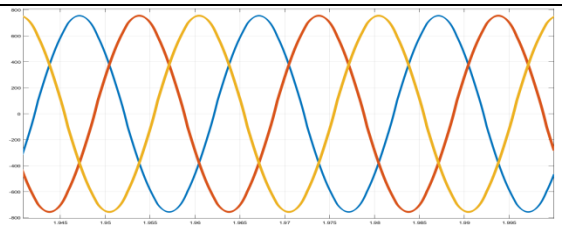
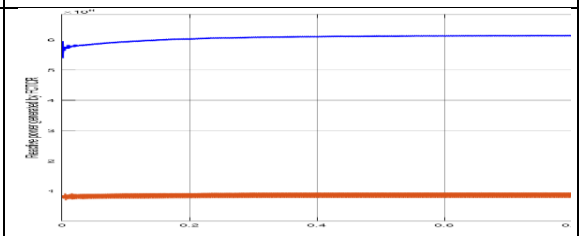
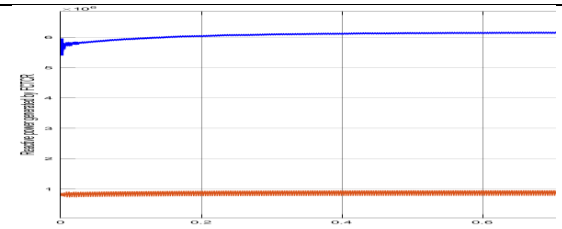
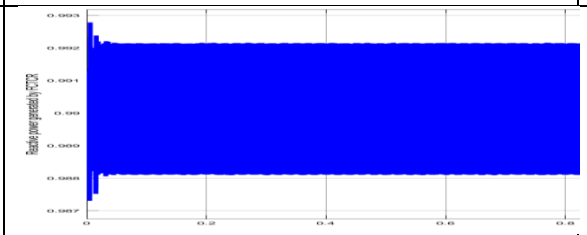
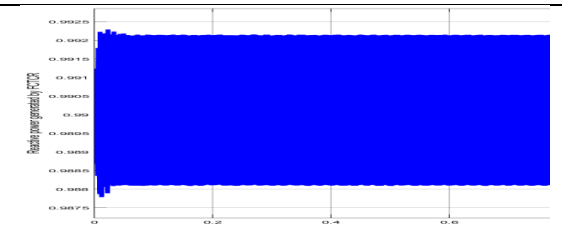
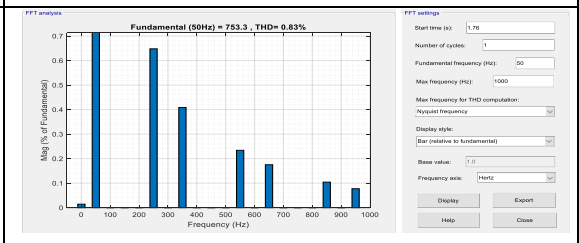
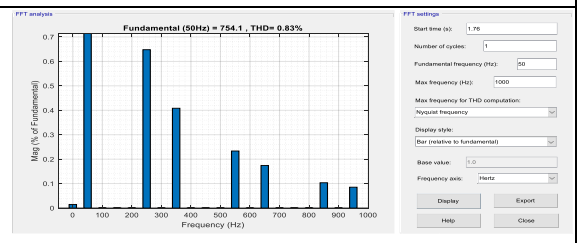
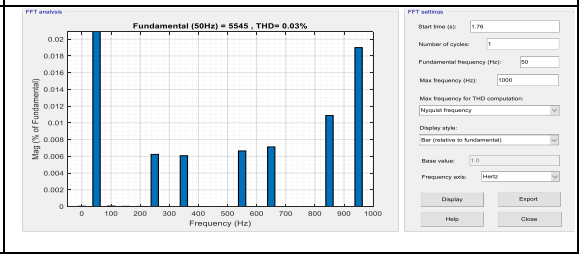
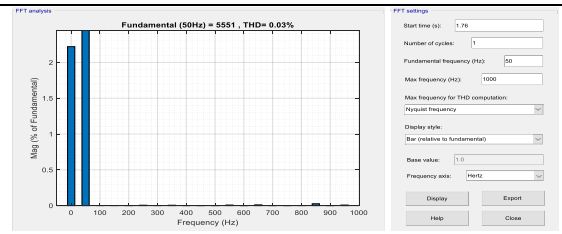
Таблица ПД-3, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=755A	 I=755A
Реактивная мощность	 P=6,15МВт, Q= 0,9 Мвар	 P_3=6,15МВт, Q_3= 0,9 Мвар
Коэффициент мощности	 Cosφ= 0,99	 Cosφ= 0,99
КНИI, %		
КНИU, %		

Таблица 4.6 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-4 при включении статических компенсаторов

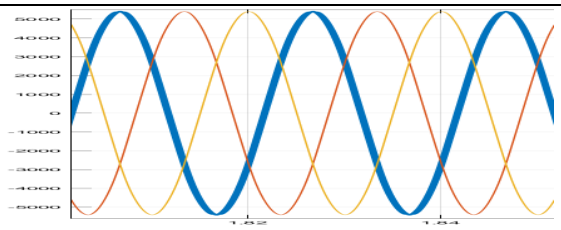
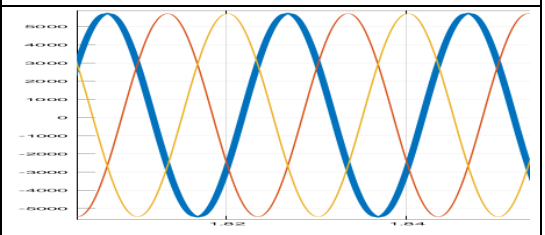
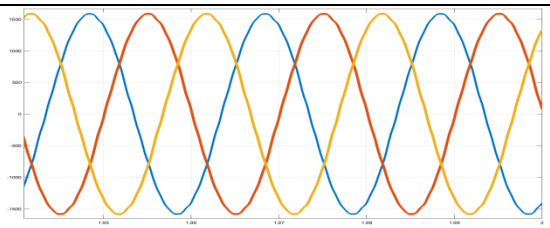
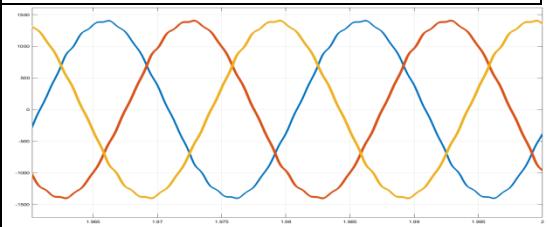
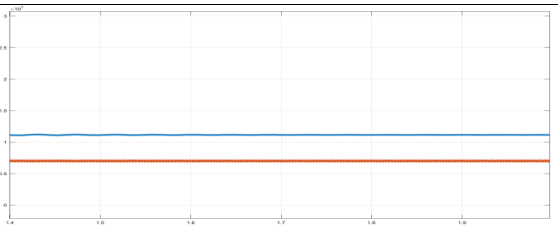
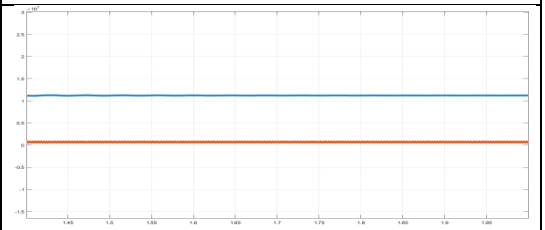
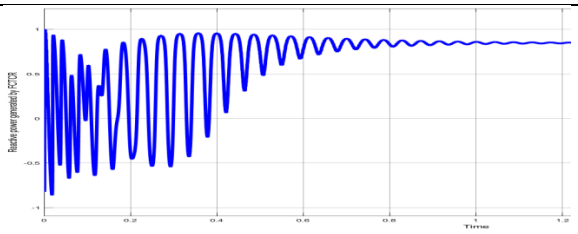
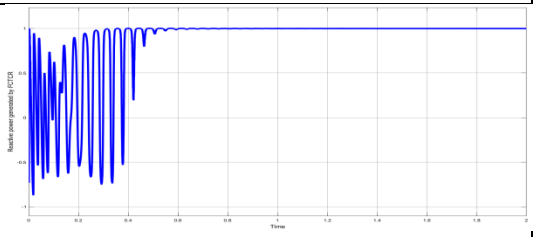
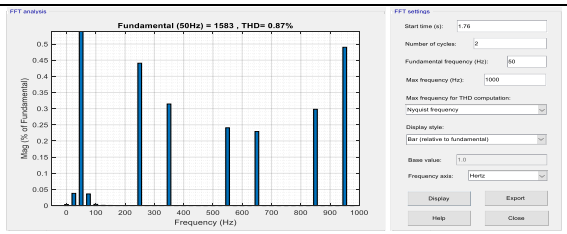
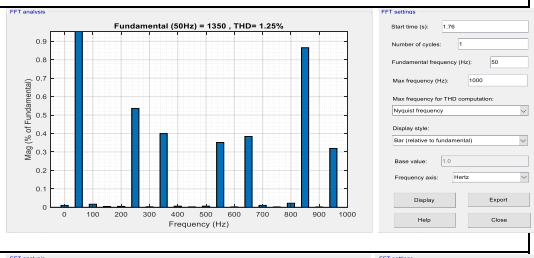
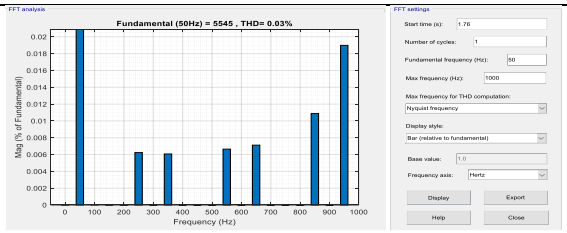
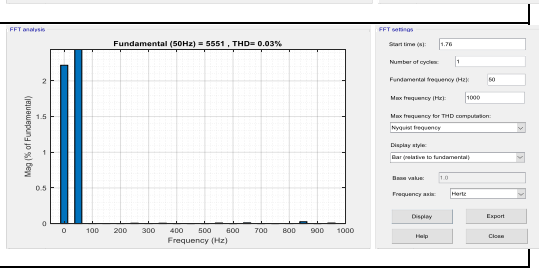
Таблица ПД-4, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=1584A	 I=1348A
Реактивная мощность	 P= 11.1МВт, Q= 7Мвар	 P= 11.2 МВт, Q= 0 Мвар
Коэффициент мощности	 Cosφ = 0,87	 Cosφ = 0,99
КНИ I, %		
КНИU, %		

Таблица 4.7 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-5 при включении статических компенсаторов

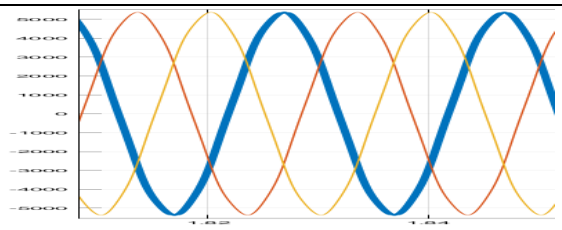
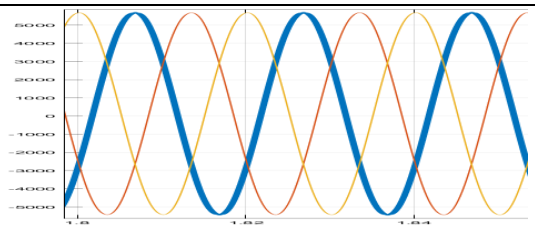
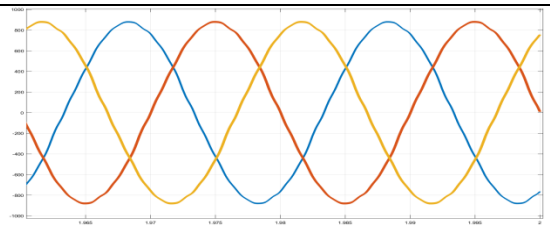
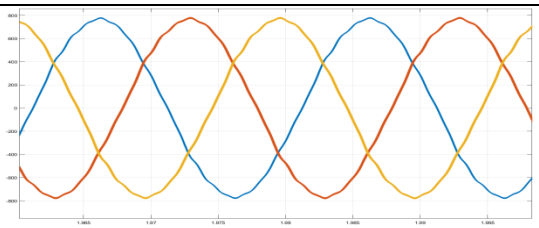
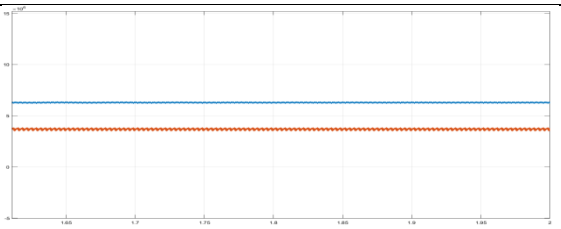
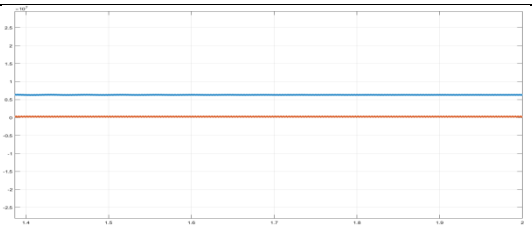
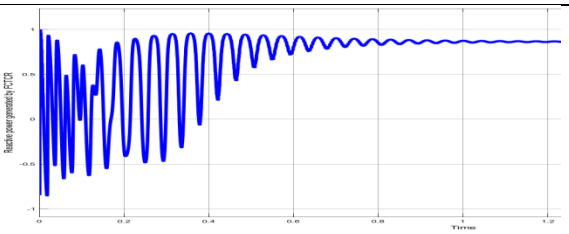
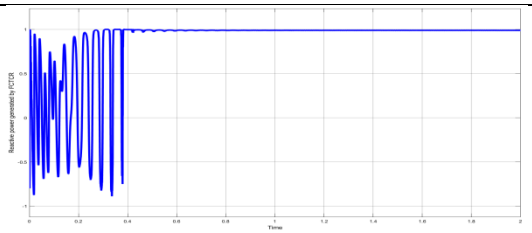
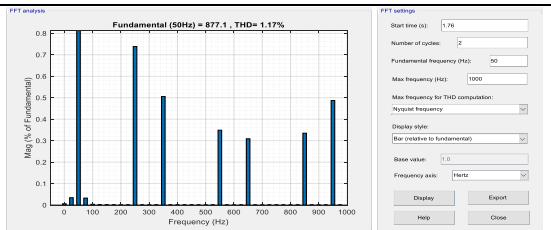
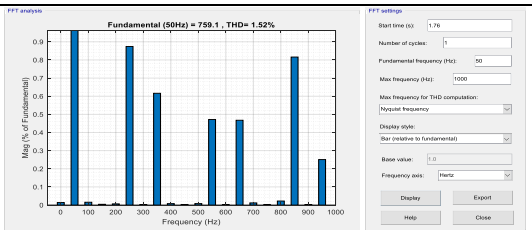
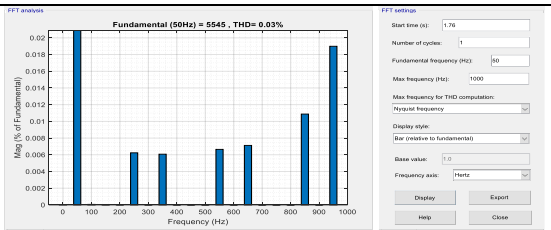
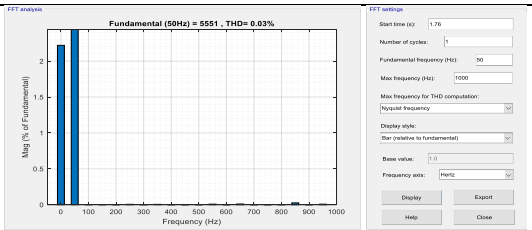
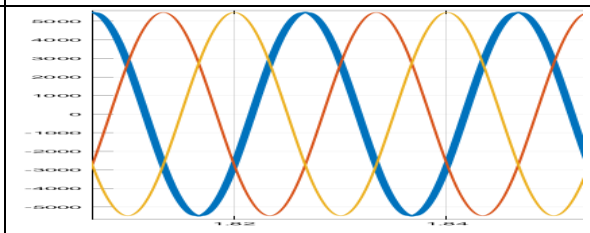
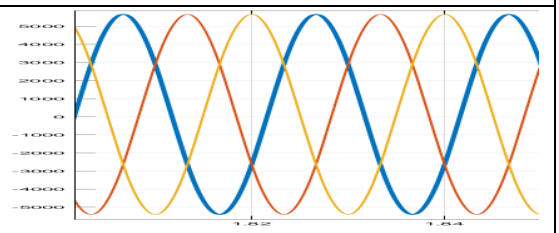
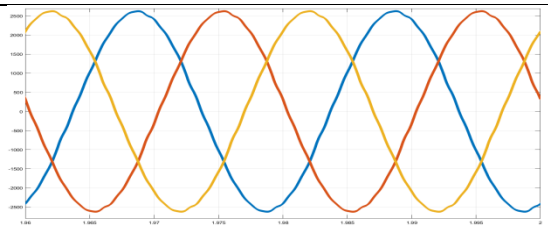
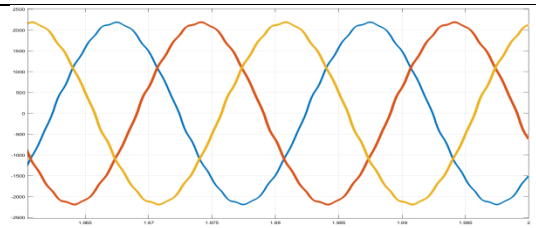
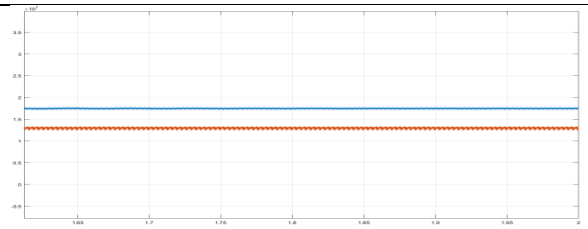
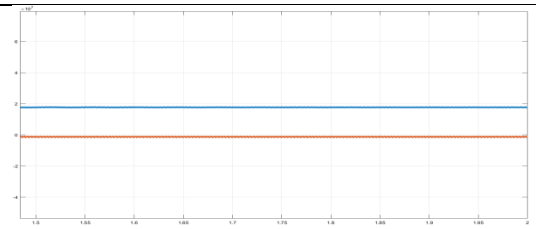
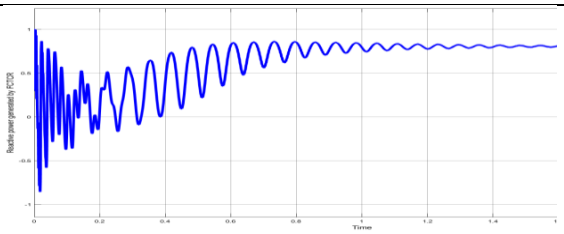
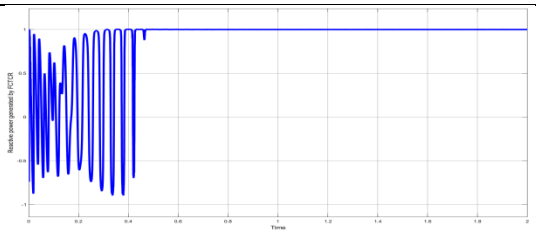
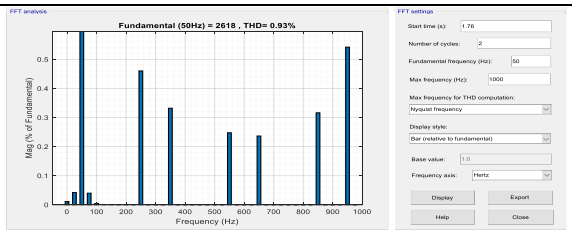
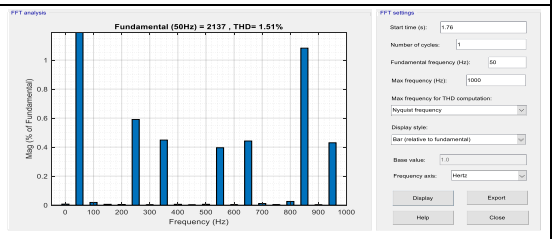
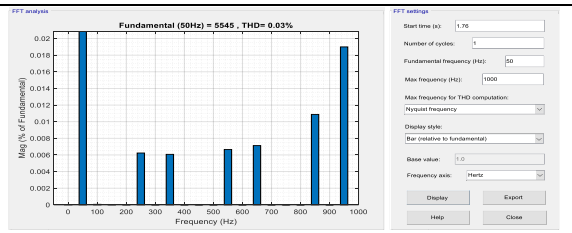
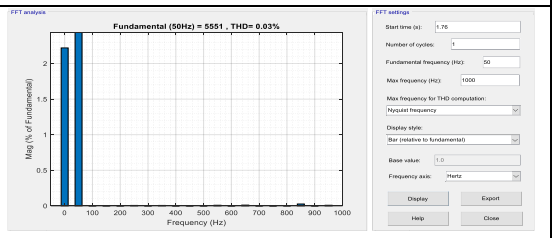
Таблица ПД-5, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=880A	 I=760A
Реактивная мощность	 P= 6,3МВт, Q= 3,65 Мвар	 P= 6,32МВт, Q = 0Мвар
Коэффициент мощности	 Cosφ= 0,87	 Cosφ = 0,99
КНИ, %		
КНИU, %		

Таблица 4.8 – Результаты моделирования электрической системы на шинах 6 кВ станции ПД-6 при включении статических компенсаторов

Таблица ПД-6, 6 кВ		
	STATKOM	VAR (SVC)
Напряжение		
Ток	 I=2625A	 I=2168A
Реактивная мощность	 P= 17,5 МВт, Q= 13Мвар	 P= 17,8МВт, Q= 0Мвар
Коэффициент мощности $ПД_6$	 Cosφ= 0.8	 Cosφ= 0.99
КНИI, %		
КНИU,%		

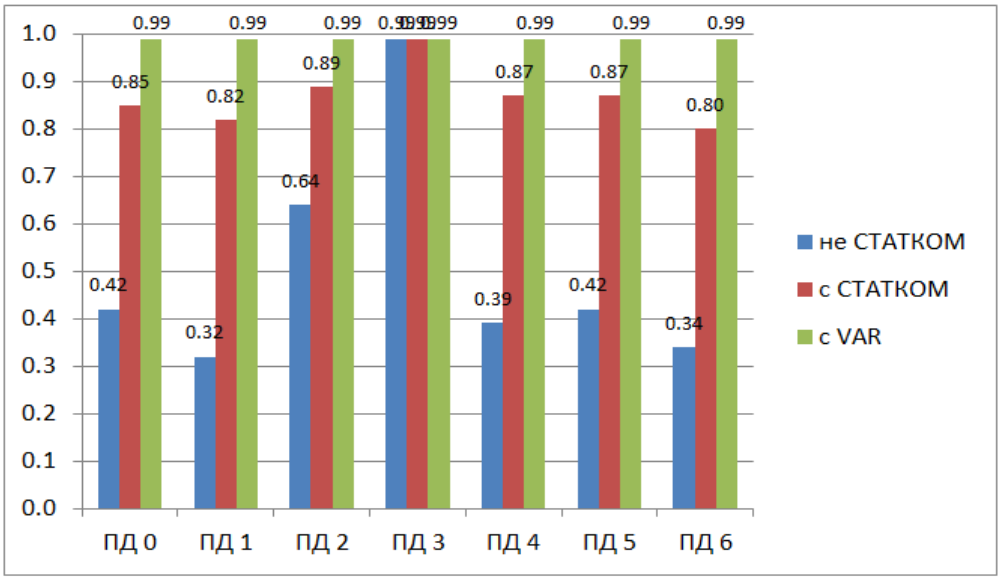


Рисунок 4.17 – Сравнение коэффициентов мощности при включении STATKOM и VAR (SVC)

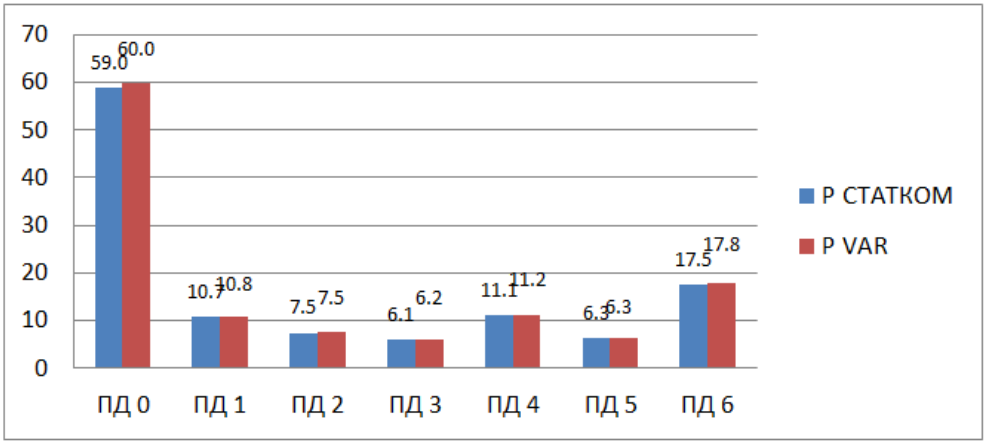


Рисунок 4.18 – Сравнение активных мощностей при включении STATKOM и VAR (SVC)

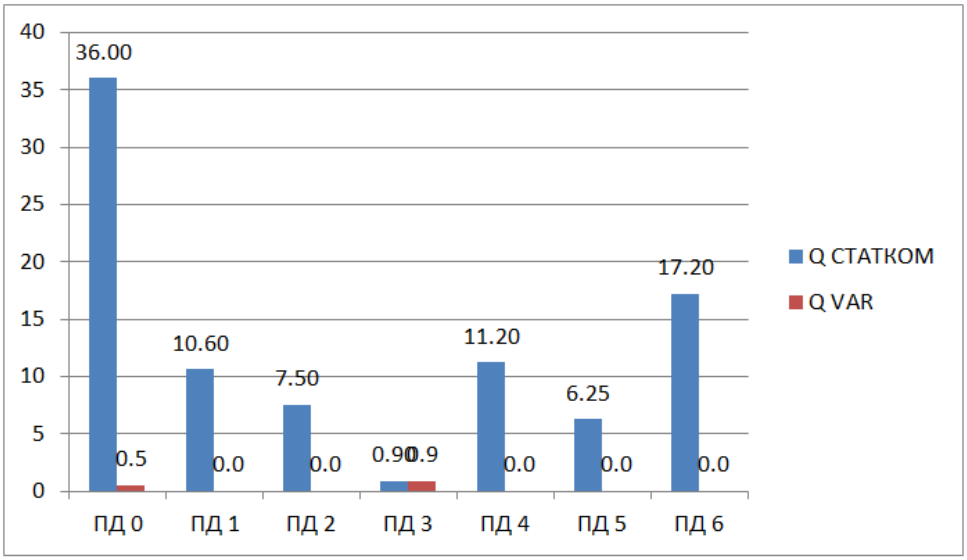


Рисунок 4.19 – Сравнение реактивных мощностей при включении STATKOM и VAR (SVC)

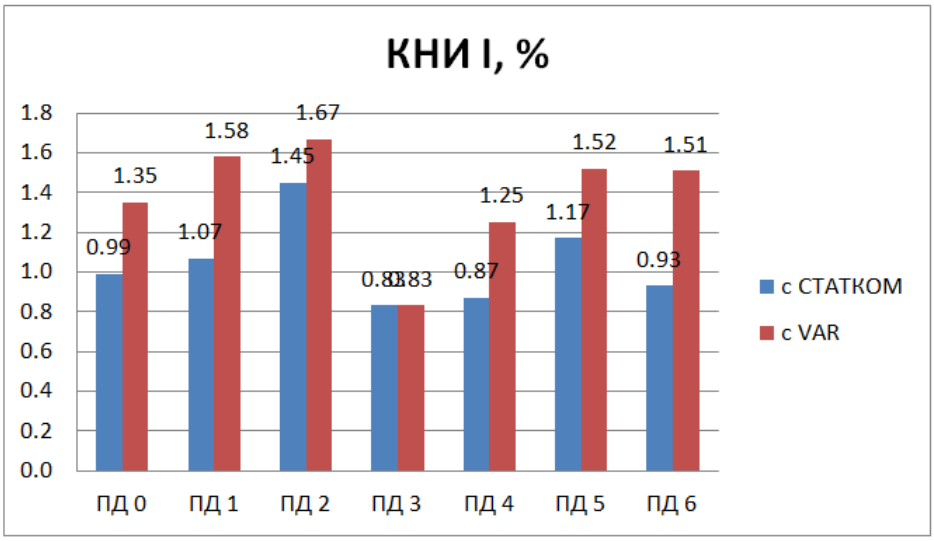


Рисунок 4.20 – Сравнение коэффициентов гармоник тока при включенных СТАТКОМ и VAR (SVC)

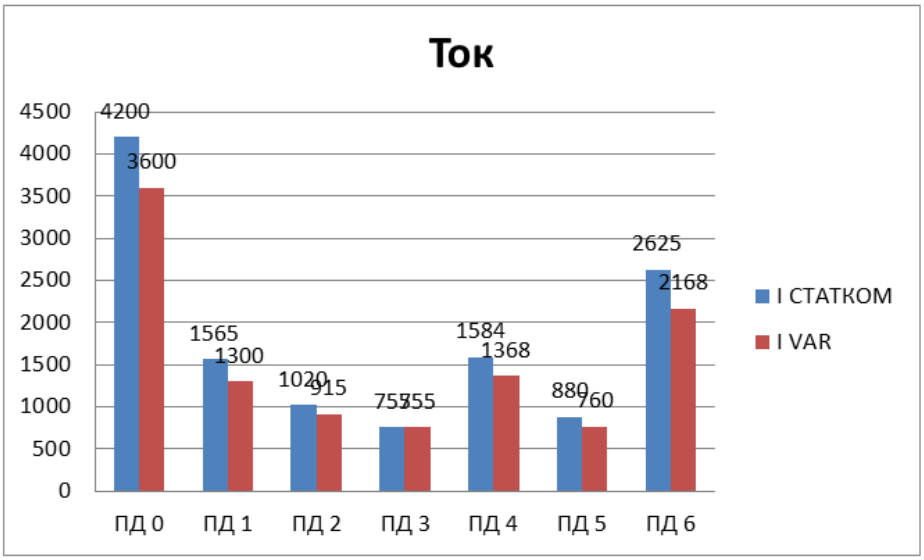


Рисунок 4.21 – Сравнение тока при включенных СТАТКОМ и VAR (SVC)

Выводы

Включение СТАТКОМов приводит к увеличению коэффициента мощности. Коэффициент мощности на общей шине станции (ПД-0) увеличился с 0,42 до 0,85. Однако включение СТАТКОМов не позволяет добиться дальнейшего увеличения коэффициента мощности на шинах 6 кВ за исключением шины ПД-3. Согласно стандартам электроэнергетики Вьетнама коэффициент мощности должен быть от 0,9 и более. В системе СТАТКОМ конденсаторы переключаются непосредственно вручную, время переходного процесса в системе увеличивается, вызывая нестабильность энергосистемы и сокращая срок службы оборудования.

Предложено решение компенсации реактивной мощности посредством применения VAR (SVC) для 3-фазных систем электропитания на шинах 6 кВ бокситового завода Лам Донг, заменяющее STATKOM.

Включение устройства компенсации реактивной мощности VAR (SVC) гарантирует синусоидальную форму волны напряжения и тока на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД-6 с постоянной амплитудой.

Коэффициент мощности на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД-6 при включении VAR (SVC) значительно возрастает по сравнению с прменяемой в настоящее время

установкой СТАТКОМ, общий коэффициент мощности на станции ПД-0 увеличился с 0,85 до 0,99.

С помощью системы статической компенсации VAR, рабочий ток завода снижается с 4200 до 3600 А, что увеличивает перегрузочную способность завода, гармоники тока на шине 6 кВ также уменьшаются по величине, что приводит к более стабильной работе.

Благодаря высокому быстродействию компенсаторов VAR (SVC), предлагаемое решение компенсации реактивной мощности для всей электрической системы бокситовой шахты на шинах 6 кВ повышает качество мощности, эффективность электрооборудования, а также производительность глиноземного завода в Лам Донге.

ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГЛИНОЗЕМНОГО ЗАВОДА

Обоснование решений по повышению качества электроэнергии приведено на примере системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам [11], особенности которой были рассмотрены в первой главе.

Для регулирования скорости электродвигателей различных машин и механизмов на глиноземном заводе широко используются преобразователи частоты, которые являются нелинейной нагрузкой для системы электроснабжения. Наличие нелинейных нагрузок приводит к перегреву кабеля и повреждению изоляции, перегреву двигателей, механическому резонансу и вибрации. При наличии конденсаторных установок возможен их перегрев и разрушение диэлектрика. Сети передачи данных и измерительное оборудование дают ложные результаты [20].

Таким образом, наличие нелинейных нагрузок приводит к нарушению нормальной работы предприятия. Этот вывод подтверждается результатами моделирования, сделанными в главе 2. Поэтому на шинах 0,4 кВ предлагается включение АФГ для прямой фильтрации гармоник на линиях, содержащих нелинейные нагрузки. Схема разработаного активного фильтра гармоник выполнена на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции ШИМ. Подробное описание разработаной схемы АФГ приведено в главе 3.

В главе 4 приведены результаты исследований, показывающие эффективность примененияядля компенсация реактивной мощности на шинах 6 кВ распределительных станций ПД-1...ПД-6 статических компенсаторов реактивной мощности VAR (SVC).

На основании выполненных исследований предложено решение совместного применения статических компенсаторов реактивной мощности VAR

(SVC) и активных фильтров гармоник в системе электроснабжения глиноземного завода, что позволит одновременно с улучшением коэффициента мощности сети снизить уровень высших гармоник тока и напряжения до их нормативных значений [111].

Для обоснования принятого решения при помощи программного обеспечения MatlabSimulink разработана визуальная модель схемы электроснабжения завода, учитывающая наличие нелинейных нагрузок, АФГ и VAR (SVC) и позволяющая оценить энергетические показатели системы электроснабжения при отсутствии и наличии VAR (SVC) и АФГ [112-113].

5.1 Модель системы электроснабжения глиноземного завода при наличии активных фильтров гармоник 0,4 кВ и компенсирующих устройств реактивной мощности 6 кВ

Активный фильтр гармоник, как средство повышения качества электрической энергии, установлен на шинах 0,4 кВ распределительных станций ПД-1...ПД-6, к которым подключена нелинейная нагрузка. Сигнал для измерения напряжения нагрузки и тока нагрузки U'_L и I'_L поступает в систему управления активного фильтра (раздел 3.1).

На рисунках 5.1...5.6 приведены визуальные модели распределительных систем станций ПД-1...ПД-6 при включении АФГ на шинах 0,4 кВ.

Система электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) на шинах 6 кВ приведена на рисунке 4.16.

Визуальная модель схемы электроснабжения завода, учитывающая наличие нелинейных нагрузок, АФГ и VAR (SVC) и позволяющая оценить энергетические показатели системы электроснабжения при одновременном включенииVAR (SVC) и АФГ получается путём объединения моделей, приведённых на рисунках 4.16, 5.1…5.6.

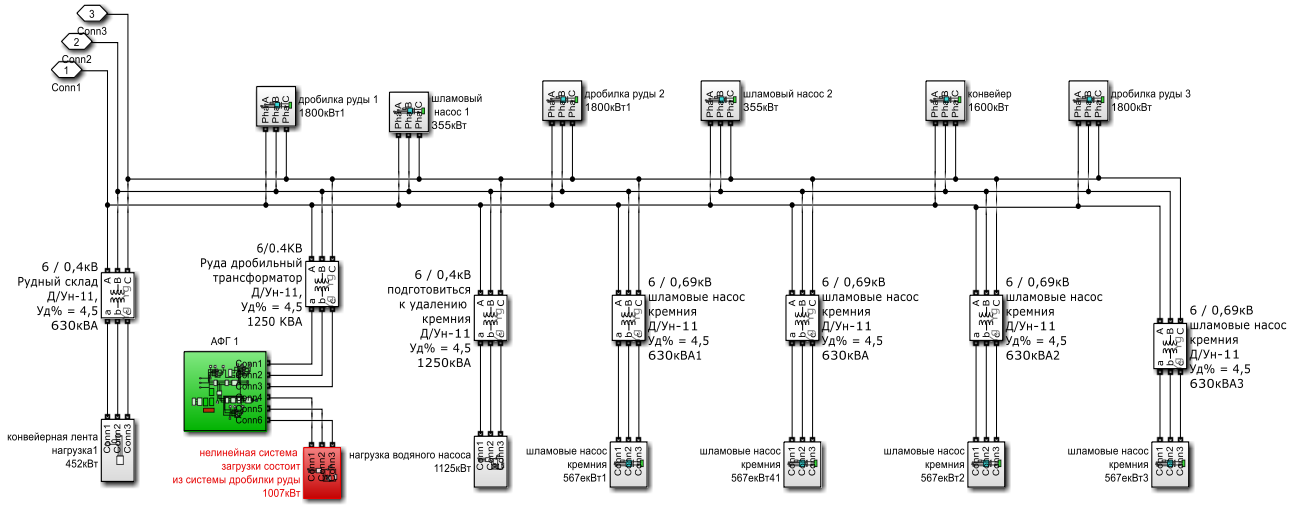


Рисунок 5.1 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-1 (6кВ, 14294 кВт)

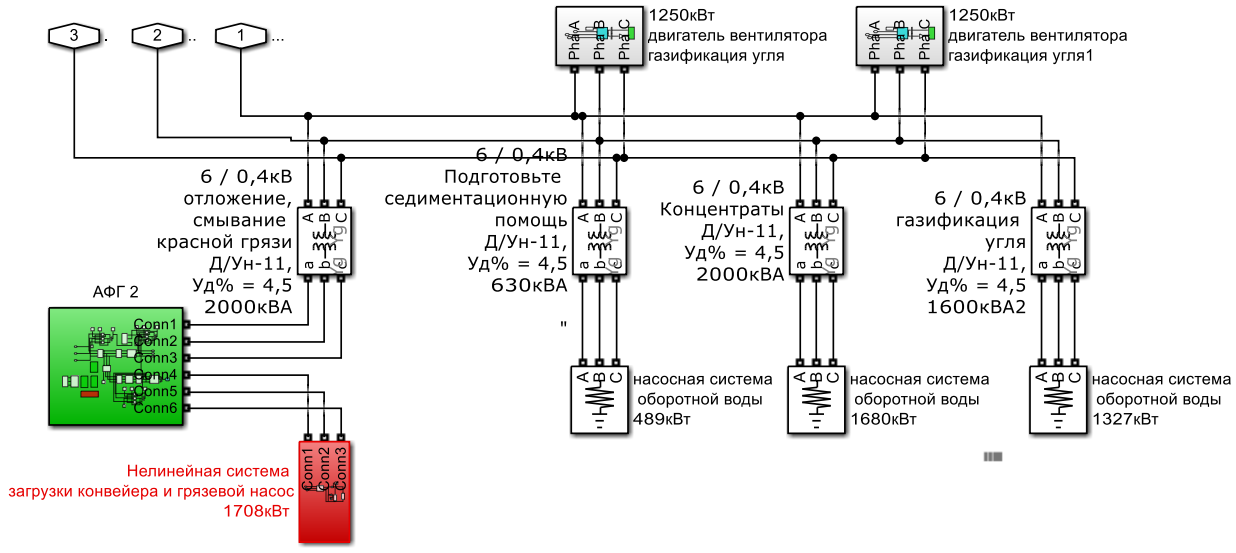


Рисунок 5.2 –Модель станции распределения электроэнергии ПД-2 (6кВ, 7749 кВт)

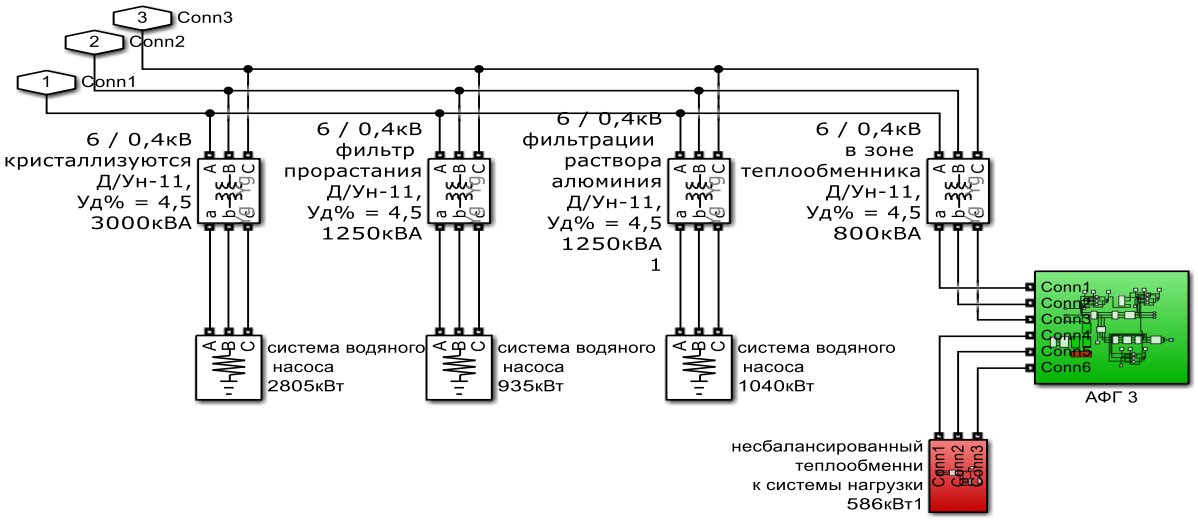


Рисунок 5.3 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-3 (6кВ, 5366 кВт)

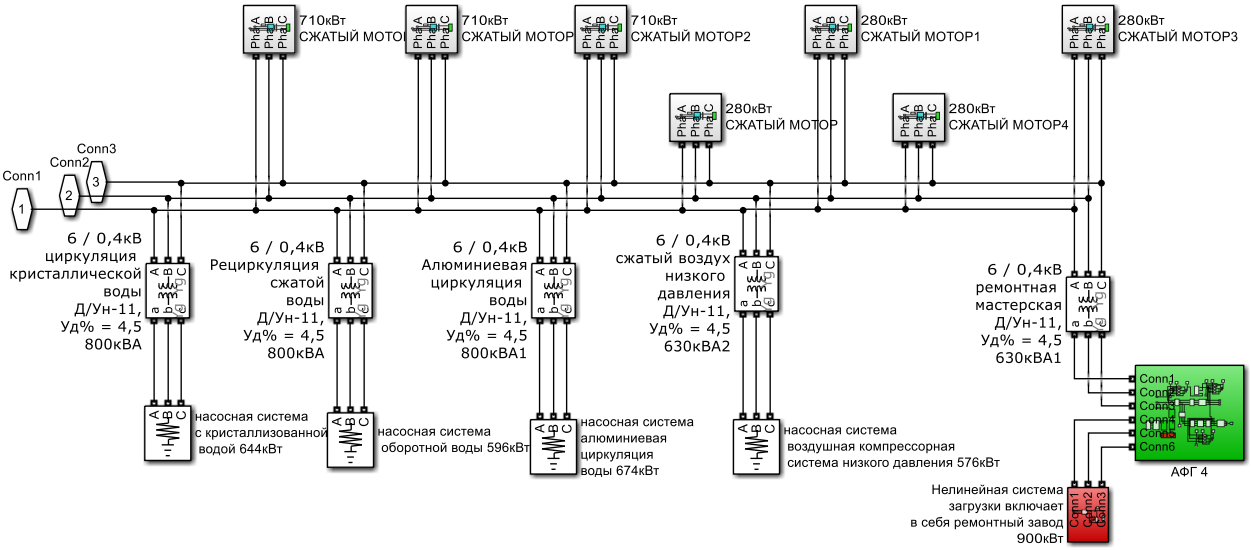


Рисунок 5.4 –Модель станции распределения электроэнергии ПД-4 (6кВ, 6790 кВт)

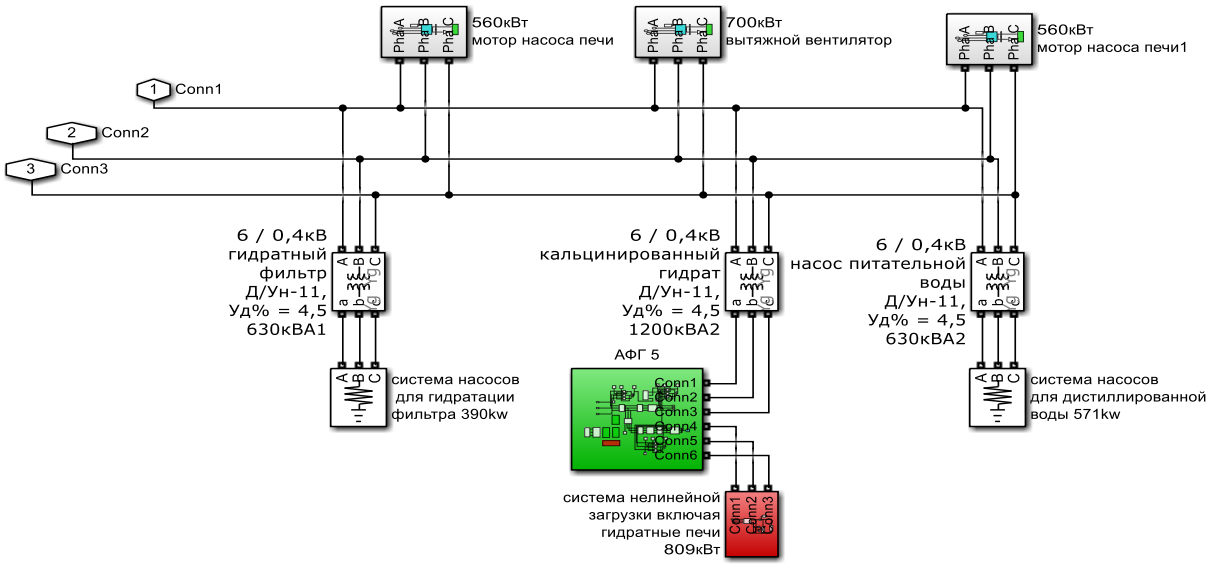


Рисунок 5.5 –Модель станции распределения электроэнергии ПД-5 (6кВ, 3536 кВт)

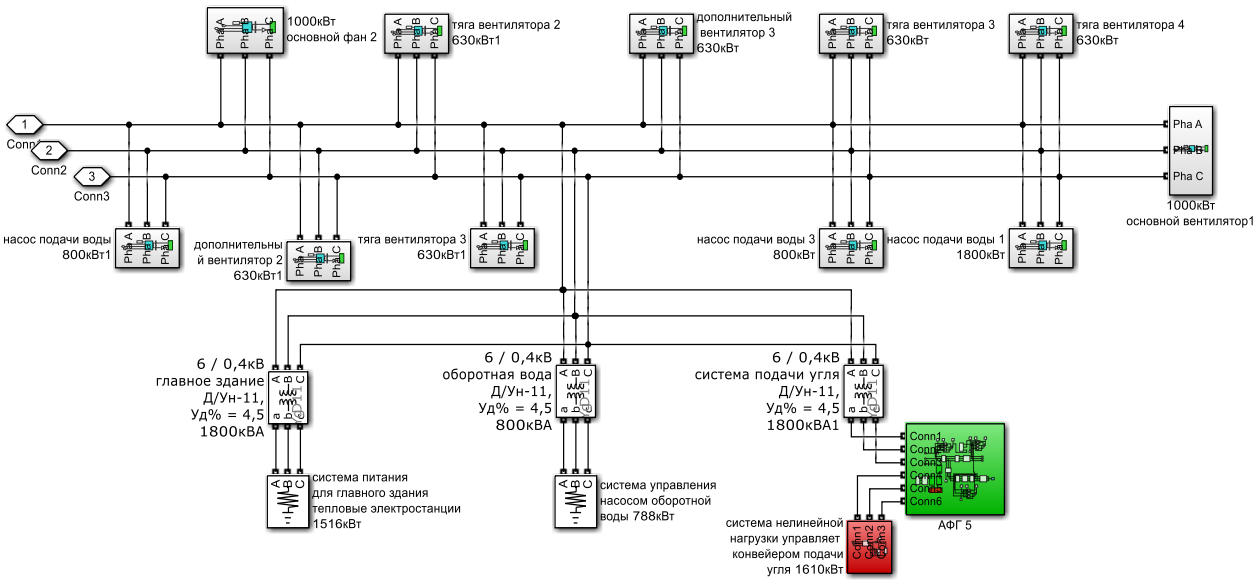


Рисунок 5.6 –Модель станции распределения электроэнергии ПД-6 (6кВ, 13724 кВт)

5.2 Результаты моделирования

Параметры для модели устанавливаются в соответствии с исходными данными, приведенными на рисунках 4.16, 5.1…5.6.

Исследования на моделях проводились для трех случаев:

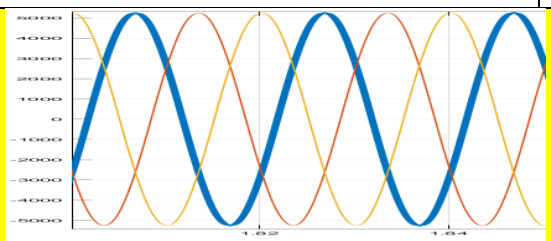
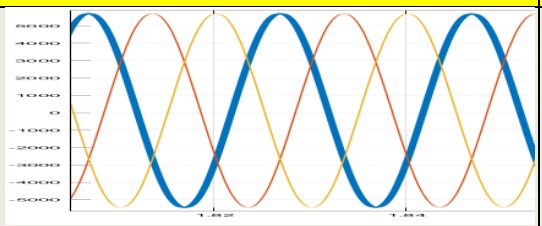
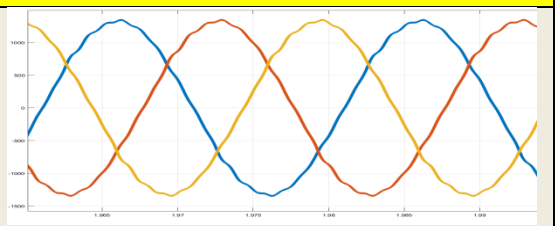
случай I –СТАТКОМ и активный фильтр гармоник отсутствуют;

случай II – с компенсацией реактивной мощности VAR (SVC), без активного фильтра гармоник;

случай III – с компенсацией реактивной мощности VAR (SVC), с активным фильтром гармоник.

В таблицах 5.1…5.6 приведены формы кривых тока и напряжения на шинах 6 кВ распределительных станций ПД-1…ПД-6, показывающие формы кривых напряжения и тока при отсутствии VAR (SVC) и АФГ (случай I), при включении только VAR (SVC) (случай II) и одновременном включении VAR (SVC) и АФГ (случай III).

Таблица 5.1 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-1

Таблица ПД-1	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		I=1565A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		 I=1300A

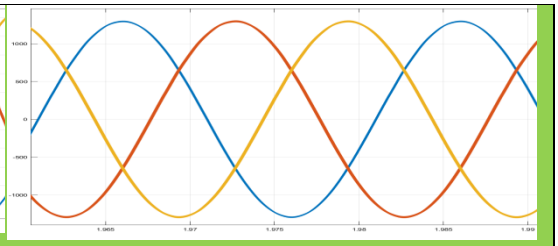
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		 I=1265A

Таблица 5.2 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-2

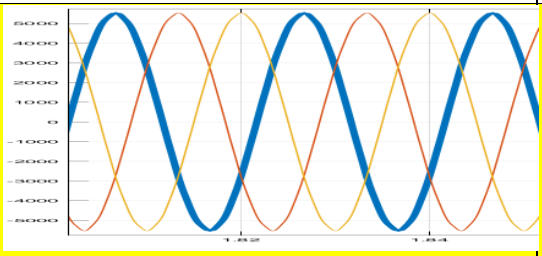
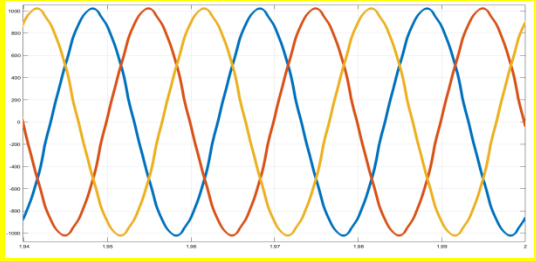
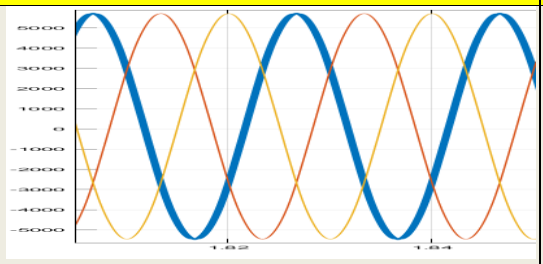
Таблица ПД-2	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		 I=1020A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		 I=915A
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		 $I_{ПД2}$=860A

Таблица 5.3 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-3

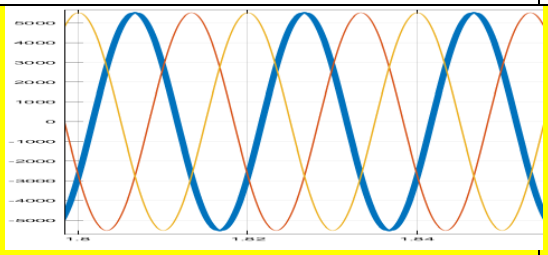
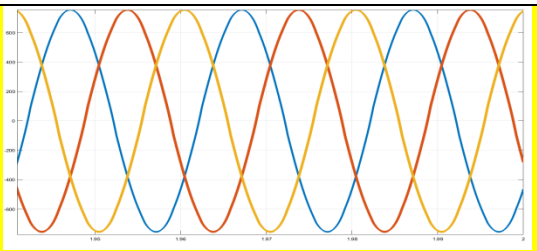
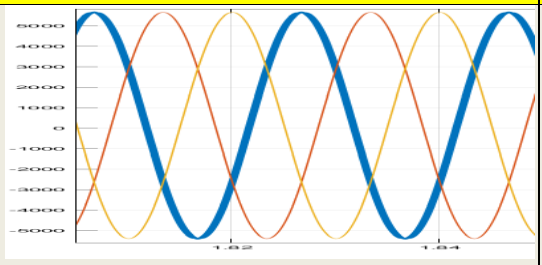
Таблица ПД-3	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		 I=755A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		I=755A
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		$I_{ПДЗ}$=738A

Таблица 5.4 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-4

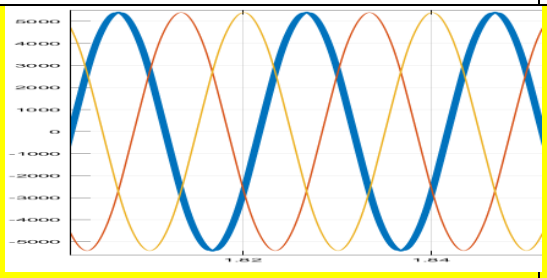
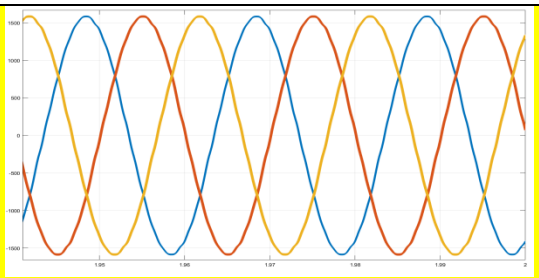
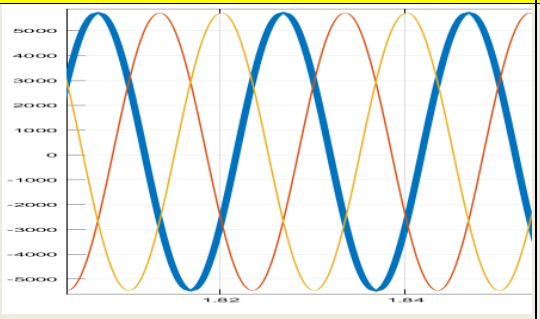
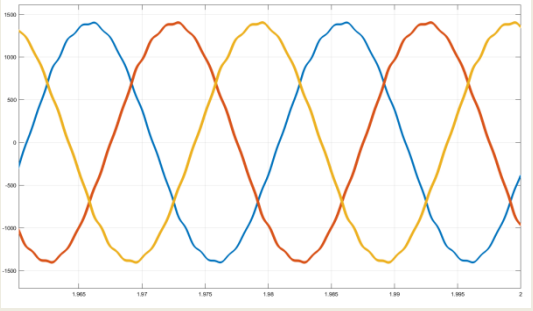
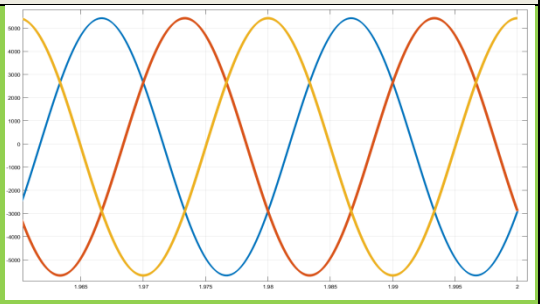
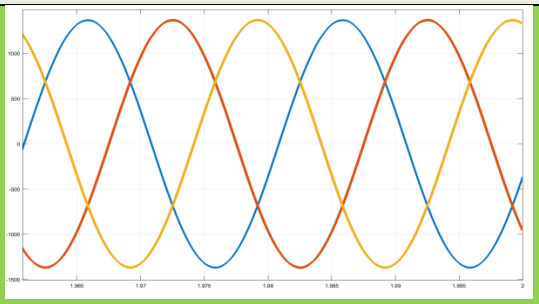
Таблица ПД-4	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		 I=1584A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		 I=1348A
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		 $I_{ПД4}$=1322A

Таблица 5.5 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-5

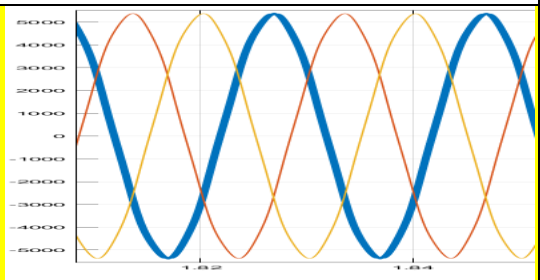
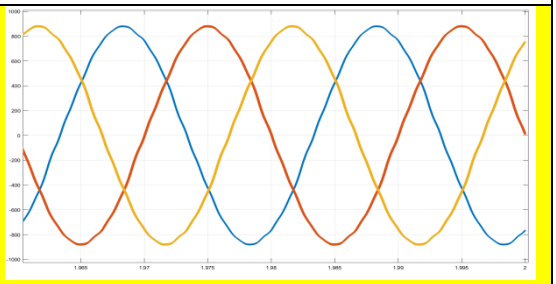
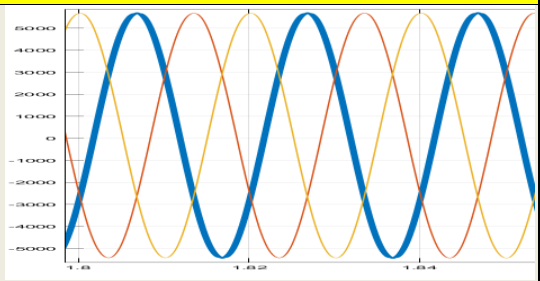
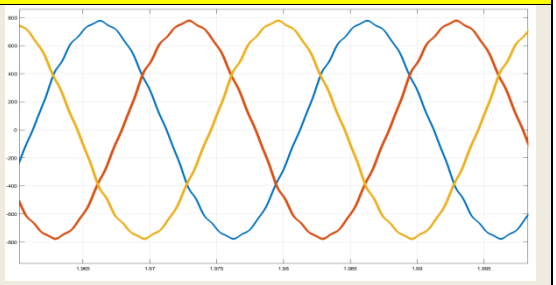
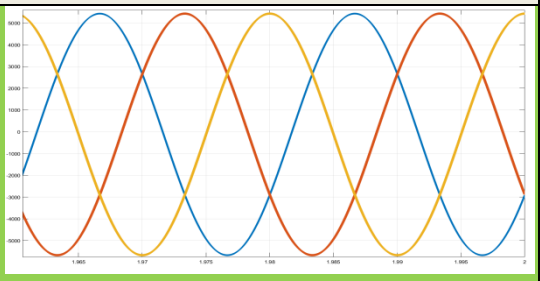
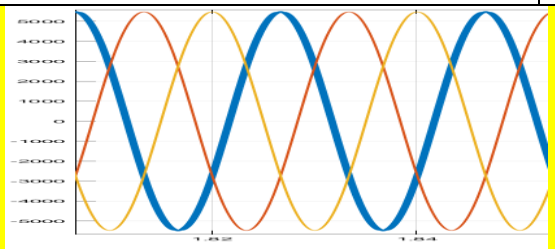
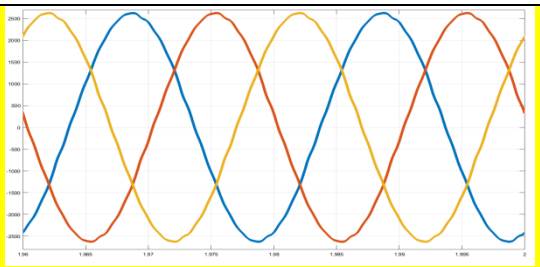
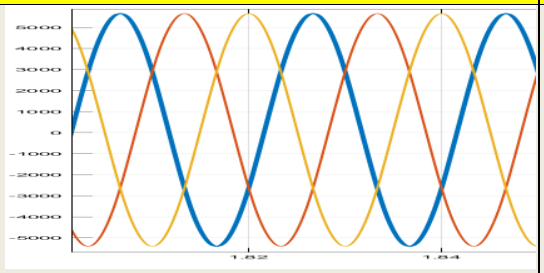
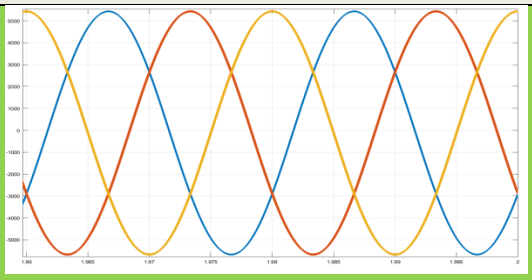
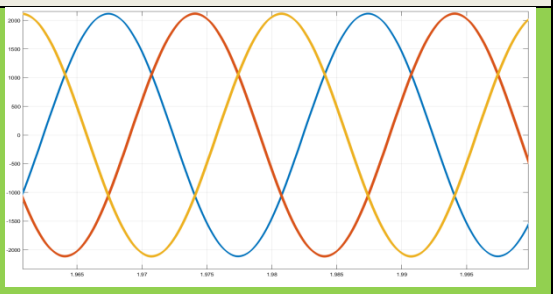
Таблица ПД-5	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		 I=880A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		 I=760A
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		$I_{ПД5}$=734A

Таблица 5.6 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 6 кВ станции распределения электроэнергии ПД-6

Таблица ПД-6	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		 I=2625A
Включен только VAR (SVC) (случай II)		I=2168A
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		 $I_{ПД6}$=2075A

В таблицах 5.7…5.12 приведены формы кривых тока и напряжения на шинах 0,4 кВ распределительных станций ПД-1…ПД-6, показывающие формы кривых напряжения и тока при отсутствии VAR (SVC) и АФГ (случай I), при включении только VAR (SVC) (случай II) и одновременном включении VAR (SVC) и АФГ (случай III).

Таблица 5.7 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-1

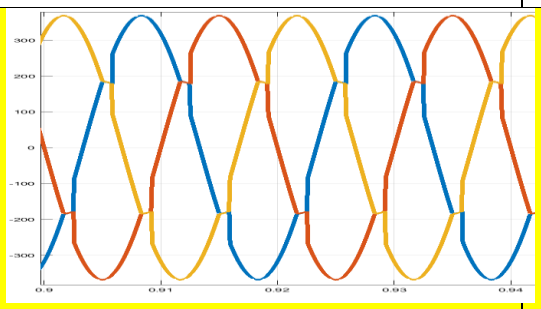
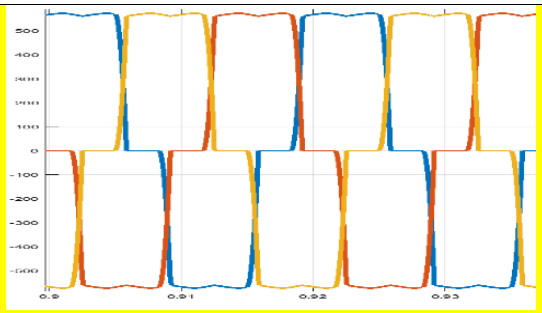
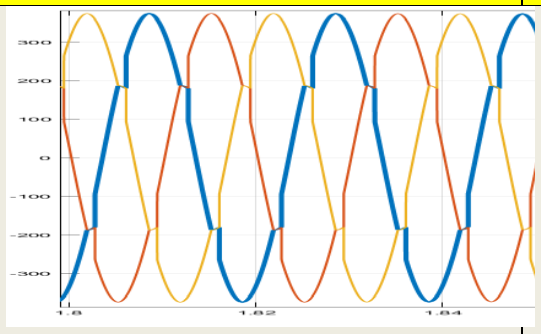
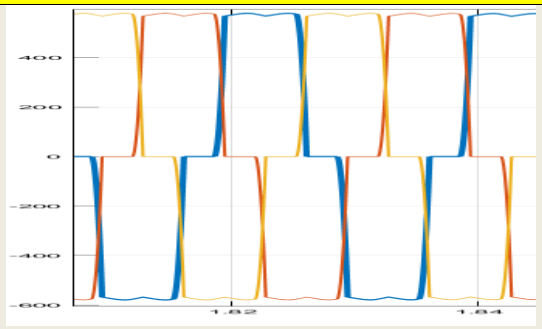
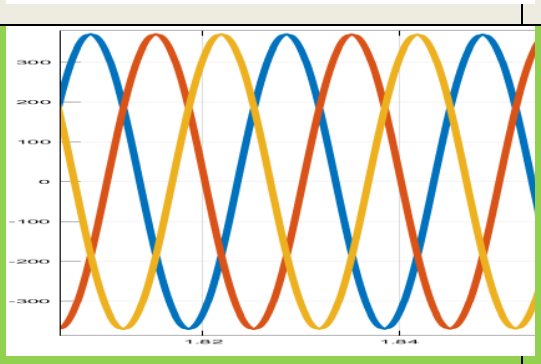
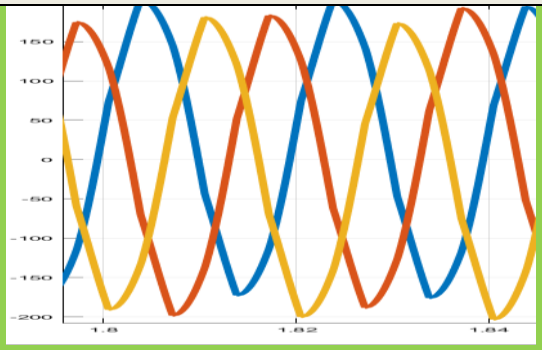
Таблица ПД-1, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

Таблица 5.8 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-2

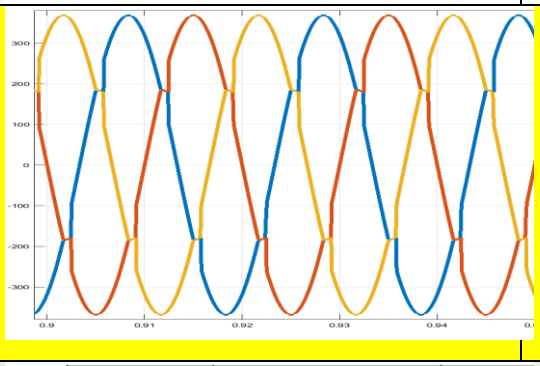
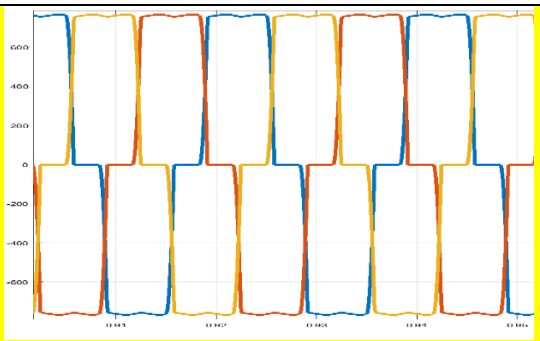
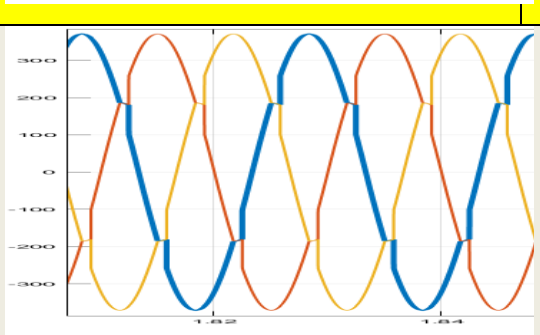
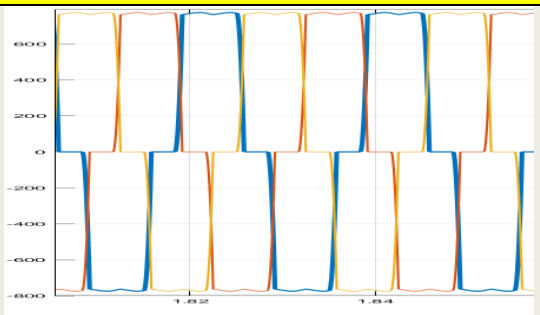
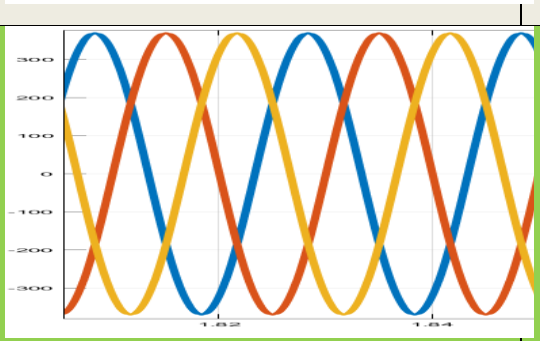
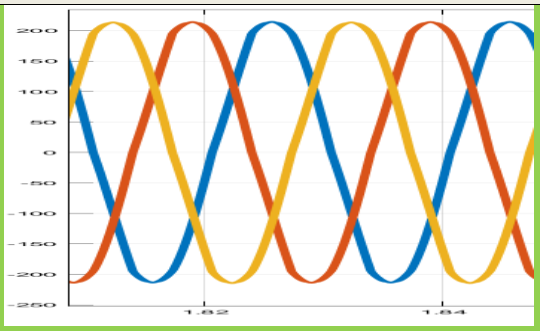
Таблица ПД-2, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

Таблица 5.9 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-3

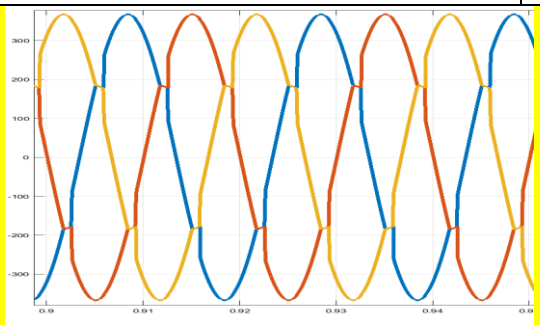
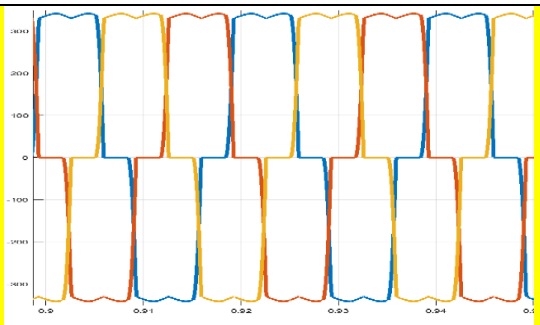
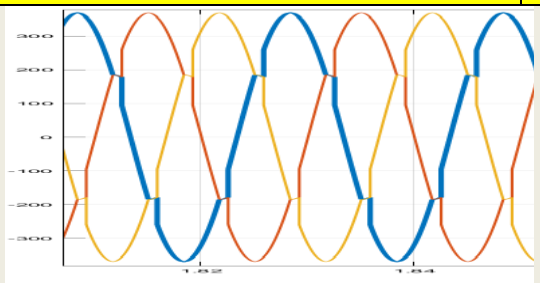
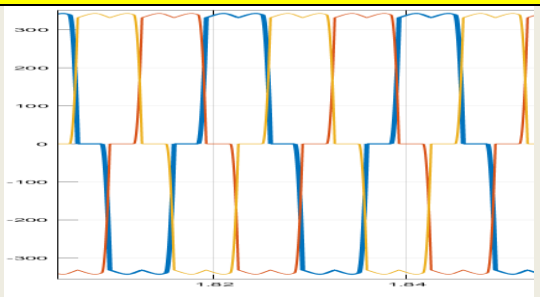
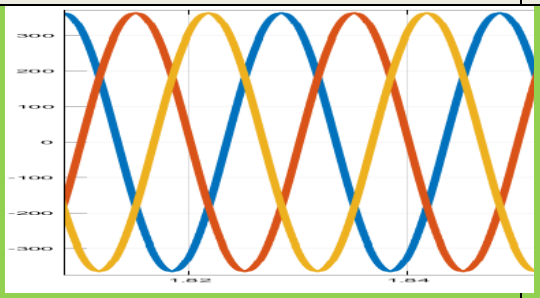
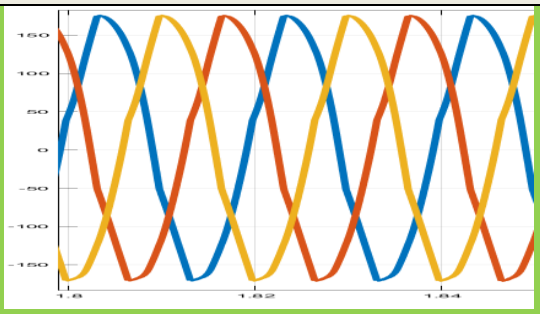
Таблица ПД-3, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

Таблица 5.10 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-4

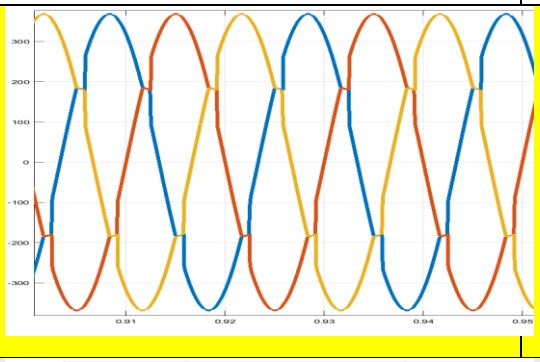
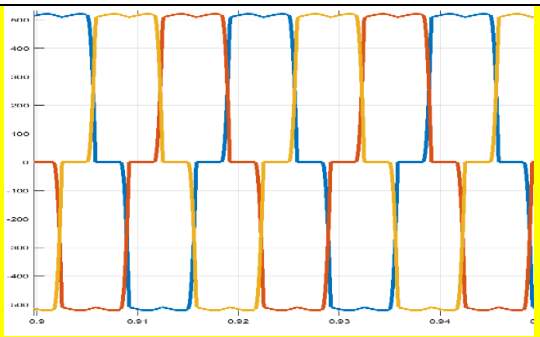
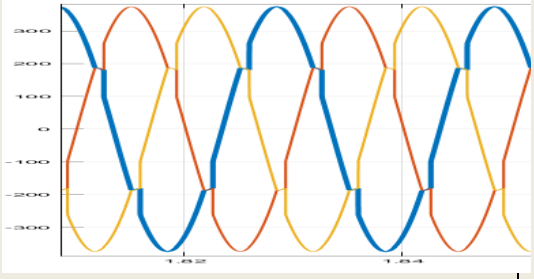
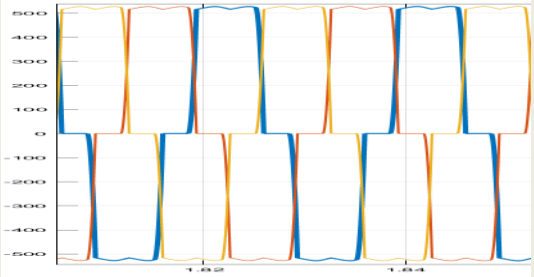
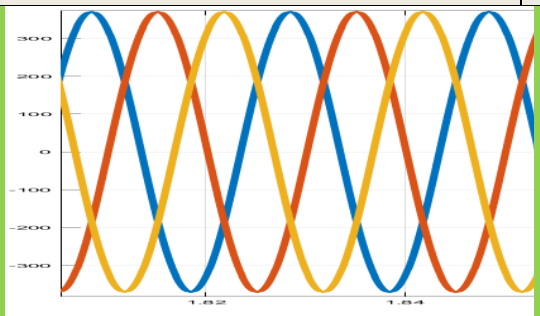
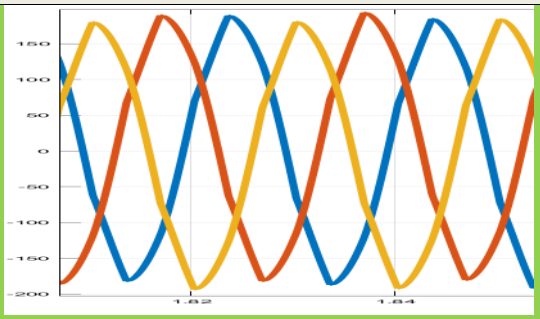
Таблица ПД-4, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

Таблица 5.11 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-5

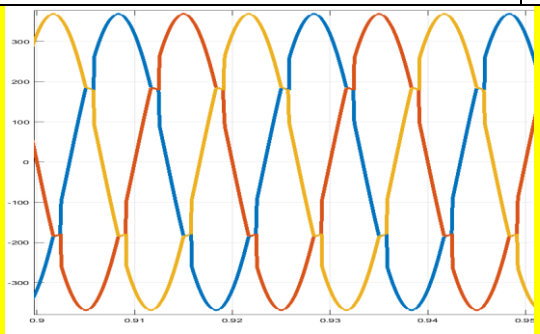
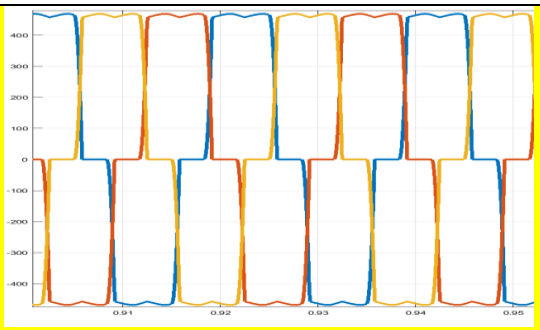
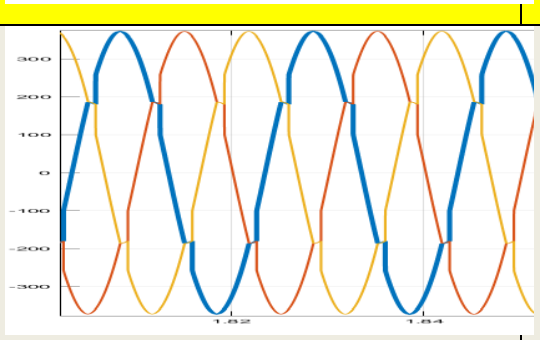
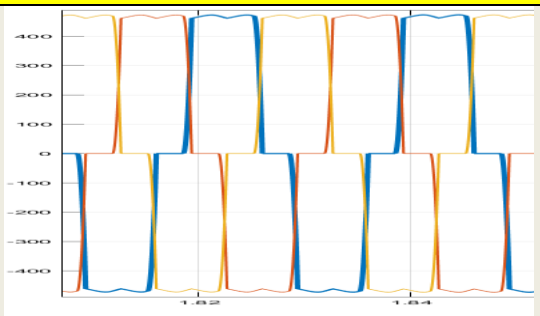
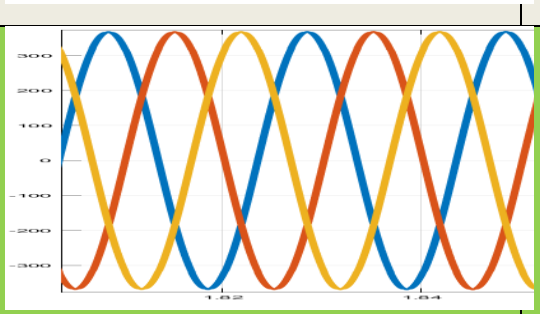
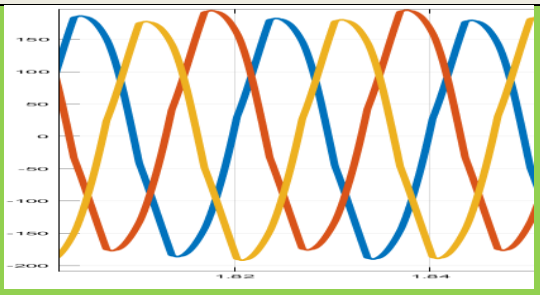
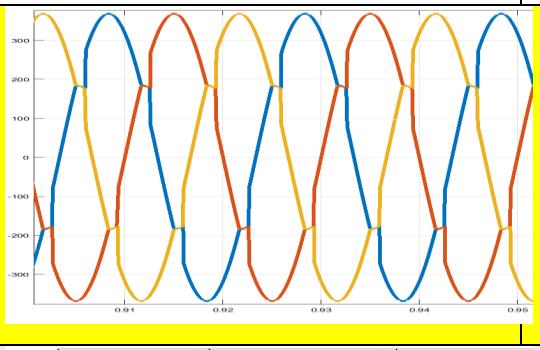
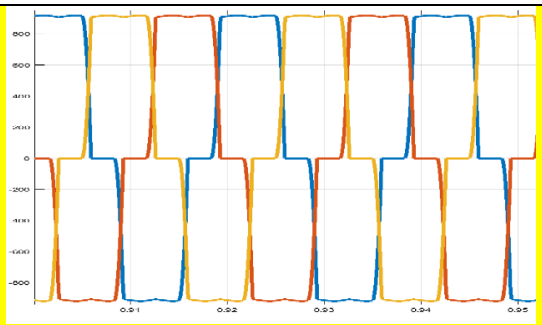
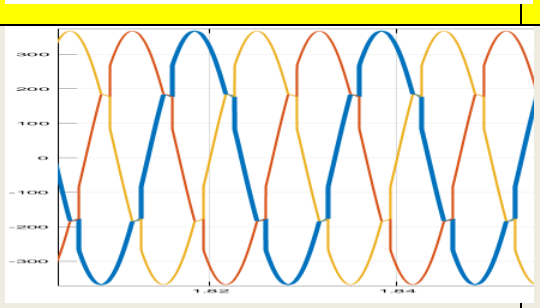
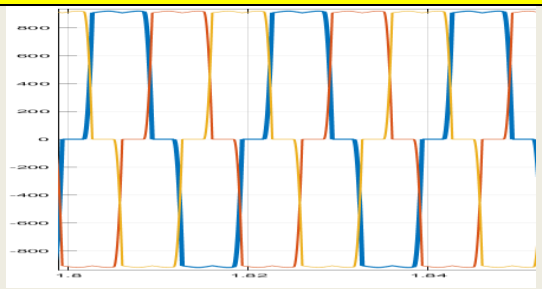
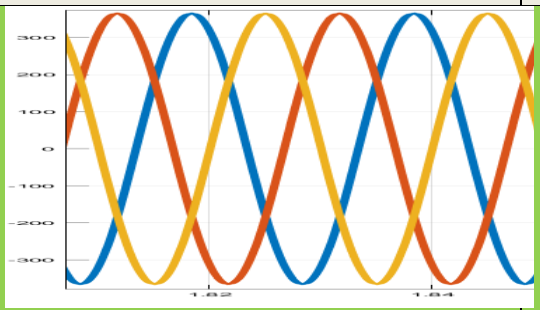
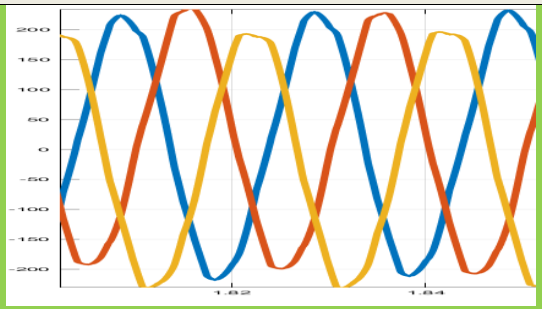
Таблица ПД-5, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

Таблица 5.12 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-6

Таблица ПД-6, 0,4 кВ	Vabc	Iabc
СТАТКОМ и АФГ отсутствуют (случай I)		
Включен только VAR (SVC) (случай II)		
VAR (SVC) и АФГ включены (случай III).		

На основании анализа графиков, приведённых в таблицах 5.1..5.12, выполнено обобщение результатов моделирования, которые приведены в таблицах 5.13 и 5.14.

В таблице 5.13 приведены значения активной P и реактивной мощности Q, коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИ U% и тока КНИ I%, коэффициента мощности cos(φ) для случаев I, II и III на шинах 6 кВ распределительных станций ПД-1…ПД-6, а также на общей шине 6 кВ подстанции 110/6 кВ (ПД-0).

В таблице 5.14 приведены значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИ U% и тока КНИ I% для случаев I, II и III на шинах 0,4 кВ распределительных станций.

Обобщённые результаты моделирования, которые приведены в таблицах 5.13 и 5.14, представлены в виде графиков на рисунках 5.7, 5.8 и 5.9.

На рисунке 5.7 показаны значения P и Q на шинах 6 кВ распределительных станций ПД-0 ... ПД 6 для случаев I, II, III.

На рисунке 5.8 приведены значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИU% и тока КНИ I%, коэффициента мощности cos(φ) на шинах6 кВ ПД-0 ... ПД-6 для случаев I, II, III.

На рисунке 5.9 приведены значениякоэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИU% и тока КНИ I% на шинах 0,4 кВ для случаев I, II, III.

Таблица 5.13– Значения P, Q, КНИU, %, КНИI, %, cos(φ) на шинах 6 кВ для случаев I, II, III

Шина 6кВ	**P, МВт,Q, МВАр**						**КНИU, %**			**КНИ I, %**			**cos(φ)**		
	P(I)	**Q(I)**	**P(II)**	**Q(II)**	**P(III)**	**Q(III)**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**	**I**	**II**	**III**
ПД-0	**54,8**	**126**	**60**	**0,5**	**58,1**	**2**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,35**	**0,99**	**0,05**	**0,42**	**0,99**	**0,999**
ПД-1	**10,57**	**30,8**	**10,8**	**0**	**10,52**	**0,5**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,13**	**1,07**	**0,07**	**0,32**	**0,99**	**0,998**
ПД-2	**7,47**	**9**	**7,5**	**0**	**7,2**	**0,8**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,98**	**1,45**	**0,05**	**0,64**	**0,99**	**0,99**
ПД-3	**6,15**	**0,9**	**6,15**	**0,9**	**6,1**	**0,91**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,84**	**0,83**	**0,07**	**0,99**	**0,99**	**0,99**
ПД-4	**11,06**	**25,4**	**11,2**	**0**	**11**	**0**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,25**	**0,87**	**0,06**	**0,4**	**0,99**	**0,997**
ПД-5	**6,27**	**13,2**	**6,32**	**0**	**6,1**	**0**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,45**	**1,17**	**0,08**	**0,43**	**0,99**	**0,99**
ПД-6	**17,25**	**46,5**	**17,8**	**0**	**17,23**	**0**	**0,19**	**0.03**	**0**	**0,32**	**0,93**	**0,07**	**0,34**	**0,99**	**0,998**

Таблица 5.14 –Значения КНИ$_{U\%}$, КНИ $_{I\%}$ при наличии нелинейных нагрузок на шинах 0,4 кВ для случаев I, II, III

Шина,0,4кВ	КНИU, %			КНИ I, %		
	I	II	III	I	II	III
ПД-1	7.08	7.08	0.3	25.15	25.15	3.67
ПД-2	6.27	6.27	0.12	25.62	25.62	2.43
ПД-3	6.73	6.73	0.44	25.41	25.41	4.79
ПД-4	6.62	6.62	0.23	25.43	25.43	3.31
ПД-5	6.32	6.32	0.26	25.62	25.62	4.02
ПД-6	7.96	7.96	0.19	24.6	24.6	3.89

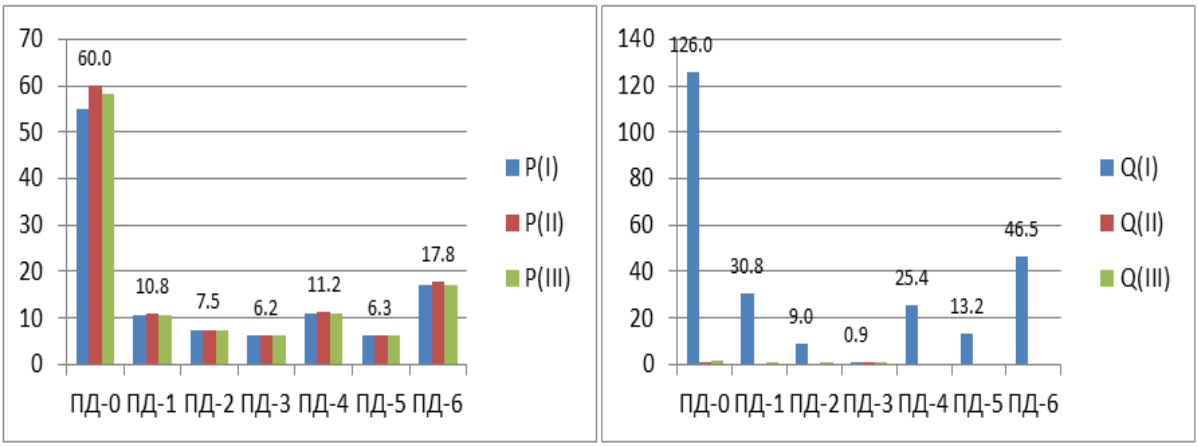


Рисунок 5.7 – Значения P и Q на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД 6 для I, II, III

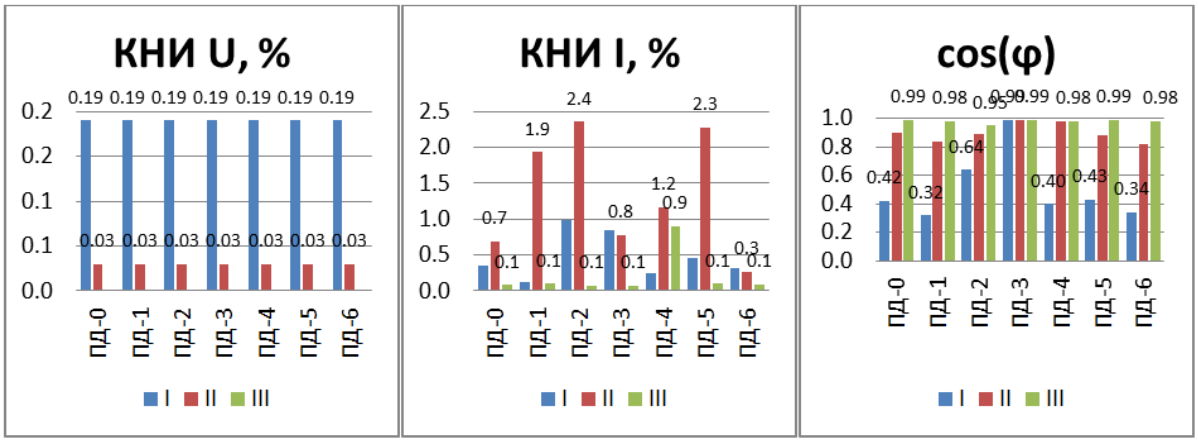


Рисунок 5.8 – Значения гармоник напряжения и гармоник тока, коэффициента мощности на шинах 6 кВ ПД-0 ... ПД 6 для I, II, III

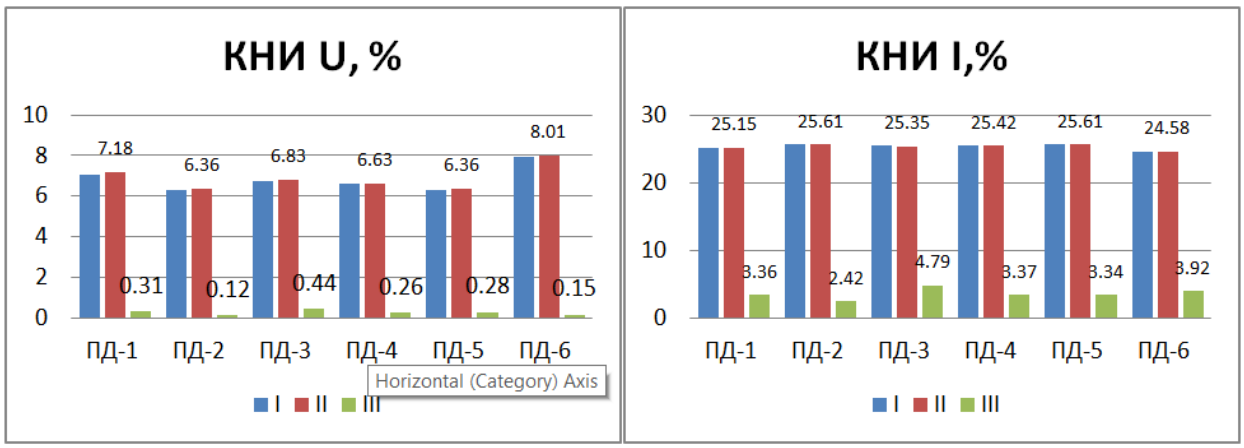


Рисунок 5.9 – Значения гармоник напряжения и гармоник тока на шине 0,4 кВ в случаях I, II, III

Анализ результатов моделирования, приведённых в таблицах 5.1…5.14 и на рисунках 5.7…5.9 показывает, что наличие нелинейной нагрузки приводит к значительным искажениям синусоидальных форм напряжений и токов на шинах 0,4 кВ по сравнению с шинами 6 кВ, Этот вывод подтверждается также сравнением форм графиков токов на стороне 6 кВ (рисунок 5.8) и 0,4 кВ (рисунок 5.9). Видно, что формы токов на стороне 0,4 кВ существенно отличаются от синусоидальной по сравнению с формой тока на стороне 6 кВ.

Коэффициенты нелинейных искажений напряжения на шинах низкого напряжения 0,4 кВ превышают 6%. Коэффициенты нелинейных искажений тока превышает 24%. Данные значения больше допустимых пределов КНИU%≤5%, КНИI%≤20%, установленных международным стандартом IEEE Std 519-2014 [18].

Наличие нелинейной нагрузки приводит также к значительному снижению коэффициента мощности, что подтверждается результатами моделирования. Например, на подстанции 110/6 кВ (ПД-0) коэффициент мощности равен 0,42. Низкий коэффициент мощности подразумевает необходимость компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ распределительных станций .

Повышение коэффициентов мощности обеспечивается при включении на шинах 6 кВVAR (SVC). В этом случае коэффициенты мощности достигают значений, лежащих в пределах 0,8…0,99.

Однако наличие только VAR (SVC) не приводит к улучшению гармонического состава токов и напряжений. Это наглядно показано на рисунках 5.8 и 5.9.

Высшие гармонические составляющие тока на шинах 0,4 кВ с нелинейной нагрузкой компенсируются посредством подключения АФГ.

В этом случае формы кривых напряжений и токов приближаются к синусоидальной форме (рисунки 5.8 и 5.9). Коэффициент нелинейных искажений напряжения на шинах низкого напряжения 0,4 кВ не превышает 0,44%. Коэффициент нелинейных искажений тока не превышает 4,79%. Данные значения меньше допустимых норм, установленным международным стандартом IEEE Std 519-2014 [18].

Таким образом применение АФГ на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции ШИМ является эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки.

Одновременное применение с АФГ статических компенсаторов реактивной мощности VAR (SVC) позволяет значительно увеличить коэффициент мощности системы электроснабжения завода.

Анализ и сравнение показывают, что наличие нелинейных нагрузок приводит к значительным искажениям синусоидального напряжения и тока, значительно снижая коэффициент мощностисильно повлияет на коэффициент мощности источника. Однако этот эффект преодолевается за счет разумного использования устройств компенсации реактивной мощности и активных фильтров.

5.3 Научно-обоснованные рекомендации по выбору средств повышения энергетических показателей

При помощи предложенных моделей и методик были выполнены исследования и расчёты энергетических показателей для системы электроснабжения глиноземного завода.

На основании проведённых научных исследований было доказано, что одновременное включение компенсаторов реактивной мощности VAR (SVC) на шинах 6 кВ распределительных станций и активных фильтров гармоник на шинах 0,4 кВ непосредственно в местах подключения нелинейной нагрузки обеспечивают требуемые энергетические показатели: позволяет увеличить коэффициент мощности до значений, лежащих в пределах 0,95…0,99 и существенно улучшить синусоидальную форму напряжения и тока сети. Гармонические искажения соответствуют международному стандарту IEEE Std 519-2014.

Анализ результатов выполненных исследований позволил сформулировать научно-обоснованные рекомендации по выбору средств повышения энергетических показателей для систем электроснабжения глиноземного завода.

1. Для повышения коэффициента мощности на шинах 6 кВ до значений, лежащих в пределах 0,95…0,99, необходимо включение компенсаторов реактивной мощности VAR (SVC).

2. Суммарная реактивная мощность компенсаторов реактивных мощности VAR (SVC) в среднем должна быть равной 95,2 МВАр.

3. Для фильтрации высших гармоник в системе электроснабжения глиноземного завода необходимо включение на шинах 0,4 кВ активных фильтров гармоник.

4. Наиболее эффективным средством фильтрации высших гармоник на шинах низкого напряжения 0,4 кВ при наличии нелинейной нагрузки является применение АФГ на основе 5-ступенчатого гибридного инвертора при управлении методом широтно-импульсной модуляции.

5. При выборе данного типа АФГ необходимо учитывать его следующие преимущества: уменьшение содержания высших гармоник в выходном напряжении без увеличения количества силовых устройств; работа с более низкими частотами преобразования; селективное исключение низкочастотных составляющих в спектре выходного напряжения; минимизация коэффициента гармоник тока и напряжения; минимизация потерь в преобразователе; минимизация среднеквадратичного отклонения напряжения от желаемой формы.

6. Наиболее эффективным способом улучшения энергетических показателей для систем электроснабжения глиноземного завода является одновременное включение устройств компенсации реактивной мощности VAR (SVC) на шинах 6 кВ и активных фильтров гармоник непосредственно в местах подключения нелинейной нагрузки 0,4 кВ. Это позволяет увеличить коэффициент мощности до значений 0,95…0,99 и существенно улучшить синусоидальную форму напряжения и тока, которая будет соответствовать международному стандарту IEEE Std 519-2014.

Комбинированное решение проблемы компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник на основе приведённых рекомендаций существенно улучшает энергетические показатели системы электроснабжения.

Снижаются потери электроэнергии в электрической системе. Хотя финансовая отдача от снижения потерь в проводниках сама по себе недостаточна для обоснования установки конденсаторов, иногда это является дополнительным преимуществом; особенно при наличии длинных линий электропередачи.

Фильтрация высших гармоник позволяет решить проблемы, возникающие в производстве при наличии высших гармоник. К проблемам, вызванными наличием высших гармоник, относятся, например, перегрев трансформаторов и электродвигателей, перегрузка нейтрали и недопустимое напряжение нейтрали по отношению к земле, неисправность конденсаторных батарей, срабатывание выключателей и предохранителей, ненадежная работа электронного оборудования и генераторов, потеря энергии и мощности. Упомянутые проблемы вызывают дополнительные затраты, связанные, например, с более высоким

потреблением энергии, дополнительные инвестиции из-за более быстрого износа электронного оборудования, более длительный простой производственного оборудования, более высокие затраты на техническое обслуживание и ремонт, а также затраты из-за снижения качества продукции и объема производства (например, процент брака у производителей полупроводников).

Становится возможным полностью избежать штрафов за коэффициент мощности на предприятиях. С этой целью необходимо изучить правила в отношении диапазона стандартных требований к коэффициенту мощности. Большинство промышленных перерабатывающих предприятий используют множество асинхронных двигателей для привода насосов, конвейеров и другого оборудования на заводе. Наличие асинхронных двигателей приводит к тому, что коэффициент мощности для большинства промышленных объектов изначально является низким. Электроэнергетические компании взимают штраф за низкий коэффициент мощности (обычно ниже 0,80 или 0,85). Некоторые компании имеют высокий коэффициент мощности (например, выше 0,95). Добавив коррекцию коэффициента мощности с помощью устройств компенсации реактивной мощности VAR (SVC), можно убрать штраф за коэффициент мощности из своего счета.

Многие электроэнергетические компании взимают плату за максимальный измеренный спрос на основе либо самого высокого зарегистрированного спроса в киловаттах (кВт-метр), либо процента от самого высокого зарегистрированного спроса в кВА (КВА-метр), в зависимости от того, что больше. Если коэффициент мощности низкий, то процент измеренной мощности в кВА будет значительно больше, чем потребляемая мощность в кВт. Повышение коэффициента мощности за счет коррекции коэффициента мощности снизит плату за потребление, помогая сократить счета за электроэнергию.

При установке данных устройств необходимо обратить внимание на следующее: нагрузки, потребляющие реактивную мощность, также требуют реактивного тока. Установка конденсаторов с коррекцией коэффициента мощности в конце существующих цепей вблизи индуктивных нагрузок

уменьшает ток, передаваемый каждой цепью. Уменьшение расхода тока в результате повышения коэффициента мощности может позволить цепи выдерживать новые нагрузки, экономя затраты на модернизацию распределительной сети, когда требуется дополнительная мощность для дополнительного оборудования, экономя тысячи долларов на излишних затратах на модернизацию. Кроме того, уменьшенный ток уменьшает потери на сопротивлении в цепи.

Более низкий коэффициент мощности приводит к более высокому току для данной нагрузки. По мере увеличения линейного тока падение напряжения в проводнике увеличивается, что приводит к снижению напряжения на оборудовании. Применение комбинированного решения компенсации реактивной мощности VAR (SVC) и фильтрации гармоник АФГ позволяет уменьшить падение напряжения в проводнике, что повышает напряжение на оборудовании.

Выводы

При отсутствии VAR (SVC) и АФГ имеет место низкий коэффициент мощности который изменяется в диапазоне от 0,32 до 0,64. Коэффициенты гармонических искажений напряженияи токапревышают допустимый предел по сравнению с международным стандартом IEEE Std519-2014 при наличии нелинейных нагрузок.

При включении устройств компенсации реактивной мощности VAR (SVC) на шинах 6 кВ ПД1 ... ПД6, коэффициент мощности возрастает до значений, лежащих в пределах 0,8…0,99. Однако включение VAR (SVC) не позволяет уменьшить уровень высших гармоник тока и напряжения на шинах 0,4 кВ.

Одновременное включение VAR (SVC) на шинах 6 кВ ПД-1 ... ПД-6 и активных фильтров непосредственно в местах подключения нелинейной нагрузки 0,4 кВ позволяет увеличить коэффициент мощности и существенно улучшить синусоидальную форму напряжениея и тока. Гармонические искажения соответствуют международному стандарту IEEE Std519-2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи обоснования способов повышения энергетических показателей в системе электроснабжения глиноземного производства, что имеет существенное значение для развития электротехнических комплексов и систем в минерально-сырьевом комплексе Социалистической Республики Вьетнам.

Основные результаты и выводы по диссертационной работе, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Разработана компьютерная модель системы электроснабжения глиноземного завода, позволяющая установить влияние нелинейных нагрузок в виде преобразователей частоты на энергетические показатели системы электроснабжения глиноземного завода.

2. В системе электроснабжения глиноземного завода имеет место низкий коэффициент мощности, который изменяется в диапазоне от 0,32 до 0,64. Коэффициенты гармонических искажений напряжения и тока превышают допустимый предел по сравнению с международным стандартом IEEE Std 519-2014.

3. Обоснован способ достижения нормативного значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой на основе 5-ступенчатого гибридного каскадного инвертора при управлении коммутацией ключей методом широтно-импульсной модуляции.

4. Предложено решение по компенсации реактивной мощности на основе применения статического компенсатора реактивной мощности VAR (SVC) для 3-фазных систем электропитания на шинах 6 кВ глиноземного завода.

5. Разработаны компьютерные модели, позволяющие установить количественное влияние активного фильтра гармоник и статического компенсатора реактивной мощности VAR (SVC) на суммарный коэффициент

гармонических составляющих напряжения и коэффициент мощности в системе электроснабжения глиноземного завода при наличии нелинейных нагрузок, обусловленных применением преобразователей частоты.

6. На основе комплексного подхода обоснован способ повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного завода с нелинейной нагрузкой путем совместного применения активного фильтра гармоник и статического компенсатора реактивной мощности, что позволяет увеличить коэффициент мощности до значений, лежащих в пределах 0,95…0,99 и существенно улучшить синусоидальную форму напряжения и тока сети. Гармонические искажения соответствуют международному стандарту IEEE Std 519-2014. Экономическая прибыль от предлагаемых мероприятий за первый год эксплуатации составит 685 655…823 785 долларов/год.

7. Результаты диссертационной работы рекомендуются для использования электротехническими компаниями, работающими в области электрификации минерально-сырьевых комплексов, при разработке электрооборудования, что позволит получить нормативные значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и коэффициента мощности в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzette., M. Kimball. Mineral Commodity Summaries 2009. US Geological Survey. 2009.198 p. https://doi.org/10.3133/mineral2009.

2. Suzette., M. Kimball. Mineral Commodity Summaries 2014. Mineral Commodity Bulletins.2014. vol. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2014.196 p. https://doi.org/10.3133/70100414.

3. S. Jewell. Mineral Commodity Summaries 2014. Stockholm and Mineral Commodity Bulletins 2014.199 p.

4. ЛогиноваИ. В.Изучениевопроса комплексной переработки бокситов среднетиманского месторождения / И. В. Логинова, А. В. Кырчиков, В. А. Лебедев, С. Ф. Ордон // Житомирский национально-агроэкологический университет.–2013 . – С. 27–32.

5. H. Phi. Assess The Current State of The Environment in The Field of Mining and Sorting of Bauxite Ore and Propose Environmental Protection Solutions in The City of Lok Thang, Bao Lam district. Lam Dong Province. Agrarian University Publishing House. 2016.

6. B. V. Nam. Bauxite Projects Contribute to Central Highlands' Development. VietNamplus.2020.

7. L. Q. Tuan., J. W. Ahn. Bauxite Developments in Vietnam: Opportunities and Challenges. Journal of Energy Engineering. 2018. vol. 27. No. 3. pp. 41-47.

8. T. Vu. Vinacomin's bauxite-alumina project records $162 million loss. VIR. 2017.

9. T. K. Phuong. Showcase of Alumina Refining Projects.The full report for 4th Asean Bauxite & Alumina Conference. 2011. 12p.

10. Ляхомский, А. В. Об оценке электропотребления погружного электрооборудования нафизической модели/ А. В. Ляхомский, С. В. Мишуринских, А. Б. Петроченков, А. В. Ромодин, Е. Н. Перфильева// Промышленная энергетика. – 2020. – № 8. – С. 26–33.

11. Лич, Д. Т. Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге Вьетнам/ Д. Т. Лич // Горные науки и технологии.– 2021. – Том 6(2). – С. 121–127.

12. S. G. GermanGalkin. Virtual Laboratories for Semiconductor Systems in The Matlab-Simulink Environment. St. Petersburg. 2013. 488 p.

13. P. Tenti., P. Mattavelli., E. Tedeschi. Compensation Techniques based on Reactive Power Conservation. Electrical Power Quality and Utilization. 2007. vol. 13. n.1. pp. 17-24.

14. E. Tedeschi., P. Tenti., P. Mattavelli., D. Trombetti. Cooperative Control of Electronic Power Processors in Micro-Grids. Eletrônica de Potência. 2009. vol. 14. pp. 241-249.

15. P. Salmeron.,S. P. Litran. Improvement of The Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters. IEEE. TransactionsOnPowerDelivery.2010. vol. 25-2. pp. 1058-1067.

16. Шидловский, А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях/А. К. Шидловский., В. Г. Кузнецов. – Киев:Наукова Думка, 1985. – 270 с.

17. Вершинин В.И.Электромагнитная и электромеханическая совместимость в электротехнических системах с полупроводниковыми преобразователями : Конспект лекций / В. И. Вершинин, Э. А. Загривный, А. Е. Козярук; М-во образования Рос. Федерации. С.-Петерб. гос. горный ин-т им. Г.В. Плеханова (техн. ун-т). - СПб. : С.-Петерб. горный ин-т им. Г. В. Плеханова, 2000. – 66 с.

18. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. American National Standards Institute. 2014. p. 29.DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.

19. B. I. Abramov., B. M. Parfenov., Y. V. Shevyrev. Choice Methods of The Parameters of Filter Compensating Stepped Type Devices for Thyristor Electric Drives. RussianElectricalEngineering.2001. vol. 1. pp. 38–42.

20. Лич, Д. Т. Обоснование схемы активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора / Д. Т. Лич,Ю. В. Шевырев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Том. 21. – № 2. – С. 105–114.

21. H. Y. Kanaan., A. Hayek., K. AlHaddad., S. Rahmani. Carrier-Based Linear Decoupling Control of A Three-Phase Four-Leg Shunt Active Power Filter. IEEE. Industrial Electronics Society IECON 2007 – 33rd. 2007. pp. 1839–1844.

22. A. Sychev Yu. Analysis of Hybrid System Effectiveness for Correcting Power Quality Indicators in Power Supply Systems of Mining and Processing Industry Enterprises. Innovations and Prospects for the Development of Mining Machinery and Electrical Machinery Manufacturing. 2017. vol. IPDME-2017. (In Russ.). pp. 223–226.

23. A. N. Egorov., A. S. Semenov., Y. S. Kharitonov., O. V. Fedorov. Efficiency of Variable Frequency Drive in Diamond Mining. GornyiZhurnal. 2019. Vol. 2. (In Russ.). pp. 77–82.

24. A. Ojo., K. Awodele., A. Sebitosi. Load Compensation in A Three-Phase Four Wire Distribution System Considering Unbalance, Neutral Current Elimination and Power Factor Improvement. Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA). 2019. pp. 389–394.

25. A. S. Sarvarov., Y. V. Shevyrev., O. V. Fedorov. Assessment of CostEffectiveness Of Improving Energy Performance in Networks with Semiconductor Converters. BulletinoftheSouthUralStateUniversity.2015. vol.15(3). pp. 11–19.

26. Пронин М.В. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями / М.В Пронин, А.Г Воронцов // Горное оборудование и электромеханика. – 2005. – № 5. – С. 1-5.

27. Пронин М.В. Активные фильтры высших гармоник / М.В Пронин // Направления развития. Новости электротехники. – 2006. – № 2. – С. 28-32.

28. Зобов, И. Активные фильтры: практика компенсации высших гармоник в электроустановках/ И. Зобов, А. Мелентьев//Новости ЭлектроТехники. – 2020. – Том 5. – № 4. – С. 124–125.

29. Алексеев Б. А. Активные фильтры высших гармоник /Б. А. Алексеев//Электро. –2007. – С. 28-33.

30. Пронин М.В. Однофазные активные выпрямители в каскадном преобразователе частоты / М.В Пронин, А.Г Воронцов //Завалишинские чтения. – 2014. – С. 99-102.

31. Виноградов А.Б. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты / А.Б Виноградов, А.А Коротков // ФГБОУВО«Ивановский государственный энергетический университет имениВ.И. Ленина». – Иваново, – 2018 – 184 с.

32. R. S. Alishah., D. Nazarpour., S. H. Hosseini., M. Sabahi. Reduction of power electronic elements in multilevel converters using a new cascade structure. IEEE. Trans. Ind. Electron. Jan. 2015. vol. 62. no. 1. pp. 256-259.

33. J. Rodrguez., J.S. Lai. Multilevel Inverters: An Overview of Topologies, Controls and Applications. IEEE. Transactions in Industrial Electronics. August 2002. vol. 49. pp. 2703-2712.

34. J. Rodrguez., J.-S. Lai. Multilevel Inverters: An Overview of Topologies, Controls, and Applications. IEEE. Transactions in Industrial Electronics. August 2002. pp. 2703-2712.

35. W. Abd Halim., S. Ganeson., M. Azri., T.N.A. Tengku Azam. Review of multilevel inverter topologies and its applications. Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. July 2015. Vol. 8 No. 7. pp. 51-56.

36. N. V. Nho., N. X. Bac. Carrier PWM Control of Cascaded Hybrid NPC 3-level Inverter and Two-Level Inverters. Dept. of Electrical & Electronics Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics. September 2011. 6p.

37. A. K. Sadigh., M. Abarzadeh., K. A. Corzine., V. Dargahi. A New Breed of Optimized Symmetrical and Asymmetrical Cascaded Multilevel Power Converters. IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. Dec 2015. vol. 3. pp. 1160-1170.

38. E. Babaei.,S. Laali. Optimum Structures of Proposed New Cascaded Multilevel Inverter With Reduced Number of Components. IEEE Trans. Ind. Electron. Nov. 2015. vol. 62. no. 11, pp. 6887-6895.

39. N. Ahmad,. B. joseph. A Review Paper on Multilevel Inverters with Its Control and Power Quality Parameters. International Journal of Interdisciplinary Research. 2017. 5p.

40. S. Rathod., M. Kirar., S. K. Bharadwaj. A review of Cascaded Multilevel Inverter Control Techniques and Its Application. In International Research Journal of Engg and Technology. July 2015. 6p.

41. R. Chan., J. Baek., S. Kwak. Simple Algorithm with Fast Dynamics for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Based on Model Predictive Control Method. IEEE. 2017. vol. 4. pp. 696-702.

42. T. K. Tu Nguyen., N. V. Nguyen. Novel Eliminated Common Mode Voltage PWM Sequences and an Online Algorithm to Reduce Current Ripple for a Three-Level Inverter. IEEE Trans. Power Electron. 2017. vol. 32. no. 10. pp. 7482–7493.

43. M. Uddin, G. Mirzaeva, G. Goodwin, and P. Stepien, "A Simplified Model Predictive Control to Eliminate Common Mode Voltage of An Ac Motor Fed by A Neutral Point Clamped Inverter," International Conference on Electrical Machines and Systems pp. 1–6, 2017.

44. P. Liu., S. Duan., C. Yao., C. Chen. A Double Modulation Wave CBPWM Strategy Providing Neutral-Point Voltage Oscillation Elimination and CMV Reduction for Three-Level NPC Inverters. IEEE Trans. Ind. Electron.2018. vol. 65. no. 1. pp. 16–26.

45. M. J. Tsai., H. C. Chen., M. R. Tsai., Y. B. Wang., P. T. Cheng. Evaluation of Carrier-Based Modulation Techniques with Common-Mode Voltage Reduction for Neutral Point Clamped Converter. IEEE Trans. Power Electron. 2018. vol. 33. no. 4. pp. 268–3275.

46. M. Lewandovski. Minimizing Harmonics of The Output Voltage of The Chopper Inverter. A. Szelag - Archiv fur Elecktrotechnik. 1986. vol. 69. № 4. pp. 223-226.

47. A. M. Hava and E. Un. Performance Analysis of Reduced Common Mode Voltage PWM Methods and Comparison with Standard PWM Methods for Three-Phase Voltage Source Inverters. IEEE Trans. Power Electron. 2009. vol. 24. no. 1. pp. 241–252.

48. G. S. Chandini., G. Shiny. Common Mode Voltage Elimination Technique for an open-end Winding Induction Motor Using Carrier-Based PWM. International Conference on Technological Advancements in Power and Energy. 2017. pp. 1–5.

49. I. Takashi., H. Mochikawa. A New Control of PWM Inverter for Minimum Loss Operation Of An Induction Motor Drive. IEEE Transactions Industry Applications. 1985. vol. 21. № 3. pp. 580-587.

50. E. 50160.Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks. CENELEC.2010. vol 1. 44 p.

51. N. V. Nho., Khoa Dang Pham. PWM Strategy to Alleviate Common-Mode Voltage with Minimized Output Harmonic Distortion for Five-Level Cascaded H-Bridge Converters. Energies 2021. vol. 14. pp. 1-26.DOI:10.3390/en14154476.

52. Абрамов,Б. И. Методы выбора параметров фильтро-компенсирующих устройств ступенчатого типа для тиристорных электроприводов в системах соизмеримой мощности/Б. И. Абрамов, Б. М. Парфѐнов, Ю. В. Шевырёв// Электротехника.– 2001. – С. 38 - 42.

53. N. V. Nho., M. J. Youn. Comprehensive Study on Space Vector PWM and Carrier Based PWM Correlation in Multilevel Invertors. Proc. Inst. Elect. Eng.- Elect. PowerAppl. 2006. vol. 153. pp. 149-158.

54.Гамазин С. И. Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии /С. И. Гамазин, В. М. Пупин, Ю. В. Марков // Промышленная энергетика.– 2006. – №11. – С 51-56.

55. Гамазин, С. И. Математическая оценка подавления фликера с помощью СТК/С. И. Гамазин, М. А. Кулага, А. И. Ненахов//Сборник материалов XI международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век». – 2013. – С. 60-62.

56. Гамазин, С. И. Применение тиристорных компенсаторов в системах электроснабжения/ С. И. Гамазин, А. И. Ненахов// Главный энергетик. – 2014. – Том 4. – С. 55-58.

57. Торяник, К. И. Сигналы с широтноимпульсной модуляцией в системах связи/К. И. Торяник, П. И. Лысов, М. А. Карпов//Молодые Ученые. – 2008.– том 4.– С. 112-116.

58. M. Lewandovski., S. A. Minimizing Harmonics of The Output Voltage of The Chopper Inverter. Archiv fur Elecktrotechnik. 1986. vol. 69. pp. 223-226.

59. T. Kilic., S. Milun. Three-Phase Shunt Active Power Filter Using IGBT Based Voltage Source Inverter. EPE-PEMC. 2002. p7.

60. N. V. Nho., Q. T. Hai., H.-H. Lee. Carrier Based Single-State PWM Technique for Minimizing Vector Errors in Multilevel Inverters. Journal of Power Electronics. 2010.pp. 357-364. DOI:10.6113/JPE.2010.10.4.357.

61. N. V. Nho., N. X. Bac. Carrier Pwm Control Of Cascaded Hybrid Npc 3-Level Inverter And Two-Level Inverters. ISEE.2007. 7 p.

62. Тонкаль, В. Е. Баланс энергии в электрических цепях/В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев., С. П. Денисюк., В. Я. Жуйков., М. Т. Стрелков., Ю. А. Яценко. – Киев: Наукова Думка, 1992. – 312 с.

63. H. Akagi. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. The Institute of Electrical and Electronic Engineers. USA. 2007. ISBN: 9781118362105. 389 p.

64. M. Tuomainen. Shunt Active Filters. Nokian Capacitors. 2004. vol. EN-TH05. p9.

65. M. Tuomainen. Compensation of Harmonic Currents and Reactive Power with Shunt Active Filter. Nokian Capacitors.2004. vol. EN-TH06. 9p.

66. K. Borisov., H. Ginn., A. Trzynadlowski. Mitigation of Electromagnetic Noise in a Shunt Active Power Filter Using Random PWM. The 33rd Annual Conference of IECON 2007. Taiwan. 2007. pp. 1886-1991.DOI:10.1109/IECON.2007.4460140.

67. Y. Sychev., B. Abramovich., V. Prokhorova. The Assessment of The Shunt Active Filter Efficiency Under Varied Power Supply Source and Load Parameters. IJECE. 2020. vol. 10(6). pp. 5621-5630.

68. Татаринов, Д. Е. Обеспечение электромеханической совместимости в частотнорегулируемых асинхронных электроприводах при регулировании частоты ШИМ/ Д. Е. Татаринов//Вестник Южно-Уральского осударственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Том 16.– № 1. – С. 80-86.

69. D. C. Lee. AC Voltage and Current Sensorless Control of Three-Phase Pwm Rectifiers. IEEETrans. onPowerElectron.2002. vol. 17. No. 6. pp. 883 – 890.

70. Розанов Ю.К. Устройство регулирования качества электрической энергии для трехфазных распределительных систем электроснабжения / Ю.К Розанов, М.Г Лепанов, М.Г Киселев, К.В Крюков // В сборнике: Управление качеством электрической энергии. Сборник трудов Международной научно-практической конференции.– 2014.– С. 115-122

71. Абрамович, Б. Н. Гибридная система коррекции уровня высших гармоник и обеспечения бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей нефтедобычи/Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Промышленная энергетика. – 2018. – № 11. – С. 50-57.

72. Абрамович Б.Н., Полищук В.В., Сычев Ю.А. Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети. Патент на изобретение № 2354025. Приоритет от 04.05.2008.

73. E. Bettega., J. N. Fiorina. Active Harmonic Conditioners and Unity Power Factor Rectifiers. Schneider Electric. 1999. vol. 183. 36 p.

74. V. N. Meshcheryakov., M. M. Khabibullin. The Practical Implementation of Relay Control of Current as Main Part in System Of Active Filter Of Electric. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. vol. 2. С. 25-31.

75. Дмитриев, С.М. Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник в составе электроприводов переменного тока/ С.М. Дмитриев, А.С. Плехов, В.Г. Титов, Д.Ю. Титов, С.Н. Яшин //Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.– 2012. –№ 2. – С. 206-214.

76. V. Belov. AMatlab / SimulinkModelofanActivePower Filter Based on Multistage Inverter Architecture. Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on Power Systems and Electromagnetic Compatibility. Greece. 2005. vol. 8. pp. 23-25.

77. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink.Урок 19. Переходные процессы в параллельном активном фильтре/С. Г. Герман Галкин//Силовая электроника. – 2015. – № 53. – С. 90-95.

78. Герман-Галкин С. Г. Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода/С. Г.

Герман Галкин, З. Ч. Звежевич, Н. А. Поляков// Научно-технический вестник информационных технологий,механики и оптики.– 2014. –№ 3. – С. 131-139.

79. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink:учебник для студ. высш. учеб. заведений/ С. Г. Герман-Галкин. – М. :Издательство "Лань", 2013. – 448 с.

80. Герман-Галкин С. Г. Школа Matlab.Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink.Урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром/С. Г. Герман-Галкин//Силовая электроника. – 2013. – № 40. – С. 80-86.

81. L. Morán. Active Power Filters. University of Concepción. Concepción. Chile. p. 1341.

82. Karim Sebaa, Mounir Bouhedda, Abdelhalim Tlemcani, Noureddine Henini. Location and tuning of TCPSTs and SVCs based on optimal power flow and an improved cross-entropy approach. Electrical Power and Energy Systems. 2014. pp. 536-545.

83. Tomislav Plavsic, Igor kuzle. Two-Stage optimization algorithm for short-term reactive power planning based on zonal approach. Electric Power System Research. 2011. pp. 949-957.

84.Тонкаль В.Е., Денисюк С.П., Яценко Ю.А. Особенности построения компенсаторов для систем электроснабжения с вентильными преобразователями // Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве. – Челябинск, 1989. – С. 175-176.

85. J. W. Dixon. Effective Transient-Free Capacitor Switching (TFCS) for Large Motor Starting on MV Systems. IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. vol. 8. pp.113-124.DOI:10.1109/PCICON.2017.8188730.

86. Kano. An Overview of FACTS Controllers for Power Quality Improvement. Nasiru Bello KadandaniBayero University. 2015. vol. 10. pp. 9-17.

87. F. H. Gandoman. Review of FACTS Technologies And Applications For Power Quality In Smart Grids With Renew Able Energy Systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. vol. 82. pp. 502–514.

88. M. S. Hossain Lipu. Effectiveness of FACTS Controllers and HVDC Transmissions for Improving Power System Stability and Increasing Power Transmission Capability. EnergyandPowerEngineering. 2013. vol. 2. No,4. pp. 154 - 163.

89. ДементьевЮ. А. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью/Ю. А. Дементьев, Р. Н. Бердников, Ю. И. Моржин, Ю. Г. Шакарян// Вести электроэнергетике. – 2012. – №1.–С.4-11.

90. ДорофеевВ. В. Перспективыприменения в ЕЭС России гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока/В. В. Дорофеев, Ю. Г. Шакарян, В. И. Кочкин, Л. А. Кощеев//Электрические станции. – 2004. – № 8. – С.10-13.

91. Gandoman F.H. Review of FACTS Technologies and Applications for Power Quality in Smart Grids with Renewable Energy Systems. Renew. Sustain. EnergyRev. 2018.vol. 82.pp. 502–514.

92. Шакарян Ю. Г. Асинхронизированные машины и технология управляемых электропередач переменного тока (FACTS)/Ю. Г. Шакарян// Электротехника. – 2010. – № 2. – С. 1-4.

93. Шакарян Ю. Г. Развитие устройств FACTS/Ю. Г. Шакарян, Н. Л. Новиков, С. И. Гусев // Энергоэксперт. – 2013.–№. 1. – С. 7-20.

94. M. Nasimul Islam Maruf. Study Of Thyristor Controlled Series Capacitor (Tcsc) as A Useful Facts Device. International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. vol. 2. pp. 4357-4360.

95. K. K. Sen. SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Applications. IEEE Power Engineering Society. 1997. pp. 1-6.DOI:10.1109/61.660884

96. A. Banga. Modeling and Simulation of SVC Controller for Enhancement of Power System Stability. International Journal of Advances in Engineering and Technology. 2011. vol. 1. Issue. 3. pp. 79 - 84.

97. J. Park., S. Mackay. Practical_Power_Distribution. Practical Power Distribution for Industry. 1997. 185 p.

98. P. Thakkur., S. Shandilya. Benefits Of Facts Controllers Over Ac Transmission Systems. International Journal of Electronics. 2014. vol. 4. Issue. 4. pp. 13-26.

99. ДоТханьЛич. Решение компенсации реактивной мощности для электрической системы на шине 6 кВ/До Тхань Лич, Ле Динь Хиеу//Кузнечно-штамповочное производство. – 2021. – № 7. – С. 41–48.

100. ЛичД. Т. Исследование решения по улучшению коэффициента мощности для алюминиевой бокситовой электростанции Лам Донг (Вьетнам) с переменным статическим компенсатором (SVC)/Д. Т. Лич//Кузнечно-штамповочноепроизводство. – 2021. – №7. –С. 28-41.

101. A. Banga. Modeling and Simulation of SVC Controller for Enhancement of Power System Stability. International Journal of Advances in Engineering and Technology. 2011. vol. 1. Issue. 3. pp. 79 - 84.

102. M. S. Hossain Lipu., T. F. Karim. Effectiveness of FACTS Controllers and HVDC Transmissions for Improving Power System Stability and Increasing Power Transmission Capability. Energy and Power Engineering. 2013. vol. 2. № 4. pp. 154–163.

103. S. Gupta. Reactive Power Control Using FC-TCR. (IJITR) International journal of innovative technology and research. 2013. vol. 1. Iss. 1. pp. 37–41.

104. A. Köse. Modeling and simulation of a static VAR compensator based on FCTCR. ICRERA. 2016. pp. 924-927. DOI:10.1109/ICRERA.2016.7884470.

105. G. Vishwakarma., N. Saxena. Enhancement of Voltage Profile using Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR). International Journal of Electrical. Electronics and Computer Engineering. 2013. pp. 18-22.

106. A. Pekdemir., A. B. Yildiz. Analysis and modelling of FC-TCR based on static VAR compensator. ICEEE. International Conference on Electrical and Electronic Engineering. 2018. Vol. 5. pp. 115-118. DOI:10.1109/ICEEE2.2018.8391312.

107. Nazimhushen A Kadiwala., Farid Uz Zaman R Mulani., Akib A Noorbhai., Sufiyan M Malek., Shani Vaidya. Reduced Total Harmonic Distortion by Using FC TCR at Various Time Period to Operate Thyristor.International Journal of Innovative Research in Science.Engineering and Technology. 2018. vol. 7. Iss. 2. pp. 215-224.

108. A. Lomi., T. D. ABalanced. Operation of Static VAR Compensator for Voltage Stability Improvement and Harmonic Minimization. International Journal of Emerging Electric Power Systems. 2018. vol. 19(2). pp. 1-9. DOI:10.1515/ijeeps-2017-0145.

109. F. Hamed. Reduction of harmonics generated by thyristor controlled reactor for RL loads. Electrical Power and Machines Engineering. Faculty of Engineering. Cairo University. Egypt. 2016. pp. 332-336. DOI:10.1109/ACCS-PEIT.2017.8303061

110. D. I. Panfilov., A. E. ElGebaly., M. G. Astashev. Topologies of Thyristor Controlled Reactor with Reduced Current Harmonic Content for Static Var Compensators. IEEE International Conference on Environment. 2017. pp. 1–10.

111. B. O. E. F. Loubaba., M.-K. Fellah. The Static Var Compensator (SVC) Device in the power systems Using Matlab/Sim Power Systems. International Conference on Electrical Engineering and its Applications. May 2008. pp. 54–59.

112.ЛичД.Т. Повышение качестваэлектро энергиинапримере глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам/Д.Т. Лич, Ю.В. Шевырёв//Известия Тульского Государственного Университета.Техническийнауки.– 2021. – С. 44–51. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-43-51.

113. Сычев Ю. А. Фильтро компенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/Санкт-Петербургский горный университет. Санкт-Петербург.– 2021. –365 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Оценка экономической прибыли от повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного завода

На основании выполненных исследований показано, что применение устройств компенсации реактивной мощности и АФГ обеспечивает требуемый коэффициент мощности и нормативные значения коэффициентов нелинейных искажений по напряжению и току. Однако приобретение данных устройств требует дополнительных инвестиций. Поэтому после выбора устройств компенсации реактивной мощности и АФГ необходима оценка экономической прибыли от повышения энергетических показателей системы электроснабжения глиноземного завода.

Определим экономическую прибыль от применения устройств компенсации реактивной мощности

В таблице ПА.1 приведены значения коэффициентов штрафов в зависимости от коэффициента мощности ((Циркуляр 15/2014/TT-BCT), которые применяется в Социалистической Республике Вьетнаме с 2015 г).

Выполним расчет штрафа за коэффициент мощности за один год

По расчетам TKV Group и Министерства промышленности и торговли Вьетнама, потребность в энергозатратах на производство глинозема из бокситовой руды равна в среднем около 200…256 кВтч/т (информация приведена на электронном ресурсе: https://vi.wikipedia.org/wiki/D%E1%BB%B1_%C3%A1n_bauxite_T%C3%A2n_Rai).

За один год производство глинозема из бокситовой руды равно 600 000 тонн/ год (информация приведена на электронном ресурсе: https://vi.wikipedia.org/wiki/D%E1%BB%B1_%C3%A1n_khai_th%C3%A1c_b%C3%B4_x%C3%ADt_%E1%BB%9F_T%C3%A2y_Nguy%C3%AAn).

Энергозатраты на производство глинозема из бокситовой руды за один год равны: (200…256) кВт*час/тонн * 600 000 тонн/ год=120 000 000 …153 600 000

кВт*час/ год. Стоимость 1 кВт*час равна 0.07 долларов/кВт*час (информация приведена на электронном ресурсе: http://baolamdong.vn/kinhte/202201/cong-ty-nhom-lam-dong-dat-nhieu-ket-qua-noi-bat-trong-san-xuat-kinh-doanh-nam-2021-3098236/).

Таблица ПА.1 – Коэффициенты штрафов в зависимости от коэффициента мощности

Коэффициент мощности Cosφ	Коэффициент штрафа k (%)	Коэффициент мощности Cosφ	Коэффициент штрафа k (%)
От 0,9 и выше	**0**	0,74	21,62
0,89	1,12	0,73	23,29
0,88	2,27	0,72	25
0,87	3,45	0,71	26,76
0,86	4,65	0,7	28,57
0,85	**5,88**	0,69	30,43
0,84	7,14	0,68	32,35
0,83	8,43	0,67	34,33
0,82	9,76	0,66	36 ,36
0,81	11,11	0,65	38,46
0,8	12,5	0,64	40,63
0,79	13,92	0,63	42,86
0,78	15,38	0,62	45,16
0,77	16,88	0,61	47,54
0,76	18,42	0,6	50
0,75	20	Ниже 0,6	52

Затраты на покупку электроэнергии при производстве заводом в течение года 600 000 тонн/ год равны:

120 000 000 …153 600 000 кВт*час/ год * 0.07 долларов /кВт*час = 8 400 000…10 752 000 долларов/год.

Коэффициент мощности на вводе системы электроснабжения ПД-0 в настоящее время равен 0,85. Затраты на покупку реактивной энергии для этого случая равны:

8 400 000…10 752 000 долларов / год * 5,88%/100 = 493 920…632 100 долларов / год

Реактивные мощности применяемых в настоящее время компенсаторов реактивных мощности СТАТКОМ равны:

Q СТАТКОМ1=18,5МВАр, Q СТАТКОМ2 = 4МВАр, Q СТАТКОМ3 = 0 МВАр, Q СТАТКОМ4 = 14,5МВАр, Q СТАТКОМ5 = 7,5МВАр,

Q СТАТКОМ6 = 26,4МВАр.

Суммарная реактивная мощность применяемых в настоящее время компенсаторов реактивных мощности СТАТКОМ равна 70,9 МВАр.

Каждый статический компенсатор VAR1…VAR6 имеет реактивную емкостную мощность соответственно 23,1; 6,5; 0; 18,8; 9,9; 36,5 МВАр

Суммарная реактивная мощность компенсаторов реактивных мощности VAR равна 95,2 МВАр.

Для повышения коэффициента реактивной мощности с 0,85 до 0,99 необходима дополнительная реактивная мощность

95,2 МВАр - 70,9 МВАр=24,3 МВАр.

Удельная стоимость компенсаторов реактивной мощности равна 3500 долларов/МВАр (информация приведена на электронном ресурсе: https://dailythietbidien.com/wp-content/uploads/2017/11/Bang-gia-tu-bu-trung-the.pdf?fbclid=IwAR1xmSksxJsqqelc03mFFcSYOzqtsgyRRpFWArHUax_eRxOrYl8ehYWNdmc).

Стоимость приобретаемых дополнительно компенсаторов реактивной мощности будет равна 24.3 МВАр*3500 долларов/МВАр = 85 050 долларов.

Экономическая прибыль за первый год эксплуатации дополнительных компенсаторов реактивной мощности равна:

493 920…632 100 долларов / год – 85 050 долларов =
408 870…547 050 долларов / год.

Экономическая прибыль со второго года эксплуатации дополнительных компенсаторов реактивной мощности равна 493 920…632 100 долларов / год

Определим экономическую прибыль от применения АФГ.

Наличие высших гармоник вызывает следующие явления: перегрузка трансформатора, его нагрев и сгорание, даже если нагрузка потребляет только среднюю мощность; перегреваются и перегорают проводники, вызывая серьезные аварии в электрической системе; нейтральный проводник в 3-фазной системе нагревается или сгорает; напряжение N-G (нейтраль-земля) слишком велико; прерыватель срабатывает по неизвестным причинам; повреждается конденсатор компенсации реактивной мощности; помехи в системе связи, наличие конденсаторов и трансформаторных реакторов могут образовывать LC-цепь, которая многократно резонирует с гармоническими токами, вызывая перегрузку конденсаторов и трансформаторов, приводящую к взрыву конденсаторов и выходу из строя трансформаторов.

Уменьшение коэффициентов нелинейных искажений до нормативных значений позволит повысить производительность завода с 600 000 тонн до 650 000 тонн глинозема в год за счет: улучшения технологии энергосистемы, сокращения времени отключения электроэнергии, сокращения времени ремонта оборудования с 15 % до примерно 5 %, минимизации локальных аварийных отключений электроэнергии из-за наличия высших гармоник тока и напряжения при нелинейных нагрузках (информация приведена на электронном ресурсе: https://tapchicongthuong.vn/bai-viet/to-hop-bo-xit-nhom-tan-rai-lam-dong-toi-uu-hoa-san-xuat-kinh-doanh-khang-dinh-thuong-hieu-59158.htm).

При применении АФГ прибыль завода, полученная за вычетом себестоимости производства 50 000 тонн, составляет около 7 миллиардов донгов (около 306 735 долларов/год) (информация приведена на электронном ресурсе: https://congthuong.vn/cong-ty-tnhh-mtv-nhom-lam-dong-vuot-kho-thanh-cong-171343.html).

Стоимость одного АФГ принимается равной 5 000 долларов США (информация приведена на электронном ресурсе: https://russian.alibaba.com/p-detail/AC-62186078628.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.396063cbk9gwX2).

Инвестиционные затраты на шесть АФГ, которые должны быть включены на шинах 0,4 кВ ПД-1…ПД-6, составляют при стоимости одного АФГ 5 000 долларов США: 5 000 долларов США * 6 АФГ = 30 000 долларов.

Экономическая прибыль за первый год эксплуатации шести АФГ равна:

306 735 долларов в год – 30 000 долларов = 276 735 долларов / год.

Экономическая прибыль со второго года эксплуатации шести АФГ равна 306 735 долларов/год.

Общая экономическая прибыль от предлагаемых мероприятий за первый год эксплуатации составит 408 870…547 050 долларов/год + 276 735 долларов/год = 685 655…823 785 долларов/год.

Общая экономическая прибыль от предлагаемых мероприятий со второго года эксплуатации составит 493 920…632 100 долларов/год + 306 735 долларов/год = 800 605…938 835 долларов/год.

Определим срок окупаемости компенсаторов реактивных мощности VAR и АФГ.

Срок окупаемости = первоначальные инвестиции / чистая прибыль за 1 год.

Случай 1. Срок окупаемости компенсатора реактивной мощности VAR.

Стоимость приобретаемых дополнительно компенсаторов реактивной мощности будет равна 24.3 МВАр*3500 долларов/МВАр = 85 050 долларов.

Экономическая прибыль за эксплуатации дополнительных компенсаторов реактивной мощности равна: 493 920…632 100 долларов / год)

Срок окупаемости VAR = 85 050 долларов /493 920…632 100 долларов / год =49...63 дня.

Случай 2. Срок окупаемости АФГ

Инвестиционные затраты на шесть АФГ, которые должны быть включены на шинах 0,4 кВ ПД-1…ПД-6, составляют, при стоимости одного АФГ 5 000 долларов США, 5 000 долларов США * 6 АФГ = 30 000 долларов.

При применении АФГ прибыль завода составляет 306 735 долларов/год.

Срок окупаемости АФГ =30 000 долларов/306 735 долларов/год =36 дней

Таким образом, срок окупаемости VAR составляет 49...63 дня. Срок окупаемости АФГ составляет 36 дней.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справки об использовании результатов работы

UNIVERSITY OF DALAT
01 phu dong thien vuong, Dalat, Lamdong, Vietnam
Tel: 84. 263.3822246 - Fax: 84.263.3823380
Website: https://dlu.edu.vn/ Email: info@dlu.edu.vn

Лам Донг, ...01/10/2021 г.

СПРАВКА

Настоящим удостоверяем, что результаты диссертационной работы аспиранта До Тхань Лич на тему «обоснование способов повышения энергетичеких показателей системы электроснабжения глиноземного завода » для их использования при исследовании и разработке проектов по повышению качества электроэнергии на глиноземном заводе в Лам Донге, Вьетнам. Результаты исследований, представленные в диссертации, используются в качестве учебных материалов по технике управления и автоматизации на факультете ядерной физики и инженерии Университета Далата.

УНИВЕРСИТЕТ ДАЛАТА
Директор

Dr. Trần Hữu Duy

DALAT VOCATIONAL TRAINING COLLEGE
01 hoang van thu, Dalat, Lamdong, Vietnam
Tel: 0263.3836654 - Fax: 0263.3545099
Website: http://cdndalat.edu.vn/Email: cdndalat@cdndalat.edu.vn

Лам Донг, ...26/10/2021 г.

СПРАВКА

Настоящим удостоверяем, что результаты диссертационной работы аспиранта До Тхань Лич на тему «Обоснование способов повышения энергетичеких показателей системы электроснабжения бокситового рудника» используются в качестве учебных материалов для студентов факультета электротехники школы Dalat Vocational Training College по теме: " *Повышение объемов производства с использованием решений по повышению качества электроэнергии, стабилизация энергосистемы алюминиевого завода Лам Донг.*". Материалы диссертационная работы являются основой для проведения научных исследований по смежным темам на провинциальном и национальном уровне.

ПРОРЕКТОР

Доктор. Нгуен Ван Хай

СЕРТИФИКАТ

До Тхань Лич

Национальный исследовательский технический университет «МИСиС»

принял(а) участие в качестве спикера в XXVIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2020»
с докладом

«Обоснование способов повышения энергетических показателей системы электроснабжения бокситового рудника»

на сессии

«ЭНЕРГЕТИКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ»

Директор Горного
института НИТУ «МИСиС»
А.В. Мясков

СЕРТИФИКАТ

До Тхань Лич

Национальный исследовательский технический университет «МИСиС»

принял(а) участие в качестве спикера в XXVIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2020»
с докладом

«Исследование процесса запуска скребкового конвейера с электрическим приводом на угольных шахтах»

на сессии

«ЭНЕРГЕТИКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ»

Директор Горного
института НИТУ «МИСиС»
А.В. Мясков