

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

**ДО ТХАНЬ ЛИЧ**

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

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Шевырёв Юрий Вадимович

Москва – 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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<sup>2</sup>, 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<sup>2</sup> (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 обоснованные 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 Минобрнауки 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность и степень научной разработанности темы исследования, сформулированы цель, основная идея работы, задачи исследования, основные научные положения и новизна, а также научное и практическое значение работы.

**В первой главе** рассмотрено текущее состояние добычи и переработки бокситов во Вьетнаме. Дано описание и анализ существующей структуры системы электроснабжения глиноземного производства.

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. Суммарные выявленные запасы бокситовой руды и прогнозные ресурсы составляют около 5,5 миллиардов тонн, из которых на северный регион приходится около 91 миллион 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.

Так как структуры систем электроснабжения глиноземных заводов в республике Вьетнам имеют общие принципы построения, то анализ системы электроснабжения приведён на примере завода в провинции Лам Донг.

Глиноземный завод в Лам Донге производит 650 тысяч тонн глинозема в год. Электроэнергия на глиноземный завод поступает от двух линий электропередачи напряжением 110 кВ. На самом заводе построены две трансформаторные подстанции в 20 МВА для понижения напряжения со 110 до 6 кВ. Кроме того, на заводе строится резервная электростанция, состоящая из двух комплектов генераторов мощностью по 15 МВА. Выходное напряжение генераторов составляет 6 кВ. На рисунке 1 представлена структура электроэнергетической системы глиноземного завода в Лам Донге. От двух трансформаторов 110/6 кВ напряжение 6 кВ подается на распределительные станции ПД-1...ПД-6.

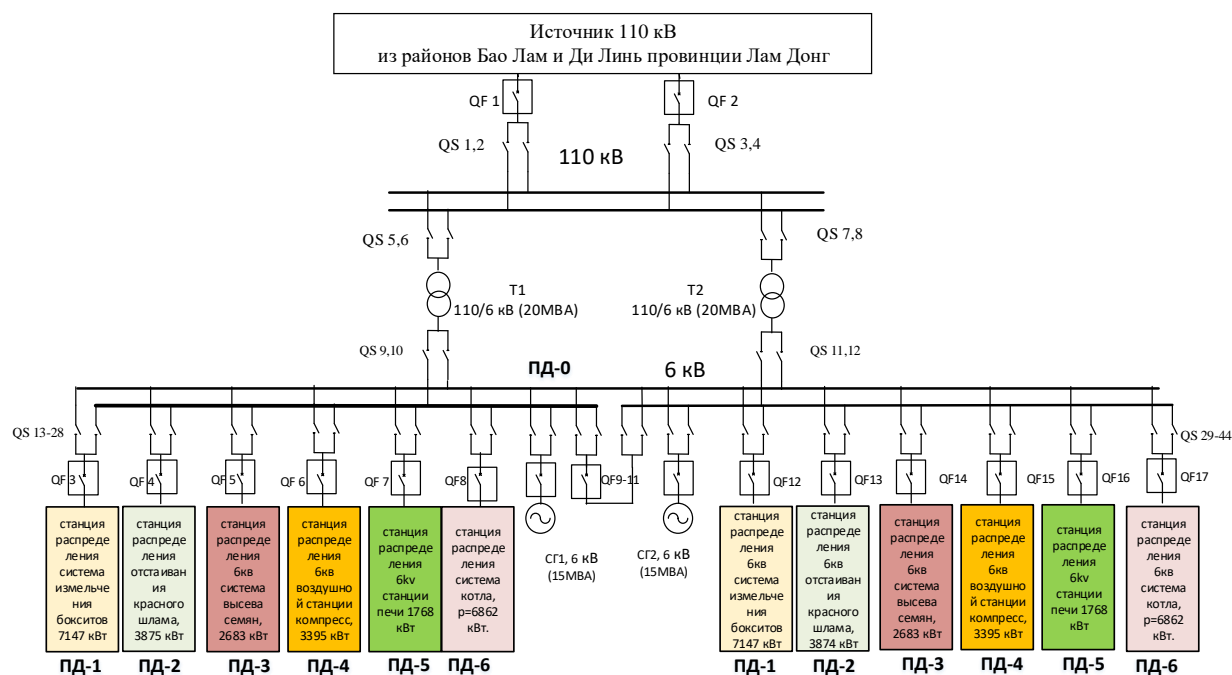


Рисунок 1 – Структура электроэнергетической системы

Анализ эксплуатации системы электроснабжения завода показал, что наличие нелинейных нагрузок в виде частотно-регулируемых электроприводов на низковольтных станциях 0,4 кВ приводит в узлах их подключения к перегреву кабеля, повреждению изоляции. Двигатели также могут перегреваться, вызывать шум, а также колебания крутящего момента на роторе, что приводит к механическому резонансу и вибрациям. Включение конденсаторов приводит к их перегреву и разрушению. 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 электрооборудования и нарушению нормальной работы завода.

На основании результатов анализа текущего состояния системы электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг для повышения энергетических показателей обосновано проведение следующих мероприятий:

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

2. Для повышения общего коэффициента мощности системы электроснабжения завода 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.

На основании выполненного анализа влияния нелинейных нагрузок на систему электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг и обзора



средств улучшения качества электроэнергии сформулированы задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработана модель системы электроснабжения завода, с помощью которой была 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.

На рисунке 2 показана визуальная модель схемы распределительной системы 110 кВ с двумя главными силовыми трансформаторами 110 / 6 кВ, 20 МВА.

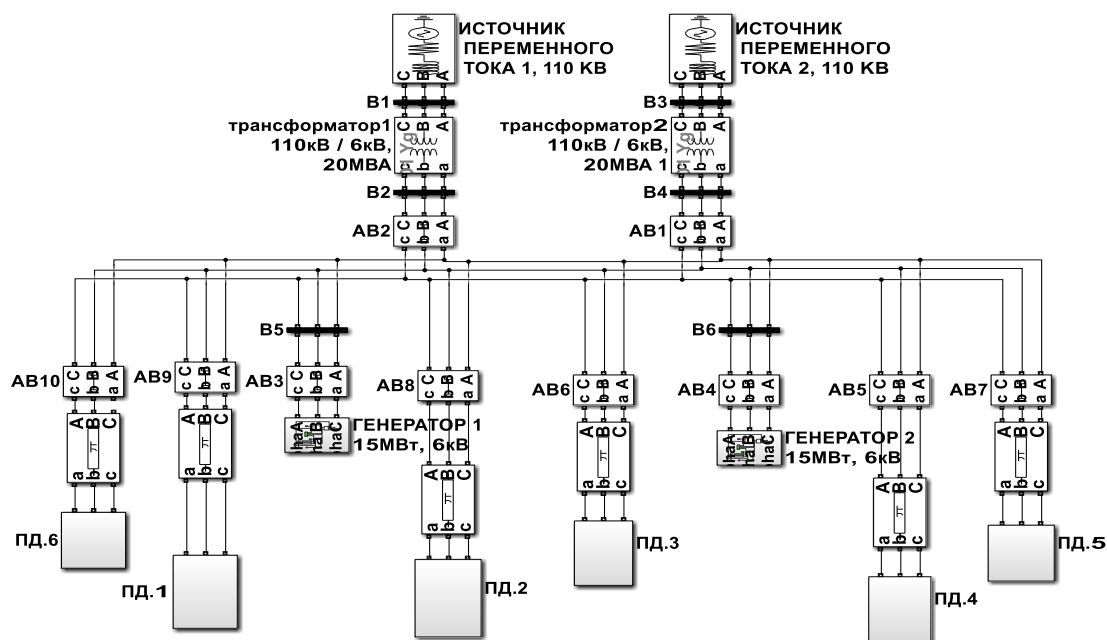


Рисунок 2 – Модель электрической системы глиноземного завода в Лам Донге

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 ( $P_{ПД-1}=14294$  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 ( $P_{ПД-4}=6790$  кВт), распределительная станция печи ПД-5 ( $P_{ПД-5}=3536$  кВт), распределительная станция котельной ПД-6 ( $P_{ПД-6}=13724$  кВт).

Анализ результатов исследования на модели, приведённых в таблице 1, показывает, что наличие нелинейных нагрузок в виде частотно-регулируемых электроприводов приводит к значительным искажениям синусоидальных форм напряжений и токов на шинах 0,4 кВ по сравнению с шинами напряжением 6 кВ.

Таблица 1 – Коэффициенты нелинейных искажений по напряжению и току на шинах напряжением 6 кВ и 0,4 кВ и коэффициент мощности на шинах напряжением 6 кВ

6 кВ				0,4 кВ		
	КНИ <sub>U%</sub>	КНИ <sub>I%</sub>	cos(φ)		КНИ <sub>U%</sub>	КНИ <sub>I%</sub>
ПД-0	0,19	0,35	0,42			
ПД-1	0,19	0,23	0,32	ПД-1	7,08	25,15
ПД-2	0,19	0,98	0,64	ПД-2	6,27	25,52
ПД-3	0,19	0,84	0,99	ПД-3	6,83	25,35
ПД-4	0,19	0,25	0,4	ПД-4	6,62	25,43
ПД-5	0,19	0,45	0,43	ПД-5	6,32	25,62
ПД-6	0,19	0,23	0,25	ПД-6	7,96	24,60

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 ( $\text{КНИ}_{U\%} \leq 5$ ,  $\text{КНИ}_{I\%} \leq 20$ ). Поэтому для компенсации высших гармоник тока и напряжения необходимо применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии.

Перспективным средством повышения качества электроэнергии является применение активных фильтров гармоник. 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.

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

**В третьей главе** обоснована и 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 является то, 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.

С увеличением количества уровней в инверторе усложняется схема, увеличивается количество полупроводниковых ключей. 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 H-моста, двухуровневый инвертор и трехуровневый инвертор с фиксированной нейтральной точкой (NPC). Такое построение многоуровневого инвертора позволяет уменьшить содержание высших гармоник в выходном напряжении без увеличения количества силовых устройств. Трехфазная структура гибридного инвертора показана на рисунке 3.

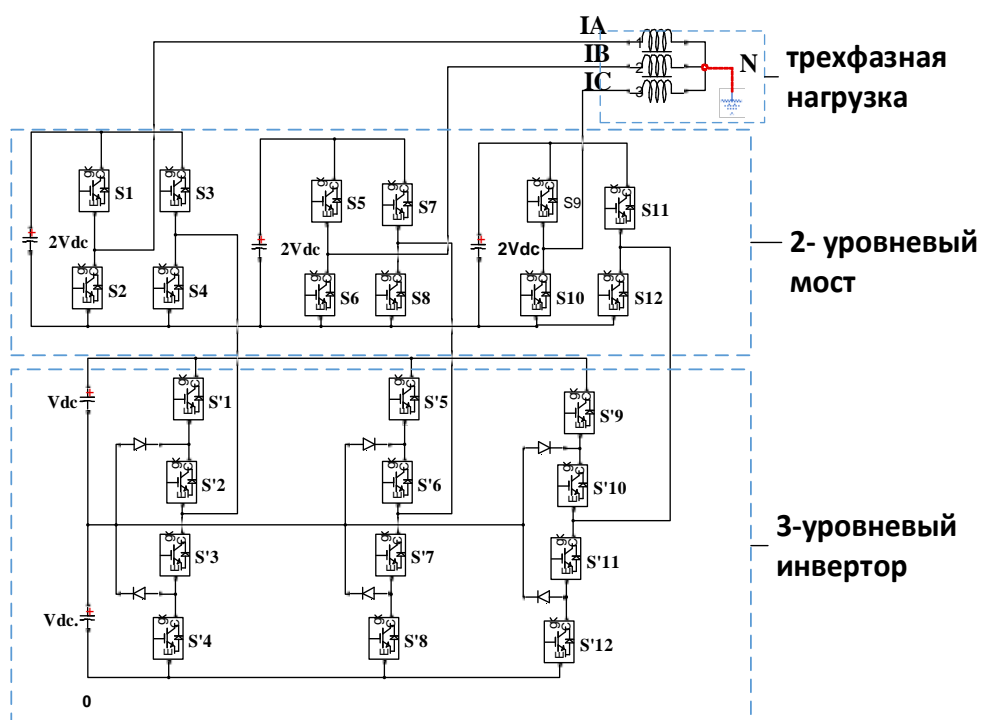


Рисунок 3 – Трехфазная структура гибридного инвертора

В каждой фазе имеется восемь полупроводниковых ключей. Управляющие импульсы на 8 ключей фаз А, В и С подаются со сдвигом на 120 эл. градусов к соответствующей клемме затвора.

Для управления гибридным инвертором в составе активного фильтра гармоник в работе предложен метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

несущего сигнала. Метод широтно-импульсной модуляции для предлагаемой схемы позволяет уменьшить синфазное напряжение, коммутационные потери, минимизировать гармоники тока и гармоники напряжения, получить близкую к синусоидальной волну напряжения и волну тока.

На рисунке 4 приведена визуальная модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ с использованием пакета MATLAB и его инструментов Sim Power System и Simulink. Основу модели АФГ представляет рассмотренный ранее гибридный 5-уровневый каскадный инвертор с использованием ШИМ. Активный фильтр подключен параллельно нелинейной нагрузке.

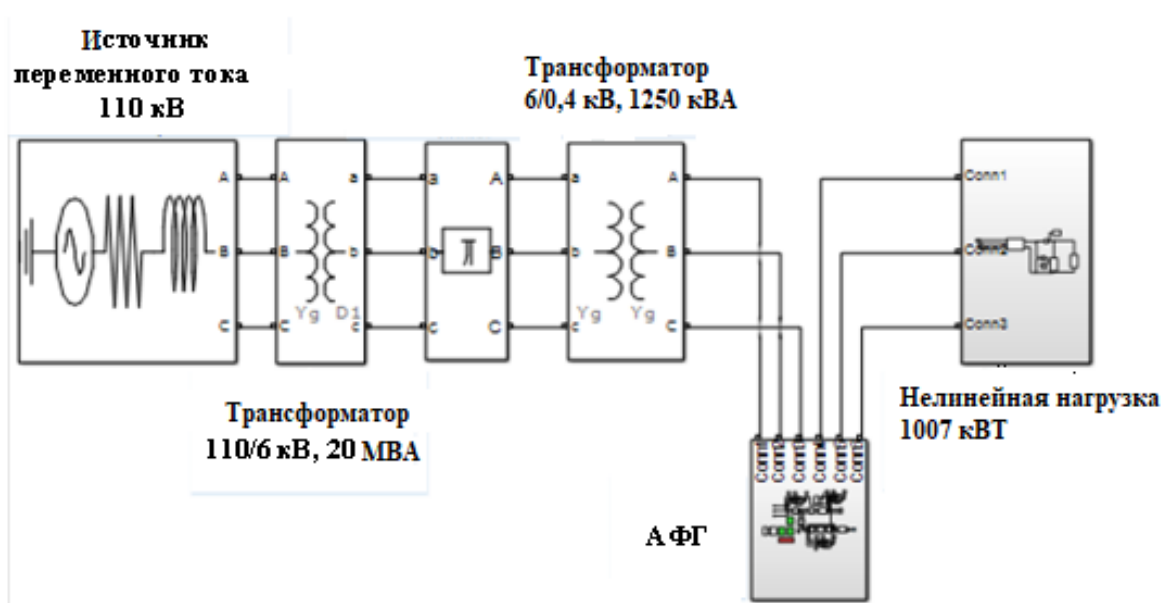
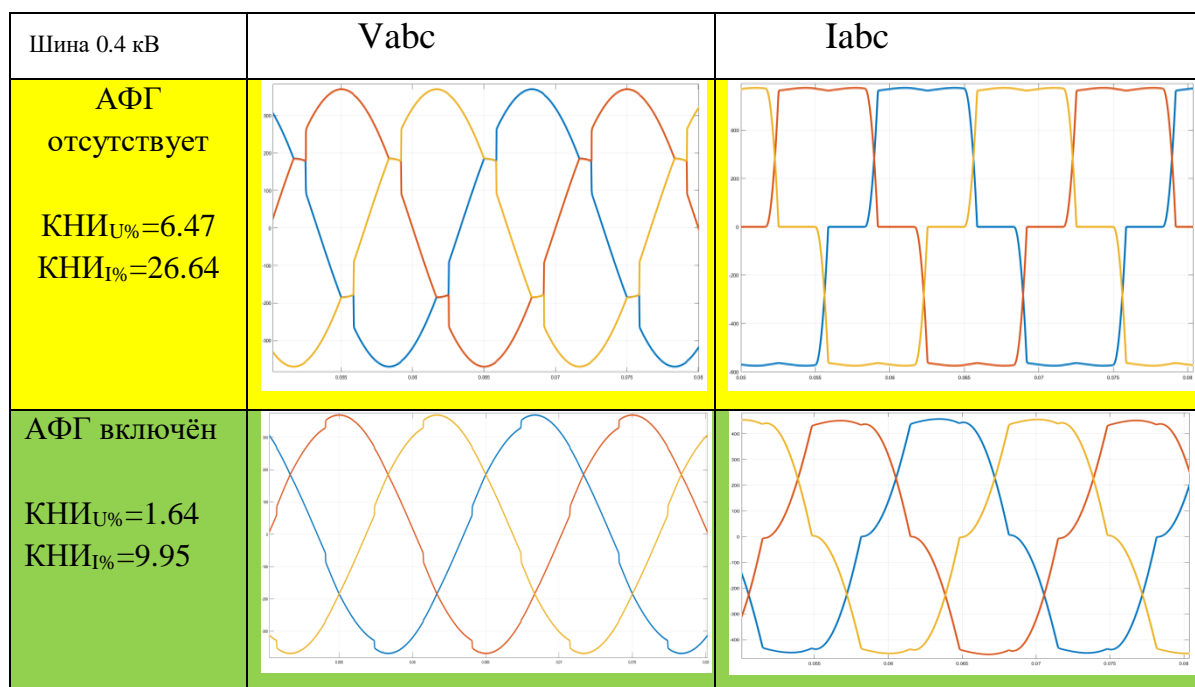


Рисунок 4 – Модель системы электроснабжения с нелинейной нагрузкой при включении АФГ

В таблице 2 приведены результаты моделирования при отсутствии АФГ и при его включении на шинах 0,4 кВ.

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

Таблица 2 – Результаты моделирования



При включении АФГ и наличии нелинейной нагрузки коэффициент нелинейных искажений напряжения на шине 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, установленным международным стандартом IEEE Std 519-2014.

Таким образом АФГ 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, что позволяет решить задачу по устранению воздействия высших гармоник на производственную деятельность предприятия.

**В четвёртой главе** выполнено обоснование и разработка способа улучшения коэффициента мощности с помощью статического компенсатора переменного напряжения VAR (SVC) со структурой фиксированного тиристорного реактивного конденсатора (FC-TCR) с целью замены статического компенсатора коэффициента мощности (СТАТКОМ), который в настоящее время используется для компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам. Компенсаторы реактивной мощности СТАТКОМы включаются и выключаются напрямую с помощью системы ручного переключения.

На рисунке 5 показана визуальная модель схемы распределительной системы 110 кВ с двумя главными силовыми трансформаторами 110/6 кВ, 20 МВА.

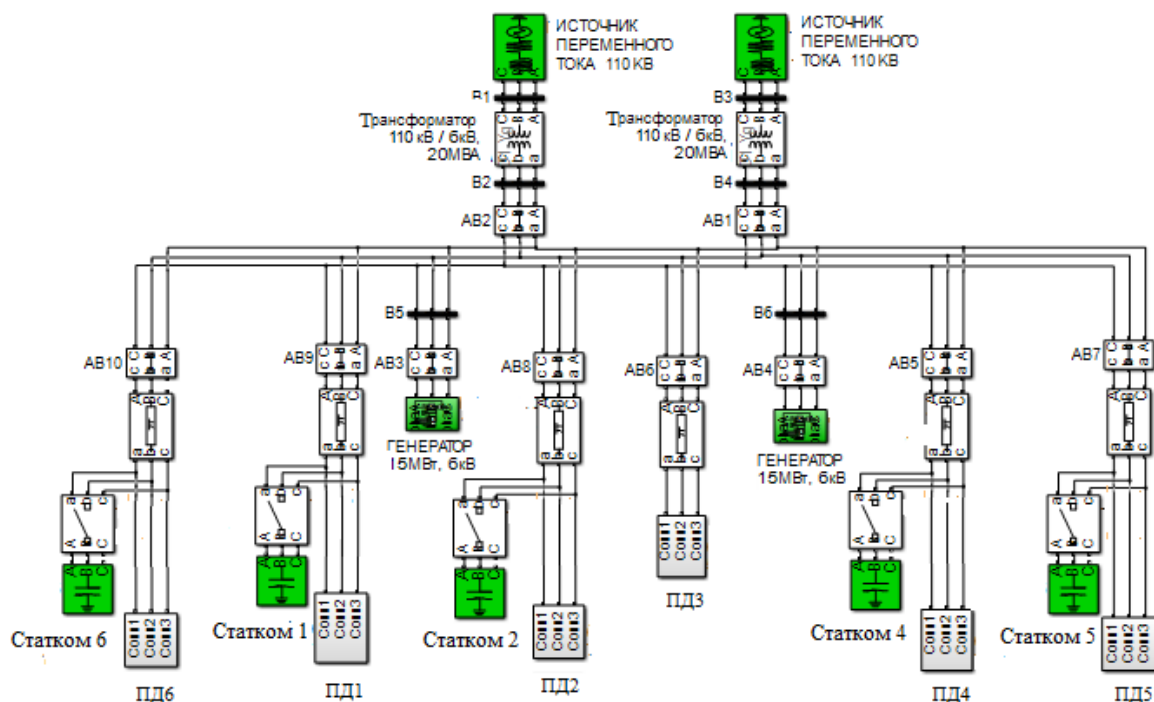


Рисунок 5 – Модель системы электроснабжения глиноземного завода при наличии СТАКОМов на шинах 6 кВ

Статические компенсаторы подключены параллельно на шины 6 кВ распределительных 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:  $Q_{\text{СТАТКОМ1}} = 18,5 \text{ МВАр}$ ,  $Q_{\text{СТАТКОМ2}} = 4 \text{ МВАр}$ ,  $Q_{\text{СТАТКОМ4}} = 14,5 \text{ МВАр}$ ,  $Q_{\text{СТАТКОМ5}} = 7,5 \text{ МВАр}$ ,  $Q_{\text{СТАТКОМ6}} = 26,4 \text{ МВАр}$ .

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы. Включение СТАТКОМов приводит к увеличению коэффициента мощности. Коэффициент мощности на общей шине станции (ПД0) 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. Гармонические искажения тока значительно увеличились, когда используются неуправляемые статические компенсаторы СТАТКОМы и отсутствуют фильтры высших гармоник.

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. Статические компенсаторы VAR (SVC) содержат шунтирующие конденсаторы и реакторы, которые управляются тиристорами. Модель статического компенсатора VAR (SVC) приведена на рисунке 6. На рисунке 7 показана визуальная модель системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) на шинах 6 кВ распределительных систем станций ПД-1...ПД-6.

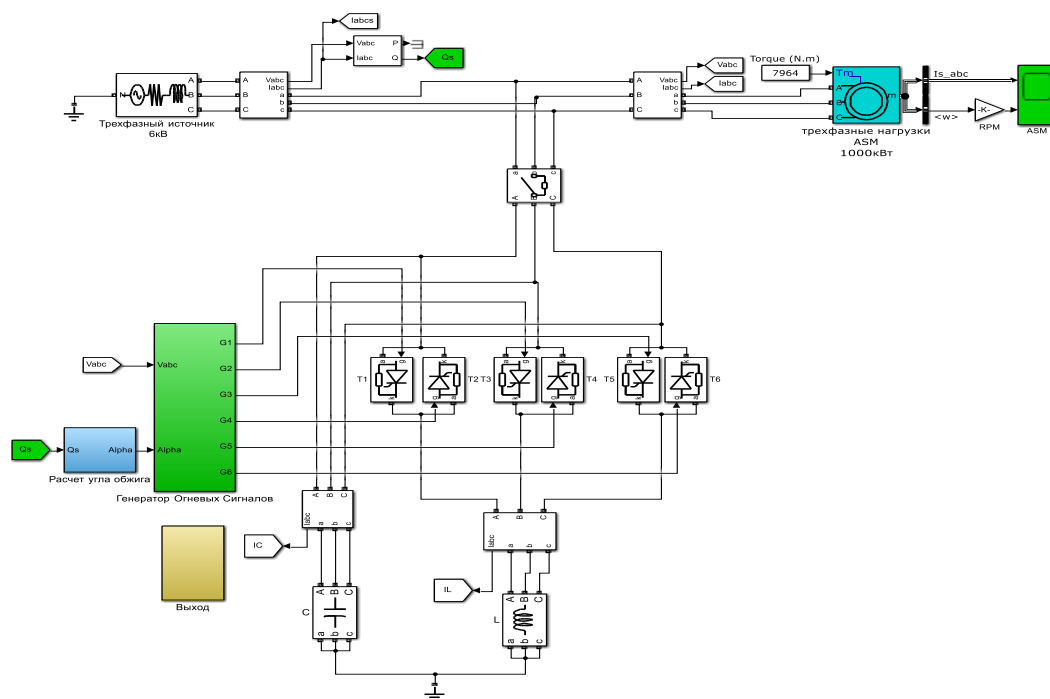


Рисунок 6 – Модель статического компенсатора VAR (SVC)

Анализ результатов моделирования системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) позволил сделать следующие выводы.

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

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.

Благодаря высокому быстродействию компенсаторов VAR (SVC), предлагаемое решение повышает качество мощности, эффективность



электрооборудования, а также производительность глиноземного завода в Лам Донг.

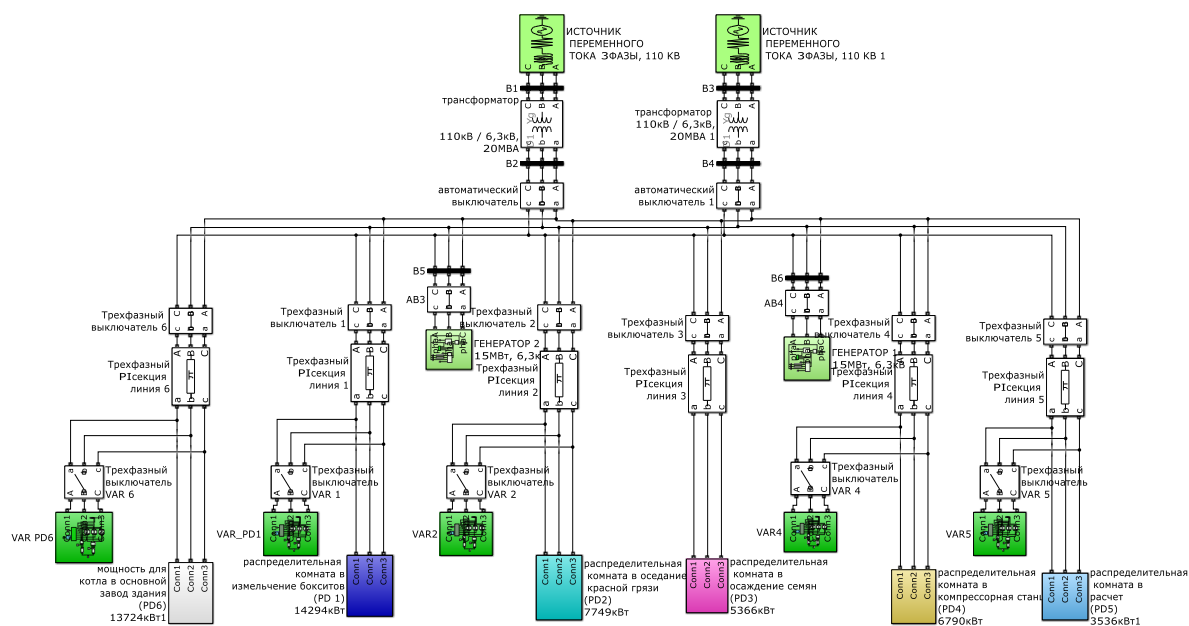


Рисунок 7 – Модель системы электроснабжения глиноземного завода с устройствами статической компенсации VAR (SVC) на шинах 6 кВ

В пятой главе на основе комплексного подхода предложено решение совместного применения статических компенсаторов реактивной мощности VAR (SVC) и активных фильтров гармоник (АФГ) в системе электроснабжения глиноземного завода, что позволит одновременно с улучшением коэффициента мощности сети снизить уровень высших гармоник тока и напряжения до их нормативных значений.

Исследования на моделях проводились для трех случаев: случай I – СТАТКОМ и АФГ отсутствуют; случай II – с компенсацией реактивной мощности VAR (SVC), без АФГ; случай III – с компенсацией реактивной мощности VAR (SVC), с АФГ.

АФГ установлен на шинах 0,4 кВ распределительных станций ПД1...ПД6, к которым подключена нелинейная нагрузка. На рисунке 8 приведена визуальная модель распределительной станции ПД1 при включении АФГ на шинах 0,4 кВ. Аналогичные модели разработаны для распределительных станций ПД2...ПД6.

В таблице 3 приведены формы кривых тока и напряжения на шинах 0,4 кВ распределительной станции ПД1. В таблице 4 приведены значения активной P и реактивной мощности Q, коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИ U% и тока КНИ I%, коэффициента мощности cos(φ) на шинах 6 кВ распределительных станций. В таблице 5 приведены значения коэффициентов нелинейных искажений напряжения КНИ U% и тока КНИ I% на шинах 0,4 кВ.



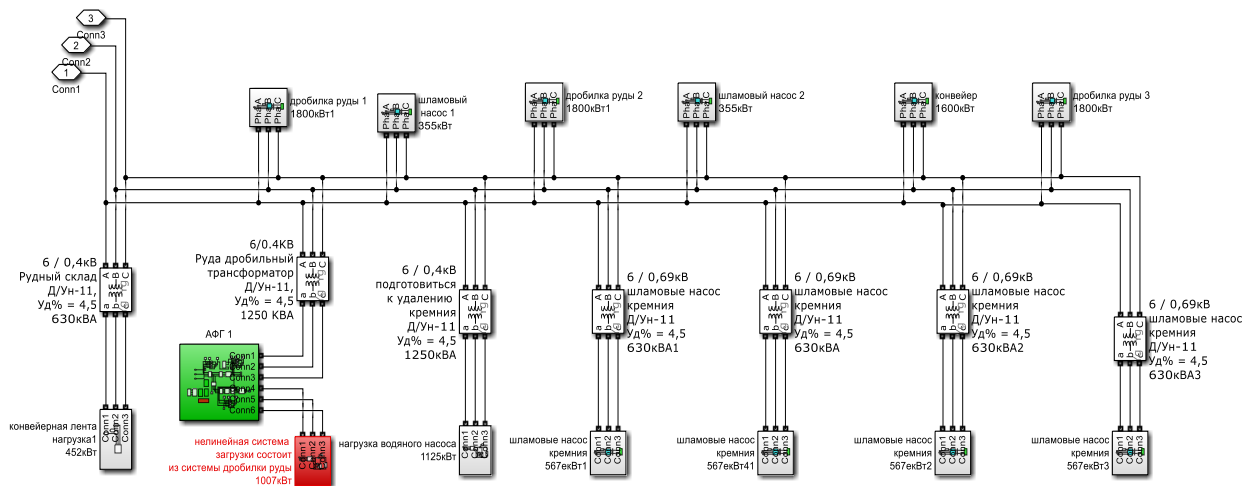


Рисунок 8 – Модель станции распределения электроэнергии ПД-1

Таблица 3 – Формы кривых токов и напряжений на шинах 0,4 кВ станции распределения электроэнергии ПД-1

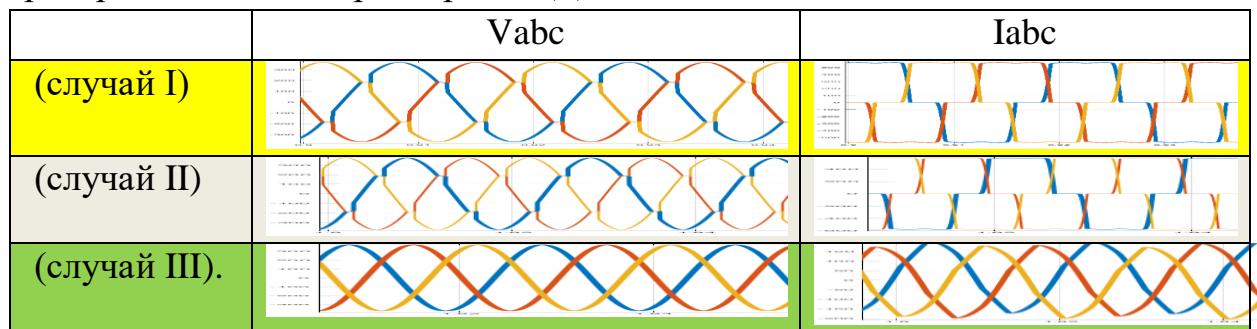


Таблица 4 – Значения P, Q, КНИ U, %, КНИ I, %, cos(φ) на шинах 6 кВ для случаев I, II, III

Шина 6 кВ	P, МВт, Q, МВАр						КНИ U, %			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 – Значения  $K_{НИU\%}$ ,  $K_{НИI\%}$  при наличии нелинейных нагрузок на шинах 0,4 кВ для случаев I, II, III

Шина, 0,4кВ	КНИ U, %			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

Анализ результатов моделирования, 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. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения на шинах низкого напряжения 0,4 кВ превышают 6%. Коэффициенты нелинейных искажений тока превышают 24%. Данные значения больше допустимых пределов  $K_{НИU\%} \leq 5\%$ ,  $K_{НИI\%} \leq 20\%$ , установленных международным стандартом IEEE Std 519-2014.

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 кВ VAR (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. 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. 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, установленных международным стандартом IEEE Std 519-2014. Таким образом применение АФГ 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.

В заключительной части главы на основе выполненных исследований сформулированы научно-обоснованные рекомендации по выбору средств повышения энергетических показателей.

## 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.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах**

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. До Тхань Лич. Обоснование схемы активного фильтра гармоник на основе гибридного каскадного инвертора /До Тхань Лич, Ю.В. Шевырёв//Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21. – № 2. С. 105–114. DOI: 10.14529/power210211

2. До Тхань Лич. Повышение качества электроэнергии на примере глиноземного завода в ЛамДонге, Вьетнам /Д.Т. Лич, Ю.В. Шевырёв // Известия Тульского Государственного Университета. Технический науки. – 2021. – №12 — С. 44–51. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-43-51.

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых международной базой цитирования *SCOPUS*:

3. До Тхань Лич. Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам/До Тхань Лич//Горные науки и технологии. – 2021. – Т.6. – №2. С. 121–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых РИНЦ:

4. До Тхань Лич. Исследование решения по улучшению коэффициента мощности для алюминиевой бокситовой электростанции Лам Донг (Вьетнам) с переменным статическим компенсатором (SVC)/До Тхань Лич//Кузнечно-штамповочное производство. – 2021. – № 7. – С. 28–41.

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