

*На правах рукописи*

**Ле Ван Тунг**



**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ НА  
ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические  
комплексы и системы*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Козярук Анатолий Евтихиевич*

**Официальные оппоненты:**

*Саушев Александр Васильевич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», кафедра электропривода и электрооборудования береговых установок», заведующий кафедрой;

*Воронцов Алексей Геннадьевич*

кандидат технических наук, ООО "Научно-производственный центр "Судовые электротехнические системы", отдел преобразовательной техники, начальник.

**Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», г. Санкт-Петербург.**

Защита состоится 25 июня 2021 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).  
Автореферат разослан 23 апреля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КОПТЕВА  
Александра Владимировна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования.**

В настоящее время во Вьетнаме увеличиваются темпы добычи угля (общий объем в 2020 году - 55 млн. тонн). Запасы угля сосредоточены в основном в провинции Куангнинь (90% угля страны). План разработки группы компаний «Вьетнамская угольная и минеральная промышленность» (ВИНАКОМИН) составляет 70 млн. тонн к 2025 году, из которых более 70% приходится на подземный способ.

Горное предприятие представляет собой сложный взаимосвязанный комплекс различных производственных механизмов, включая системы электроприводов конвейеров. Конвейеры являются важным оборудованием для непрерывной транспортировки грузов в подземных месторождениях, открытых шахтах и предприятиях по переработке угля. В подземных шахтах уголь транспортируется с места добычи через систему, состоящую из скребкового конвейера, бункера, ленточного конвейера.

В настоящее время, при увеличении глубины добычи, увеличение расстояния транспортировки приводит к увеличению эксплуатационных расходов на систему электропривода конвейера. Кроме того, система электропривода транспортировки угля работает с большим количеством устройств, параметры, которых необходимо оптимизировать. Поэтому актуальной задачей сейчас является повышение эффективности и надежности работы системы электропривода конвейера на горнодобывающих предприятиях Социалистической Республики Вьетнам.

### **Степень разработанности темы исследования.**

На протяжении многих лет ряд технических компаний во всем мире вели разработки систем электропривода для конвейеров, например: Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония), Rockwell Automation (США), Omron (Япония), АВВ (Швейцария) и др. Российские ученые, такие как Гливанский А.А., Галкин, В.И., Дьячков В.К., Запенин И.В., Кубрин С.С., Спиваковский А.О., Тарасов Ю.Д., Шахмейстер Л.Т., и др. исследовали повышение эффективности электропривода конвейеров.

Несмотря на то, что было проведено множество исследований по повышению эффективности систем электропривода конвейеров, проблемы, связанные с энергосбережением и электромагнитной совместимостью системы многодвигательного частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем являются актуальными.

#### **Цель работы**

Повышение энергетической эффективности электропривода конвейера с минимизацией его влияния на качество электрической энергии карьерной сети за счёт использования активных выпрямителей с системой прямого управления мощностью в многоинверторных преобразователях частоты.

#### **Идея работы**

Использование многоинверторных преобразователей частоты с общим активным выпрямителем и системой прямого управления мощностью для регулирования коэффициента мощности многодвигательного электропривода, потребления тока по форме близкого к синусоидальной и минимальным влиянием на форму напряжения сети.

#### **Основные задачи исследования:**

1. Анализ и оценка систем ЭП конвейерного транспорта на горнодобывающих предприятиях Вьетнама и мирового опыта.
2. Разработка многоинверторной топологии силовой части многодвигательного электропривода конвейера.
3. Оценка влияния систем частотно-регулируемых электроприводов на показатели энергоэффективности.
4. Разработка алгоритмов прямого управления мощностью активного выпрямителя ПЧ с возможностью регулирования входного коэффициента мощности.
5. Выполнение компьютерного имитационного моделирования многодвигательного электропривода с активным выпрямителем в преобразователе частоты и системы прямого управления мощностью.
6. Анализ полученных теоретических и модельных результатов исследований с разработкой рекомендаций по их внедрению на шахтах Вьетнама.

### **Научная новизна работы.**

Разработка многоинверторных преобразователей частоты (ПЧ) с общим активным выпрямителем и системы прямого управления мощностью, обеспечивающих индивидуальное управление приводными машинами и сетевыми переменными электроприводами с поддержанием коэффициента мощности, близкого к единице и близкой к синусоидальной форме входного тока и напряжения.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации систем электропривода конвейерного транспорта в угольной шахте Маохе, а также на других горнодобывающих предприятиях Социалистической Республики Вьетнам.

Результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе в университетах Социалистической Республики Вьетнам. Имеются справки об использовании в Куангниньском промышленном университете.

### **Методология и методы исследований.**

Теоретические исследования осуществлялись с применением основ теории электропривода, теории автоматического управления и методов компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов имитационного моделирования в среде Matlab и Simulink.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Работа соответствует 2 и 3 пунктам паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы – п. 2 – Обоснование совокупности технических, технологических, экологических, экономических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем и п. 3 – Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Использование общего активного выпрямителя в структуре многоинверторного преобразователя частоты электропривода конвейерных установок обеспечивает возможность индивидуального управления приводами электродвигателя с повышенным качеством по сравнению с многопульсным выпрямителем и активным фильтром.

2. Система прямого управления мощностью активного выпрямителя преобразователя частоты с разработанными алгоритмами управления обеспечивает улучшение показателей энергоэффективности электропривода конвейерных установок по сравнению с алгоритмом векторного управления.

**Степень достоверности и апробация результатов работы**

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики Горного университета, докладывались на конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon–2018), Сочи, Россия, 2018.

2. XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт –Петербург, Россия, 2020.

3. VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME –2020». Санкт-Петербург, Россия, 2020.

4. Международная конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП –2020), Санкт-Петербург, Россия, 2020.

5. III Международная конференция по инженерным исследованиям и приложениям (ICERA – 2020), Thai Nguyen, Viet Nam, 2020.

**Личный вклад автора**

Участие во всех этапах исследования, прямой сбор исходных данных и анализ систем ЭП конвейеров на горнодобывающих предприятиях в Российской Федерации и Вьетнаме.

Создание имитационных моделей систем электропривода конвейеров, помогающих оценить энергоэффективность, электромагнитную совместимость.

Рекомендации по модернизации электропривода конвейера приняты к использованию в ВИНАКОМИН в Социалистической Республике Вьетнам.

#### **Публикации.**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений, изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 115 наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено общее описание работы, обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель и задачи исследований.

**В первой главе** представлено использование конвейеров в горной промышленности, технические характеристики конвейерного транспорта и методы улучшения эффективности электроприводов конвейеров.

В условиях все более глубокой добычи и увеличения длины транспортировки угля конвейерные системы являются основным техническим средством транспортировки угля с места добычи под землей. Электроприводы тяговых установок конвейерных систем являются крупными потребителями электроэнергии, их преобразователи частоты являются главным фактором, влияющим на качество электрической энергии, а системы управления электроприводом определяют технические характеристики и производительность конвейерных систем. Таким образом, исследования по повышению эффективности конвейерных

транспортных систем на горнодобывающих предприятиях являются актуальной задачей и имеют высокую значимость для группы компаний «Вьетнамская угольная и минеральная промышленность» (ВИНАКОМИН).

В подземных угольных шахтах система электропривода конвейерной ленты имеет большую пропускную способность от 100 т/ч до 500 т/ч. Преимущество конвейерного транспорта заключается в том, что он может транспортировать сырье в горизонтальном и наклонном направлениях, подходит для сырья разных размеров. Структуры приводных станций конвейерных систем могут иметь много типов, например таких как однобарабанный электропривод с двумя двигателями или двухбарабанный электропривод (ЭП) с двумя двигателями. Однако схема приводной станции с использованием однобарабанного привода с одним двигателем и редуктором обычно используется в ограниченном пространстве подземных шахт.

Из-за повышения глубины добычи угля количество конвейеров увеличивается, а расстояние транспортировки становится все больше. Это приводит к увеличению мощностей двигателей, процесс запуска, регулировки и торможения которых становится сложнее. Большие и неравномерные нагрузки сильно влияют на износ ленты и могут привести к её разрыву, перекосу барабана и проскальзыванию ленты на барабане. Фактически, общее время простоя транспортной системы составляет более 50% времени простоя ленточных конвейеров, что связано с нарушением работы электроприводов.

Поэтому требуется, чтобы система ЭП обеспечивала плавный пуск и торможение с ограничением ускорения, меньшими колебаниями момента и ограничением тока электродвигателя при запуске. Конвейеры имеют определенный уклон, поэтому в процессе запуска и остановки необходимо учитывать состояние двигателей, переходящих в кратковременный генераторный режим. Пример кинематической схемы электропривода конвейерных систем представлен на рисунке 1.



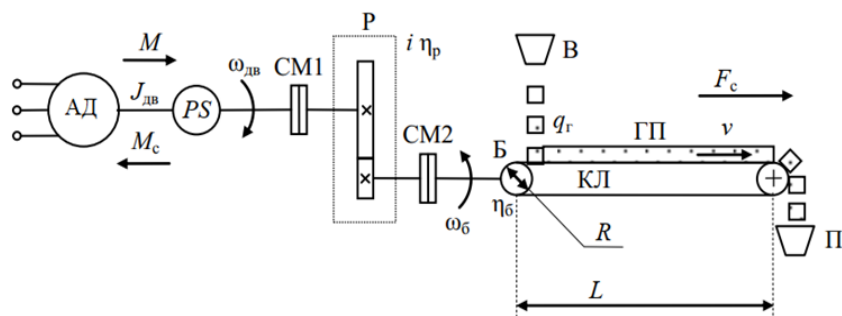


Рисунок 1 – Кинематическая схема электропривода конвейерной установки, где АД – асинхронный двигатель; PS – датчик частоты вращения; СМ (1 и 2) – соединительная муфта; Р – редуктор; Б – барабан; В – выгрузатель; П – приемник; ГП – горная порода; КЛ – конвейерная лента

Основываясь на информации о типе ЭП, используемых в конвейерных системах во Вьетнаме, и об их энергетических параметрах работы, основным электроприводом являются неуправляемые ЭП с магнитными пускателями и только некоторые подземные шахты оборудованы системами плавного пуска ЭП. Таким образом, разработка системы электропривода конвейера для обеспечения энергоэффективности, совместимости, высокой надежности является приоритетным направлением модернизации шахтного транспорта Вьетнам.

**Во второй главе** произведен анализ существующих систем частотно-регулируемых ЭП конвейера, выявлены их недостатки и определены наиболее перспективные направления развития ЭП.

Использование ПЧ вместо магнитных пускателей и устройств плавного пуска обеспечивают регулирование скорости конвейера в соответствии с заданием и учётом нагрузки. В 2020 году институт горной и энергетической механики – ВИНАКОМИН (ИЕЕМ) во Вьетнаме успешно изготовил взрывозащищенный преобразователь частоты VCKINV-Eh-660. В структуре этого ЭП используется двухзвенный преобразователь частоты с диодным неуправляемым выпрямителем и транзисторным инвертором. Однако ПЧ, используемые на горнодобывающих предприятиях, имеют общий недостаток, связанный с неуправляемым

выпрямителем, который приводит к тому, что системы частотно-регулируемых ЭП конвейеров являются нелинейной электрической нагрузкой. Этот недостаток вызывает искажение тока подземных сетей электроснабжения, а коэффициент мощности электропривода снижается.

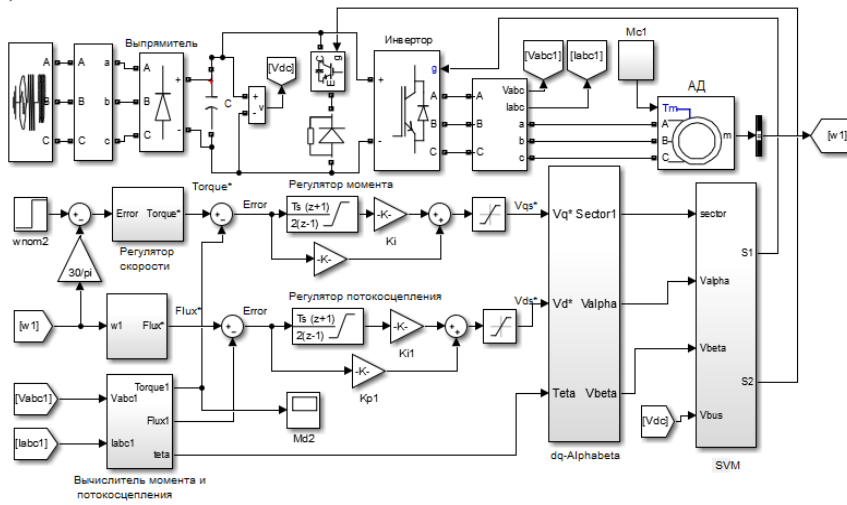
Сегодня применяется несколько решений для улучшения коэффициента мощности и фильтрации гармоник тока, таких как использование пассивных и активных фильтров на входе ПЧ. Другое решение заключается в использовании ПЧ с многоимпульсным выпрямителем. Преимущество многоимпульсного выпрямителя заключается в том, что гармоники, генерируемые одним выпрямительным блоком, будут компенсированы гармониками другого выпрямительного блока, входящего в один 12-пульсный выпрямитель.

Чтобы оценить влияние электропривода конвейера на искажение тока питания и коэффициента мощности ( $K_m$ ), были рассмотрены три варианта: ПЧ с 6-пульсным диодным выпрямителем в сочетании с реактором; ПЧ с 12-пульсным выпрямителем; ПЧ с 6-пульсным диодным выпрямителем и активным фильтром на входе ПЧ.

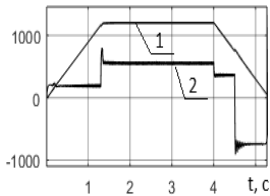
Данные типы ПЧ рассматривались в составе трехконвейерной системы ЭП, состоящей из трех асинхронных двигателей, с максимальной производительности 250 т/ч. Оценка качества работы выпрямителя и инвертора ПЧ выполнялась в пиковом режиме работы конвейера с резкими увеличениями и уменьшениями скорости и нагрузки. Это наиболее важные режимы работы асинхронного двигателя электропривода конвейера. Выбран метод прямого управления моментом (DTC) двигателей конвейеров с использованием пространственно-векторной модуляции (DTC-SVM). Этот метод преодолевает ограничения базового метода DTC. Метод управления DTC-SVM имеет такие преимущества, как малое время отклика крутящего момента, постоянную частоту переключения, высокую надежность, высокие динамические характеристики электромагнитного момента и потока статора. Для моделирования электропривода использовалось компьютерное имитационное моделирование в пакете Matlab и Simulink.

Схема моделирования системы электропривода с использованием активного фильтра показано на рисунке 2.

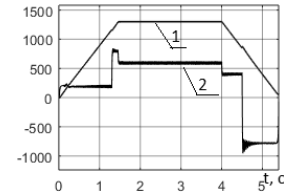
а)



б)  $M[\text{Нм}], \omega[\text{об/м}]$



в)  $M[\text{Нм}], \omega[\text{об/м}]$



г)  $M[\text{Нм}], \omega[\text{об/м}]$

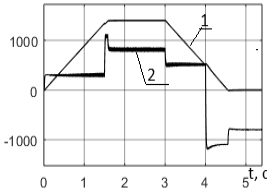


Рисунок 2. а – имитационная модель ЭП с прямым управлением моментом; скорость (1) и момент (2) двигателей конвейеров: б – первый АД; в – второй АД; г – третий АД

На рисунке 2 показаны результаты моделирования. На осциллограммах показано ступенчатое изменение момента нагрузки, которое обусловлено грузом на ленте, приводящим к изменению скорости. Использование метода прямого управления моментом двигателя обеспечивает поддержание стабильной скорости вращения и обработку момента нагрузки. Метод DTC-SVM обеспечивает высокое качество управления скоростью и моментом с переугулированием (не более 5%), процесс плавного пуска и плавного торможения. Такое управление позволяет ограничить

динамические нагрузки в электроприводе конвейера и исключит проскальзывание ленты на барабане при изменении условий работы конвейера.

Имитационная модель электропривода с использованием активного фильтра в среде Matlab и Simulink на рисунке 3.

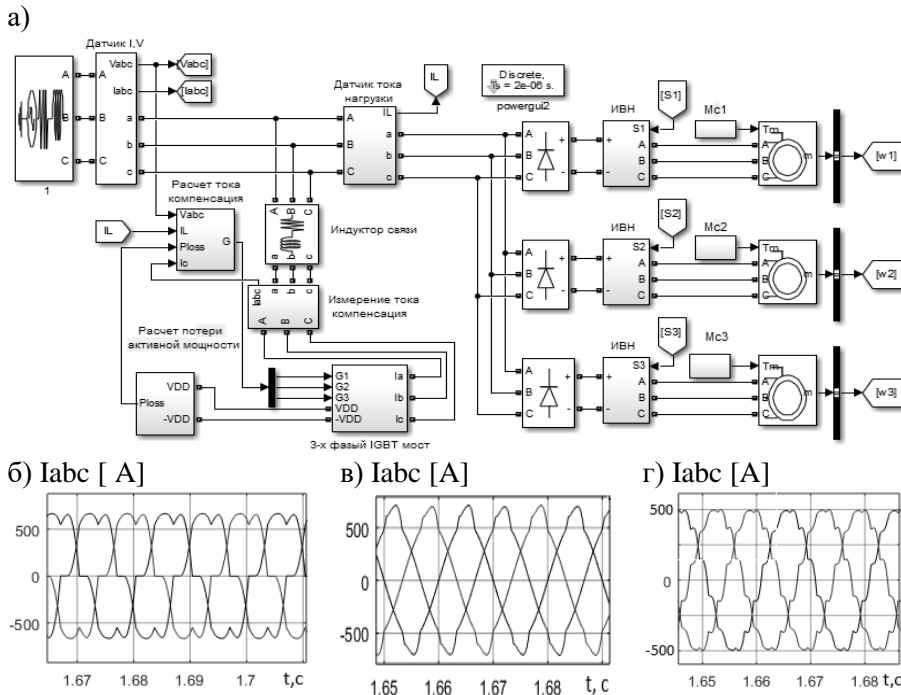
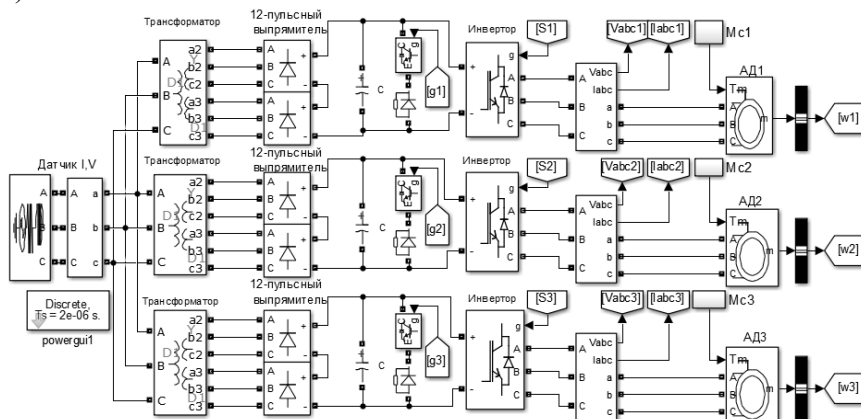


Рисунок 3. а – имитационная модель ЭП с использованием активного фильтра; график тока сети в режиме максимальных нагрузок: б – при использовании диодного выпрямителя с реактором; в – активный фильтр; г – 12-пульсный выпрямитель

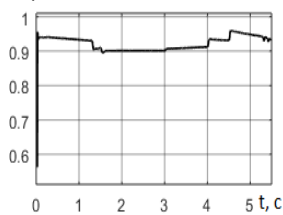
По результатам моделирования были получены искажения тока сети при использовании диодного выпрямителя с реактором ( $THD_1 = 17,7\%$ ), в методе 12-пульсного выпрямителя ( $THD_1 = 6,86\%$ ), в методе активного фильтра ( $THD_1 = 4,25\%$ ). Использование активного фильтра позволяет значительно снизить искажения тока и улучшает качество тока сети.

Имитационная модель электропривода с использованием 12-пульсного выпрямителя в среде Matlab и Simulink на рисунке 4.

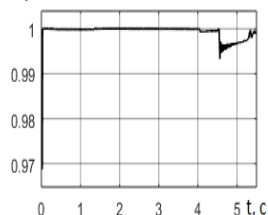
а)



б) Км



в) Км



г) Км

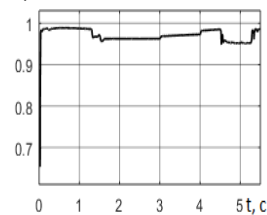


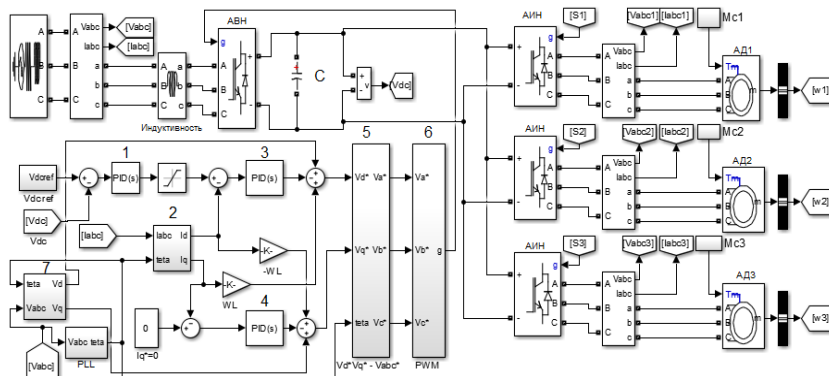
Рисунок 4. а – имитационная модель ЭП с использованием 12-пульсного выпрямителя; коэффициент мощности Км: б – при использовании диодного выпрямителя с реактором; в – при использовании активного фильтра; г – 12-пульсный выпрямитель

По результатам моделирования выявлено, что схема 12-пульсного выпрямителя и активного фильтра не только фильтрует высшие гармоники тока, но и компенсирует реактивную мощность сети, потребляемую двигателями. В методе активного фильтра, коэффициент мощности  $K_m \approx 1$  (рисунок 4. в).

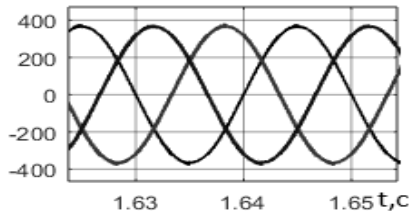
В третьей главе представлен метод повышения энергоэффективности и структурная схема системы электропривода с несколькими конвейерными двигателями.

Для системы управления активным выпрямителем ПЧ характерны следующие свойства: обеспечение формы входного тока близкой к синусоидальной; коэффициента мощности близкого к единице; стабилизация постоянного напряжения на выходе; двухсторонний обмен мощностью между двигателем и сетью. Для исследования энергоэффективности системы ЭП конвейера с активным выпрямителем был рассмотрен ЭП с системой векторного управления с ориентацией по вектору напряжения. При этом предложенная структура системы ЭП конвейера, включает один активный выпрямитель и несколько инверторов (рисунок 5).

а)



б)  $I_{abc}$  [A]



в)  $(I_T/I_1) \times 100\%$

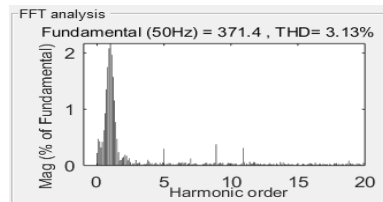


Рисунок 5. Модель системы ЭП: а – структурная схема модели с активным выпрямителем и алгоритмом векторного управления: 1 – регулятор напряжения, 2 – преобразователь тока из abc в d-q, 3 – регулятор тока  $i_d$ , 4 – регулятор тока  $i_q$ , 5 – преобразователь напряжения из d-q в abc, 6 – блок управления активным выпрямителем, 7 – преобразователь напряжения из abc в d-q; б – форма тока сети; в – график искажения тока сети

Из графиков на рисунке 5 видно преимущества ЭП конвейеров с активным выпрямителем в ПЧ: происходит снижение гармонических искажений сетевого тока ( $THD_I = 3,13\%$ ), а коэффициент мощности становится близким к единице, значение тока, потребляемого электроприводом меньше, чем при использовании активного фильтра и 12-пульсного выпрямителя.

Таблица 1 показывает, что использование активного выпрямителя с системой векторного управления является наиболее перспективным.

Таблица 1 – Результаты оценки гармонических искажений тока сети с помощью моделирования в Matlab и Simulink.

Метод	$THD_I\%$
Активный выпрямитель	3,13
Активный фильтр	4,25
Схема 12-пульсного выпрямителя	6,86
Схема 6-пульсного выпрямителя	17,7

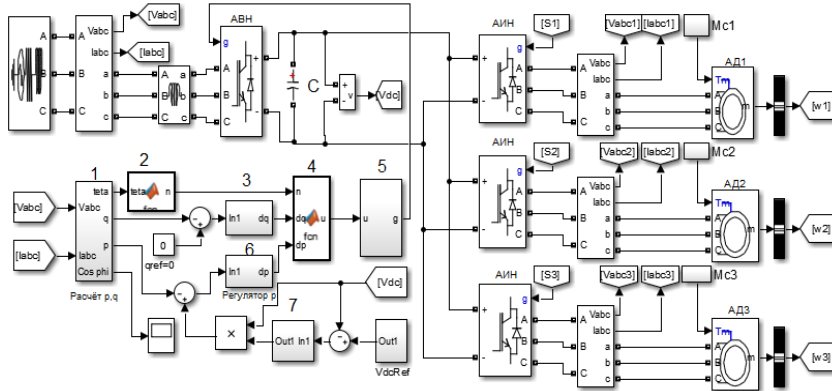
Метод управления по вектору напряжения обеспечивает высокие динамические и статические характеристики благодаря наличию внутренних контуров управления током. Следовательно, окончательная конфигурация и производительность системы во многом зависят от структуры и характеристик применяемой системы управления. Однако, в системе ЭП конвейера, включающего один активный выпрямитель и несколько инверторов, недостаток управления по отклонению тока заключается в том, что его средняя частота коммутации изменяется в зависимости от тока нагрузки, что приводит к неравномерным и случайным переключениям силовых ключей активного выпрямителя.

**В четвертой главе** разработан и исследован метод прямого управления мощностью активного выпрямителя в системе электропривода конвейера.

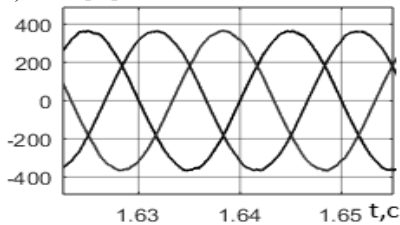
Метод управления активным выпрямителем, основанный на управлении активной и реактивной мощностями, является методом прямого управления мощностью (ПУМ). В ПУМ нет внутренних контуров управления током и блока ШИМ, потому что моменты переключения преобразователя выбираются по таблице переключения на основе мгновенных ошибок между заданными и

расчетными значениями активной и реактивной мощности. В этом случае используется таблица переключения ключей (ТПК) для выбора моментов включения силовых ключей. Используется ТПК1, чтобы оценить эффективность активного выпрямителя в системе ЭП конвейера (рисунок 6). Таблица ТПК1 приведена в приложении 1.

а)



б)  $I_{abc}$  [A]



в)  $(I_T/I_1) \times 100\%$

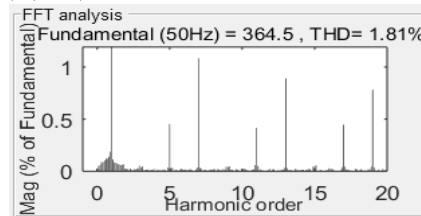


Рисунок 6. Модель системы ЭП: а – структурная схема модели с активным выпрямителем с алгоритмом прямого управления мощностью: 1 – расчёт мгновенной активной и реактивной мощности ( $p$ ,  $q$ ), 2 – выбор секторов напряжения, 3 – регулятор реактивной мощности, 4 – таблица выбора секторов напряжения, 5 – выбор сигналов управления АВН, 6 – регулятор активной мощности, 7 – регулятор постоянного напряжения; б – форма тока сети; г – график искажения тока сети

Рисунки 6 (б) и (в) показывают что, когда ЭП конвейеров работает стабильно на заданной скорости и номинальной нагрузке, ток сети близок к синусоидальной форме ( $THD_1 = 1,81\%$ ), что лучше



чем при использовании активного выпрямителя с алгоритмом векторного управления.

В системе ПУМ активного выпрямителя таблица управления сильно влияет на характеристики тока на входе выпрямителя. Коммутации силовых ключей активного выпрямителя приводит к изменению мгновенной активной и реактивной мощности непосредственно на входе. Метод ПУМ имеет частоту переключения в зависимости от величины зоны нечувствительности регулятора реактивной и активной мощности. Нулевые векторы напряжения ( $U_0(000)$  и  $U_7(111)$ ) таблицы переключения будут выбираться последовательно. Таблица ТПК1 вызывает пульсации и периодические колебания реактивной мощности, которые искажают ток на входе АВН. Одним из подходов к повышению эффективности метода ПУМ является моделирование нескольких таблиц коммутации для поиска оптимального вектора напряжения переключения, обеспечивающего наименьшее искажение тока в различных режимах работы ЭП. Соответствующие, таблицы ТПК(1 – 6) представлены на рисунках 7 и 8.

Результаты моделирования согласно таблицам ТПК(1 – 6) в системе ЭП конвейеров приведены рисунках 7 и 8.

В таблице 2 ТПК(1 – 6) - таблицы переключения ключей для различных режимов.

Таблица 2 – Результаты оценки коэффициента искажения тока сети

Методы	ТНД <sub>1</sub> (пуск)%	ТНД <sub>1</sub> (ном)%	ТНД <sub>1</sub> (тор)%
ТПК1	7,48	1,81	3,48
ТПК2	5,99	0,46	2,52
ТПК3	7,62	0,84	2,65
ТПК4	6,31	1,94	3,37
ТПК5	7,56	3,86	3,64
ТПК6	6,54	0,83	2,64
УАПВ	8,88	3,13	3,66

где УАПВ – управление активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения.

По результатам моделирования в Matlab и Simulink видно, что при использовании таблиц переключения ТПК(1 – 6), таблицы

ТПК2 обеспечивается наиболее высокое значение Км и ток сети имеет наименьшее гармоническое искажение.

Изучение таблиц переключения ключей при прямом управлении мощностью активного выпрямителя обеспечивает выбор оптимальных векторов управляющего напряжения (ТПК2). При использовании ТПК2 происходит уменьшение гармонических искажений тока в сети.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация представляет собой законченную научную работу, основанную на теоретических исследованиях и имитационном моделировании.

Основные результаты диссертации следующие:

1. Выполнен анализ и проведена оценка систем электроприводов конвейера на горнодобывающих предприятиях. Предложены варианты выбора структуры, оборудования и алгоритмов управления для системы электропривода.

2. Предложена новая структурная схема, которая представляет собой многодвигательную систему электропривода конвейера с частотным преобразователем, состоящим из активного выпрямителя и нескольких инверторов напряжения.

3. Использован алгоритм прямого управления моментом асинхронных двигателей. Результатом является обеспечение высокого качества управления скоростью и моментом с перерегулированием (не более 5%), процесс плавного пуска и плавного торможения, снижение высших гармонических составляющих тока, потребляемого источником питания. Система электропривода конвейера обеспечивает высокий уровень электромагнитной совместимости.

4. Выполнено моделирование системы многодвигательного электропривода с активным выпрямителем и алгоритмом векторного управления. Проанализированы результаты моделирования и выполнено сравнение электромагнитной совместимости систем электропривода конвейера с использованием активных выпрямителей и систем электропривода с диодными выпрямителями, такими как многоимпульсные выпрямители с

установленными активными фильтрами и реакторами на входе выпрямителя.

5. Выполнено моделирование системы многодвигательного электропривода конвейера с активным выпрямителем с алгоритмом прямого управления мощностью выпрямителя. Разработано решение выбора таблиц переключения ключей (ТПК2) для оптимизации метода прямого управления мощностью выпрямителя для обеспечения высокого коэффициента мощности и низких гармонических искажений тока сети в системе электропривода конвейеров.

6. Результаты разработок будут рекомендованы не только для транспортных систем в угольной шахте Маохе, но и для других систем электропривода на горнодобывающих предприятиях Социалистической Республики Вьетнам.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### ***Публикации в изданиях из Перечня ВАК:***

1. Васильев, Б. Ю. Косвенные системы модуляции матричных преобразователей частоты / Б. Ю. Васильев, В. Т. Ле // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – № 2. – С. 26-33.

2. Ле, В. Т. Модуляционная система управления матричным преобразователем на основе прямого метода регулирования / В. Т. Ле, Б. Ю. Васильев, Т. Н. Буй // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. – № 1. – С. 19-23.

3. Ле, В. Т. Исследование прямого управления мощностью преобразователя частоты со многими двигателями с использованием прямого управления моментом / В. Т. Ле, Ч. Т. До // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – № 2. – С. 35-44.

##### ***Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:***

4. Vasilev, B. Y. Research on the switching algorithm of voltage vectors in the direct torque control system [Текст] / B. Y. Vasilev, V. T. Le, I. Daysons. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501779 // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018.

5. Vasilev, B. Y. Research methods of V/F control for matrix converter use direct space vector modulation / B. Y. Vasilev, V. T. Le // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2019. – №. 6. – P. 5115-5124.

6. Le, V. T. Compare the efficiency of the active filter and active rectifier to reduce harmonics and compensate the reactive power in frequency controlled electric drive systems / V. T. Le, T. L. Pham, V. A. Ngo, B. Y. Vasilev. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64719-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64719-3_28) // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2021. – Vol. 178.

7. Kozyaruk, A. E. Improving the torque direct control method of the asynchronous motor in the converter using the active rectifier / A. E. Kozyaruk, V. T. Le, B. Y. Vasilev. – DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012025 // Journal of Physics: Conference Series. – 2021.

***Публикации в прочих изданиях:***

8. Ковальчук, М. С. Системы управления электроприводом: Структура, развитие / М. С. Ковальчук, А. Е. Козярук, В. Т. Ле // Сборник Трудов Конференции Международной конференции по Автоматизированному Электроприводу (АЭП). Университет ИТМО, СПб. – 04-07 октября 2020. – С. 121-126.

***Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:***

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, № 2020616020. Программа для выбора оптимального вектора управляющего напряжения в методе прямого управления мощностью и прямого управления моментом двигателя на преобразователе частоты [Текст] / Б. Ю. Васильев, В. Т. Ле, правообладатель: Санкт-Петербургский горный университет. – № 2020614438; опубл. 08.06.2020, Бюллетень № 6.

Таблица переключения ключей 1 (ТПК1)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_7$	$U_1$	$U_7$	$U_2$	$U_7$	$U_3$	$U_7$	$U_4$	$U_7$	$U_5$	$U_7$	$U_6$
	1	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$	$U_7$	$U_0$
0	0	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК1

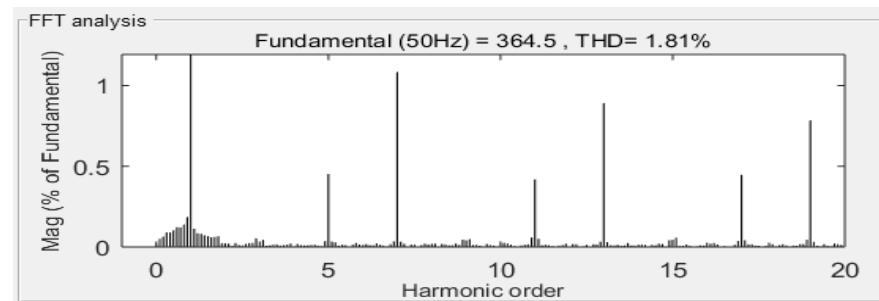


Таблица переключения ключей 2 (ТПК2)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_6$	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$
	1	$U_2$	$U_7$	$U_3$	$U_0$	$U_4$	$U_7$	$U_5$	$U_0$	$U_6$	$U_7$	$U_1$	$U_0$
0	0	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК2

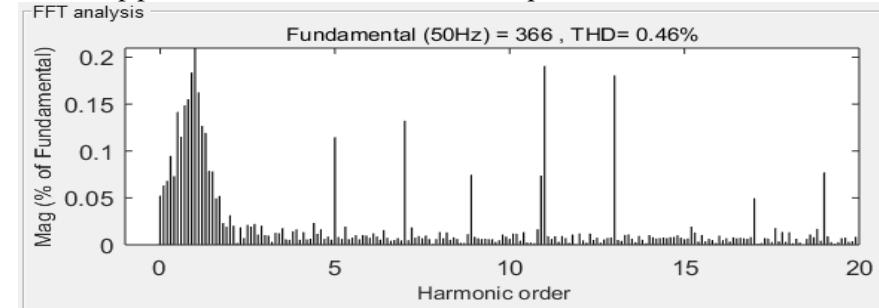


Таблица переключения ключей 3 (ТПК3)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_6$	$U_7$	$U_1$	$U_0$	$U_2$	$U_7$	$U_3$	$U_0$	$U_4$	$U_7$	$U_5$	$U_0$
	1	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$
0	0	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК3

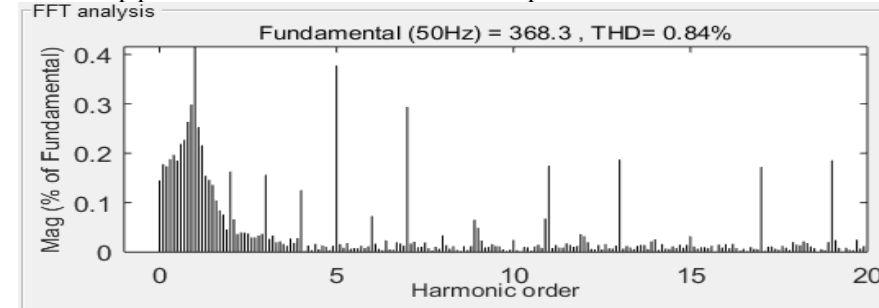


Рисунок 7 – Таблицы переключения, коэффициент искажения тока сети

Таблица переключения ключей 4 (ТПК4)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$
	1	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$
0	0	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК4

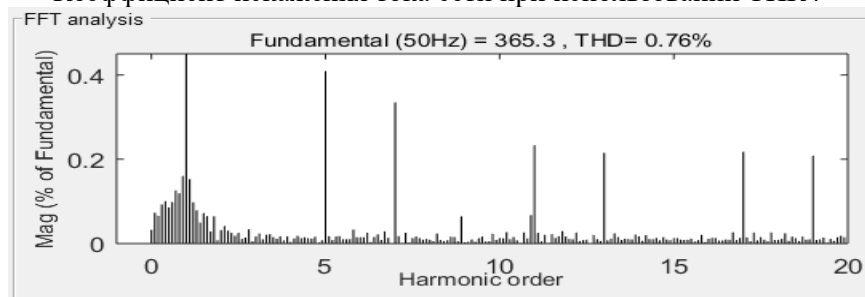


Таблица переключения ключей 5 (ТПК5)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_6$	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$
	1	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$	$U_0$	$U_7$	$U_7$	$U_0$
0	0	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК5

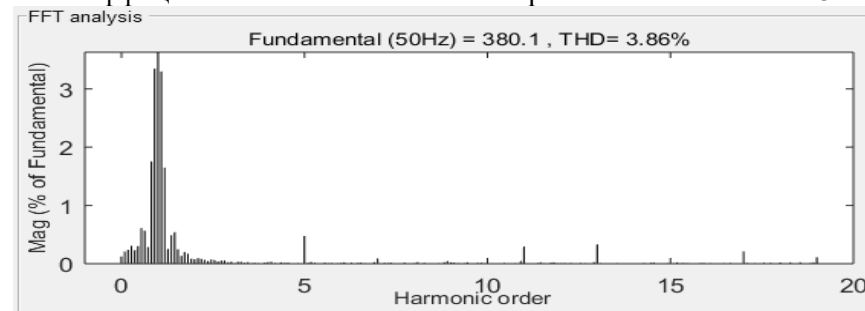


Таблица переключения ключей 6 (ТПК6)

$d_p$	$d_q$	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$
	1	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$
0	0	$U_6$	$U_1$	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$
	1	$U_1$	$U_2$	$U_2$	$U_3$	$U_3$	$U_4$	$U_4$	$U_5$	$U_5$	$U_6$	$U_6$	$U_1$

Коэффициент искажения тока сети при использовании ТПК6

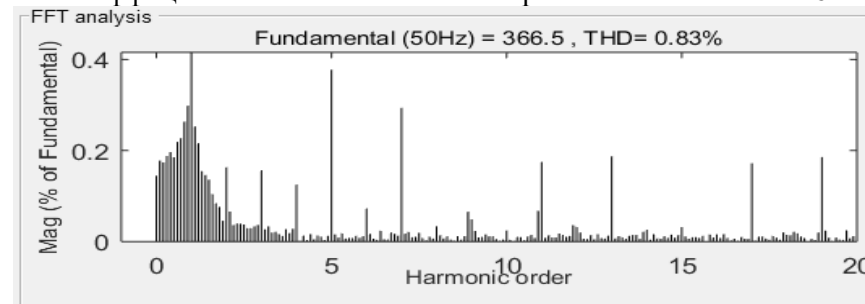


Рисунок 8 – Таблицы переключения, коэффициент искажения тока сети