

На правах рукописи



Токарев Вадим Геннадьевич

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АКТИВНЫХ СИЛОВЫХ ФИЛЬТРОВ**

Специальность 05.09.12 – Силовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Научный руководитель — доктор технических наук, доцент
Брованов Сергей Викторович

Официальные оппоненты: Панфилов Дмитрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт», академик Академии электротехнических наук РФ.

Лопаткин Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, физики, информатики АГГПУ им. В.М. Шукшина, , . .

Ведущая организация — ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», .

Защита состоится «28» декабря 2021 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 при ТУСУР по адресу : г.Томск, пр-т Ленина 40, ТУСУР, ауд. 201.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные составителем и заверенные гербовой печатью организации, просим высылать по адресу: 634050, г.Томск, пр-т Ленина 40, ТУСУР, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.268.03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу 634034, г.Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/e53k9ayv>

Автореферат разослан « » ноября 2021

Ученый секретарь
диссертационного совета

Костюченко Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Российская федерация является крупнейшим в мире производителем электроэнергии. По данным Росстата, ежегодное производство электроэнергии в России составляет более 1 триллиона киловатт-часов, однако, при этом, потери при передаче и потреблении электроэнергии оцениваются на уровне около 100 миллиардов киловатт-часов, или 10% от всей произведенной электроэнергии. Это весьма значительная цифра и она остается стабильной на протяжении ряда лет. Поэтому, в качестве мер повышения энергоэффективности систем передачи и потребления электроэнергии, в нашей стране стало уделяться внимание развитию энергосберегающих технологий. Это нашло отражение в ряде документов, утвержденных Правительством Российской Федерации, таких как «Перечень критических технологий Российской Федерации от 7 июля 2011 года», «Энергетическая стратегия России до 2035 г.» и «Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики», предусматривающих ряд мер, стимулирующих внедрение энергоэффективного электрооборудования. В этих нормативных документах энергетическая эффективность определяется как ряд характеристик, показывающих отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта. Поскольку показатели качества электроэнергии, а именно, уровень высших гармоник напряжений и токов в электросетях, тесно связаны с ее потерями при передаче и преобразовании, влияют на износ электрооборудования и, как следствие, отражаются на энергоэффективности электросетей, то внедрение устройств, позволяющих улучшить гармонический состав токов и напряжений в распределительных сетях является важной народнохозяйственной задачей.

Другой аспект заключается в том, что значительная часть потребителей работает от сетей 6-10 кВ с коэффициентом мощности 0,7 - 0,8, при этом, потребляемая мощность единицы оборудования может достигать нескольких мегаватт. Так как коэффициент мощности также является критерием энергоэффективности электрооборудования, то очевидно, что для улучшения энергоэффективности систем передачи и потребления электроэнергии, необходима установка специальных устройств – компенсаторов реактивной мощности.

До недавнего времени задачи подавления высших гармоник и компенсации реактивной мощности решались разными устройствами – пассивными фильтрами гармоник и компенсаторами реактивной мощности соответственно. В настоящее время, благодаря развитию современной элементной базы силовой электроники, появились такие устройства как активные силовые фильтры (АСФ), способные компенсировать и реактивную мощность и улучшать гармонический состав тока. Повсеместное внедрение

АСФ в состав распределительных сетей направлено на снижение потерь при передаче и преобразовании электроэнергии, а следовательно, и улучшение их энергетической эффективности.

Для работы в трехфазных сетях диапазона напряжений 6-10 кВ применяют гибридные топологии АСФ, при этом стойки преобразователей АСФ подключаются к распределительной сети в точке общего присоединения через последовательный LC фильтр, что позволяет в разы снизить напряжение в звене постоянного тока АСФ относительно сетевого напряжения, и, как следствие, использовать более распространенные и дешевые силовые модули для построения полупроводниковых преобразователей (ПП). Однако, в этом случае АСФ утрачивает возможность компенсации реактивной мощности и работа фильтра становится направленной только на подавление высших гармоник тока. Компенсировать реактивную мощность становится возможным, если реализовать трансформаторную развязку параллельного АСФ (что не является лучшим решением с точки зрения массогабаритных показателей устройства), или если построить АСФ на базе высоковольтных карбид-кремниевых силовых модулей, что приведет к его значительному удорожанию вследствие недостаточно отработанной технологии производства этих модулей. Наиболее перспективное же решение видится в применении многоуровневых ПП в составе АСФ. Это делает возможным использовать в составе АСФ полупроводниковые приборы с предельно допустимым напряжением меньшим, чем рабочее напряжение сети, и обеспечить лучшее качество компенсации высших гармоник, так как многоуровневые ПП имеют большее число ступенчатых уровней напряжения.

В таких отраслях промышленности как горнодобывающая промышленность, металлургия, машиностроение, номинальная мощность одной единицы оборудования может достигать десятков МВт, а значит, для них есть потребность в АСФ с увеличенной номинальной мощностью. Это достигается путем параллельного включения нескольких ПП в составе АСФ. Вместе с тем, параллельное включение ПП приводит к появлению циркуляционных токов, в результате чего увеличиваются потери мощности в силовых ключах ПП и снижается энергетическая эффективность самого АСФ. Основываясь на вышеизложенном, можно сделать вывод, что поиск решений по повышению номинальной мощности и снижению потерь в АСФ построенных на базе трехфазных многоуровневых ПП, включенных параллельно, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы

Большой вклад в развитие теории для АСФ внесли такие ученые как Н. Akagi, А. Nabae, V. Soares, P. Verdelho, В.П. Довгун, В.Н. Горюнов, А.Г. Лютаревич, А.В. Белоусов, О.В. Нос. Исследованием алгоритмов ШИМ для

различных топологий полупроводниковых преобразователей занимались такие отечественные и зарубежные ученые: Г.С. Зиновьев, С.А. Харитонов, С.В. Брованов, А.Г. Гарганеев, М.А. Дыбко, А.В. Кобзев, Ю.М. Казанцев, В.Е. Тонкаль, Е.Е. Чаплыгин, В.М. Михальский, К. Gopakumar, J. Pou, J.M. Guerrero, D. Boroyevich, M. Malinowski, L. G. Franquelo, D. Andler, S. Kouro, и др., тем не менее, остается немало задач в области исследований параллельной работы многоуровневых преобразователей.

Цель и задачи работы

Цель работы - улучшение энергетической эффективности активного силового фильтра, реализованного на трехфазных многоуровневых полупроводниковых преобразователях, включенных параллельно.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Показано влияние циркуляционных токов на потери мощности в силовых ключах многоуровневых полупроводниковых преобразователей, включенных параллельно для различных режимов работы.

2. Разработан алгоритм векторного широтно-импульсного управления полупроводниковыми преобразователями АСФ для снижения циркуляционных токов и улучшения качества сетевого тока

3. Разработан алгоритм управления активным силовым фильтром, улучшающий его энергетическую эффективность.

4. Разработана имитационная модель активного силового фильтра на базе трехуровневого полупроводникового преобразователя.

Научная новизна

1. Предложен алгоритм векторной ШИМ для двух трехуровневых полупроводниковых преобразователей в параллельном включении, позволяющий снизить циркуляционные токи и улучшить гармонический состав формируемого фазного тока.

2. Предложен алгоритм, повышающий эффективность компенсации параллельным активным силовым фильтром высших гармоник тока в установившемся режиме работы.

3. Разработана методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока, позволяющая проводить вычисления в реальном времени на микроконтроллерах, не имеющих аппаратной поддержки функций цифровой обработки сигналов.

Практическая значимость

Предложенные в диссертационной работе алгоритмы управления активным силовым фильтром на базе инверторов напряжения в параллельном включении, алгоритмы управления преобразователем на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения и имитационные модели использовались при выполнении научно-исследовательских, опытно-

конструкторских и технологических работ в ООО «Системы постоянного тока». Акты о внедрении результатов работы представлены в приложении к диссертации.

Методы исследования

При разработке алгоритмов управления АСФ и имитационных моделей использованы базовые принципы Теории мгновенной мощности, математический аппарат дискретного (ДПФ) и быстрого преобразования Фурье (БПФ). Расчет потерь в трехуровневом ПП проведен с использованием рекомендаций ведущего производителя силовых полупроводниковых модулей - фирмой Semikron. Моделирование и обработка результатов проводилось в среде имитационного моделирования устройств силовой электроники Psim.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм векторной ШИМ для двух трехуровневых преобразователей включенных в параллель, позволяющий снизить циркуляционные токи, протекающие между ними и улучшить гармонический состав формируемого фазного тока, полученный в результате изменения последовательности комбинаций состояний ключей, реализуемых в алгоритме.

2. Основанный на прогнозировании алгоритм, позволяющий улучшить качество компенсации высших гармоник тока активным силовым фильтром в установившемся режиме работы.

3. Методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока в трехфазной сети, обеспечивающая получение результата без использования специализированных функций цифровой обработки сигналов, применимая для вычислительной системы реального времени.

Достоверность полученных результатов

Достоверность подтверждается имитационным моделированием и данными, полученными в результате экспериментов на лабораторной установке.

Апробация работы

Основные положения научного исследования обсуждались на следующих конференциях: 17-й международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM2016, респ.Алтай), 17-й международной конференции "Электроприводы переменного тока" (ЭППТ 2018, г. Екатеринбург), 16-й

международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП 2018, г. Новосибирск).

Публикации

По теме научного исследования опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных изданиях (из перечня ВАК) - 3, один патент на полезную модель, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

Постановка цели и задач исследования осуществлялась автором лично под руководством научного руководителя Брованова С.В. Экспериментальная часть работы: изготовление экспериментальной установки, проведение экспериментов осуществлялось на базе Института силовой электроники в составе творческого коллектива кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Теоретические изыскания, моделирование, разработка алгоритмов и программного обеспечения выполнено автором лично.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 108 источников и 2 приложений. Общий объем составляет 175 страниц, 66 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, приводятся цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость работы, методы исследования и научные положения, выносимые на защиту, сведения о публикациях и личном вкладе автора в работу, апробация работы, структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена аналитическому обзору способов снижения циркуляционных токов в параллельно включенных ПП, а также вариантов исполнения АСФ. Приводятся сведения о математическом аппарате, используемом для построения систем управления АСФ.

Проведенный аналитический обзор показывает, что существует потребность в увеличении номинальной мощности АСФ. Достигается это увеличение путем параллельного включения ПП. Очевидный недостаток такого подхода – это появление циркуляционных токов, протекающих между преобразователями и негативно влияющих на КПД АСФ. Учитывая, что КПД устройства является одним из важнейших показателей его энергетической эффективности, то задача снижения циркуляционных токов является

состав фазного тока взаимосвязаны и существенно зависят от способов управления ключами. Учитывая, что векторная ШИМ позволяет гибко подходить к выбору комбинаций состояния ключей и последовательности перебора комбинаций на интервале усреднения, делается предположение о наличии возможности улучшить качество формируемого фазного тока при одновременном снижении величины циркуляционного тока методами векторной ШИМ.

$$i_u = \frac{1}{L1 + L2} \int_{t_1}^{t_2} (u_{a1} - u_{a2}) dt . \quad (1)$$

Вторая глава посвящена синтезу алгоритма векторной ШИМ для двух трехуровневых полупроводниковых преобразователей в параллельном включении, который направлен на снижение циркуляционных токов.

В качестве отправной точки, рассмотрены электромагнитные процессы для двух трехуровневых ПП в параллельном включении под управление векторной ШИМ, когда задающий вектор расположен во втором сегменте первого сектора (рисунок 2), а импульсы управления одного ПП сдвинуты относительно импульсов управления другого ПП на половину такта ШИМ - интервала усреднения T (рисунок 3). В этом случае, в формировании суммарного выходного напряжения будут участвовать следующие образующие векторы: «малый» – U_1 , «средний» – U_7 и «большой» U_{13} . При этом вектор U_1 может быть реализован двумя комбинациями ключей (1,0,0) и (0,-1,-1), в то время как каждый из векторов U_7 и U_{13} – одной.

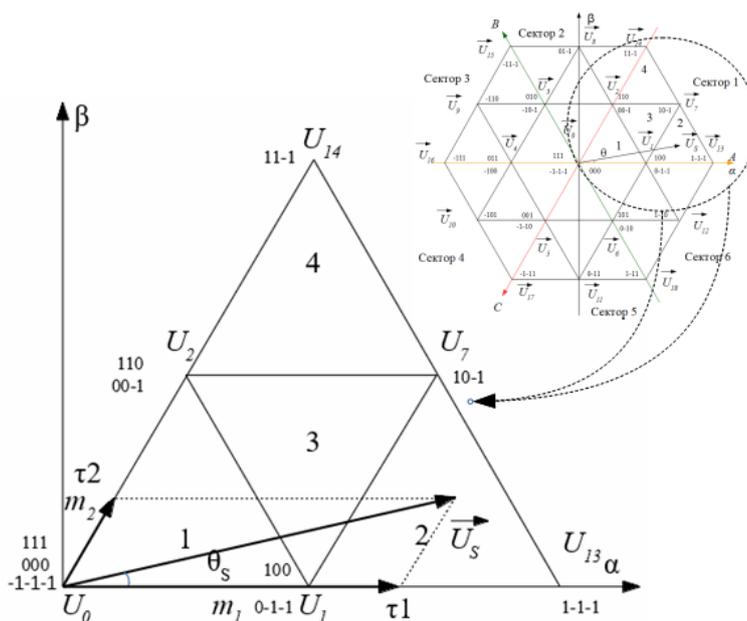


Рисунок 2 Представление задающего вектора для второго сегмента первого сектора

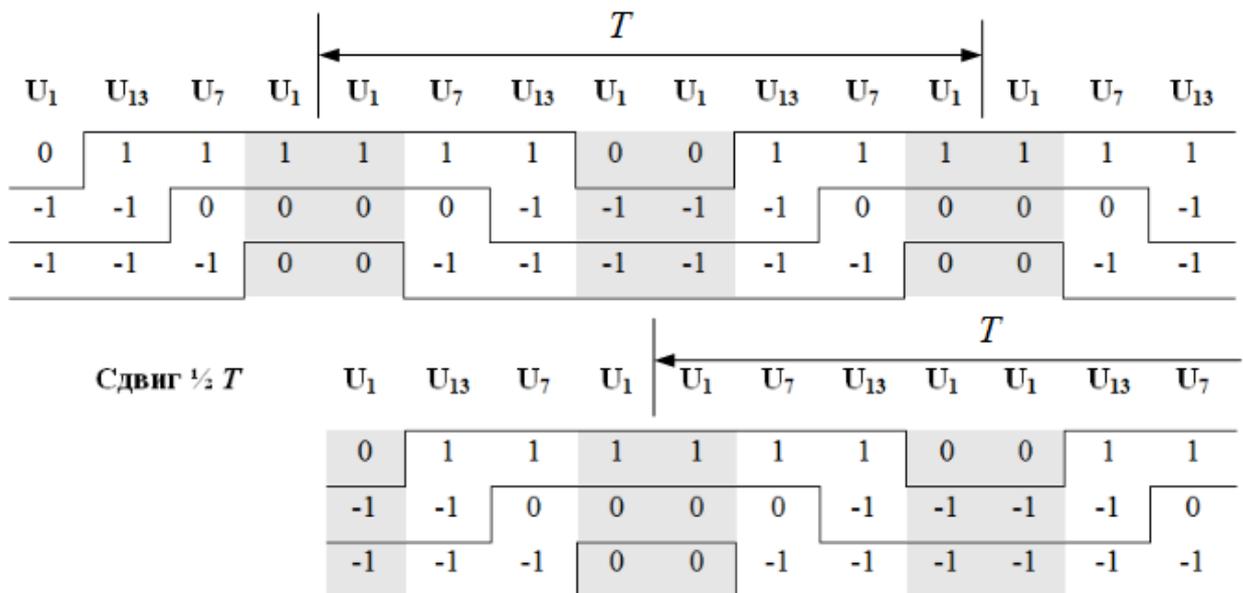


Рисунок 3 Комбинации состояний ключей для 2 сегмента сектора 1 с фазовым сдвигом на $1/2 T$

Серым цветом на рисунке отмечены одновременно реализуемые комбинации образующего вектора U_1 (1,0,0 и 0,-1,-1), формирующие одно и то же выходное напряжение. Для такого состояния ключей пути протекания токов в параллельно включенных ПП будут выглядеть так, как показано на рисунке 4а. При этом ключ первой стойки ПП1 оказывается подключен к положительной клемме звена постоянного тока, а ПП2 к средней точке звена постоянного тока, что приводит к протеканию циркуляционного тока в фазе $A - i_{ca}$. Ключи второй и третьей стойки ПП1 оказывается подключены к средней точке, а ПП2 к отрицательной клемме звена постоянного тока. Это также приводит к протеканию циркуляционных токов i_{cb} и i_{cc} в фазах B и C соответственно.

На рисунке 4б приведены контуры протекания циркуляционных токов при реализации комбинации (1,0,-1) для первого ПП и комбинации (1,-1,-1) для второго ПП. Ключи первой и третьей стойки обоих ПП оказываются подключены к одноименным клеммам звена постоянного тока. Ключи второй стойки ПП1 замыкаются на среднюю точку звена постоянного тока, а ключи ПП2 – к отрицательной клемме. Благодаря импедансам уравнительных реакторов $L_{\phi 1}$ и $L_{\phi 2}$ образуется делитель напряжения, что приводит к появлению промежуточного уровня ступенчатого напряжения $U_{dc}/4$.

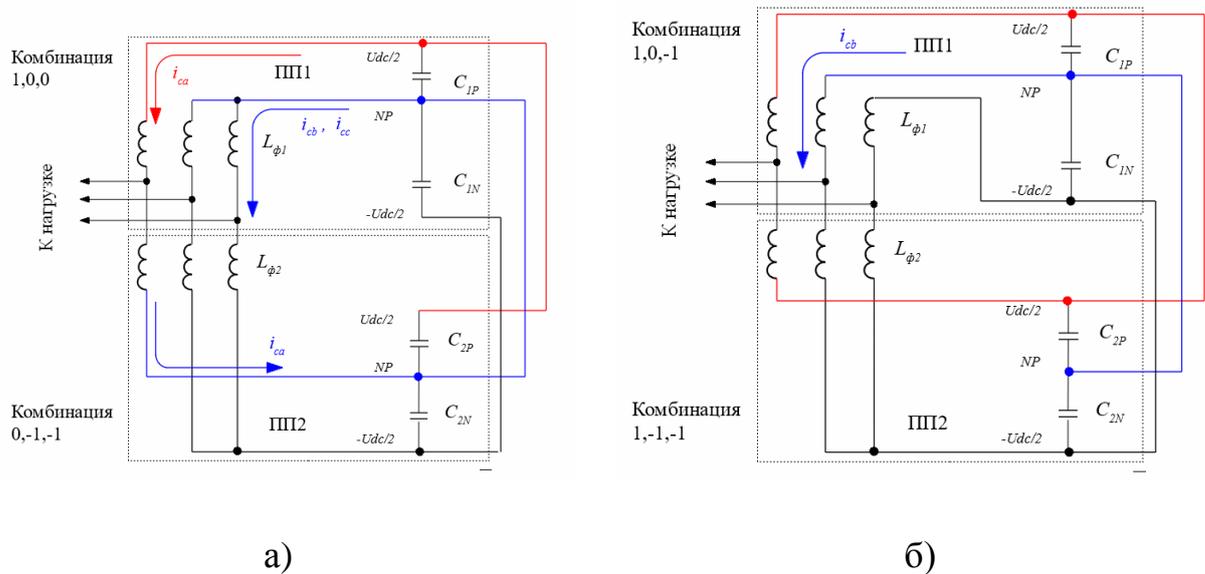


Рисунок 4 а) контуры протекания циркуляционных токов при реализации комбинации (1,0,0) для первого ПП и комбинации (0,-1,-1) для второго ПП, б) при реализации комбинации (1,0,-1) для первого ПП и комбинации (1,-1,-1) для второго ПП

Очевидно, что комбинации, показанные на рисунке 4а, которые вносят вклад в появление циркуляционных токов, но не приводят к появлению дополнительного ступенчатого уровня являются нежелательными, а такие комбинации как на рисунке 4б – желательными. Руководствуясь этим принципом предложена последовательность комбинаций ключей для рассмотренного сегмента (рисунок 5) а также и для других сегментов.

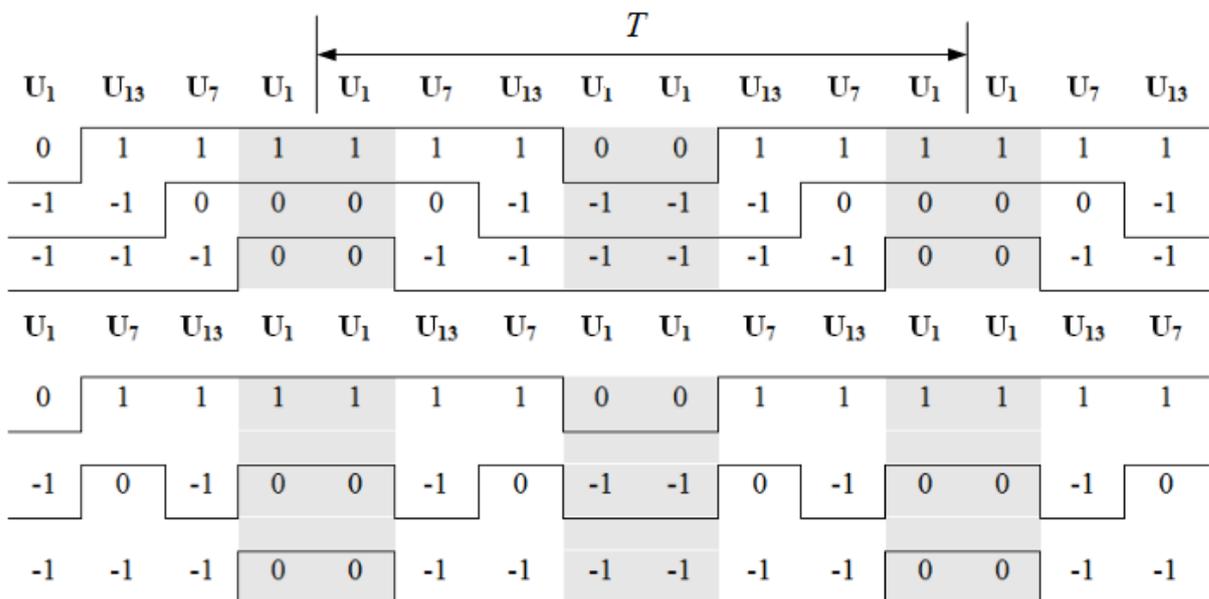


Рисунок 5 Предложенная последовательность КСК для 2 сегмента сектора 1

В третьей главе предложен алгоритм, улучшающий качество компенсации высших гармоник тока параллельным активным силовым фильтром.

Для нивелирования запаздывания сигналов в системе управления АСФ и влияния индуктивности уравнительных ректоров на форму тока компенсации (рисунок 6), предложен основанный на прогнозировании алгоритм, который предполагает накопление отсчетов мгновенных значений тока нагрузки по осям d и q за полный период основной гармоники питающей сети в виде массива данных, построенного по принципу двусвязного циклического списка. Значение тока компенсации в текущий момент времени $t(n+1)$, вычисляется исходя из значения, сохраненного в массиве данных периодом ранее $t(n-(k-2))$; где n – номер отсчета в периоде, k – число отсчетов за полный период первой гармоники. Так как на такте ШИМ можно производить несколько измерений мгновенных значений токов, то, просматривая массив сохраненных значений в прямом направлении, можно спрогнозировать ток компенсации, обеспечивающий наименьший коэффициент гармоник сетевого тока, при этом, вычисление среднего значения активной компоненты тока нагрузки производится способом «плавающего среднего» (*Floating Average*) согласно выражению:

$$\bar{i}_d(n) = \frac{1}{k} \sum_{n-(k-1)}^n i_d(n) = \frac{1}{k} [i_{dsum}(n-1) - i_d(n-k) + i_d(n)]; \quad (2)$$

где i_{dsum} – текущая сумма всех элементов в массиве, $i_d(n-k)$ – значение покидающее массив, $i_d(n)$ – значение, помещаемое в массив, как показано на рисунке 7.

Недостатком данного метода является фиксированный интервал упреждения, равный удвоенному шагу дискретизации, учитывающий только временную задержку в системе управления АСФ. При этом характер нагрузки также влияет на качество компенсации высших гармоник. Таким образом, в процессе работы АСФ необходимо отслеживать качество компенсации высших гармоник тока для динамической подстройки интервала упреждения под характер нагрузки.

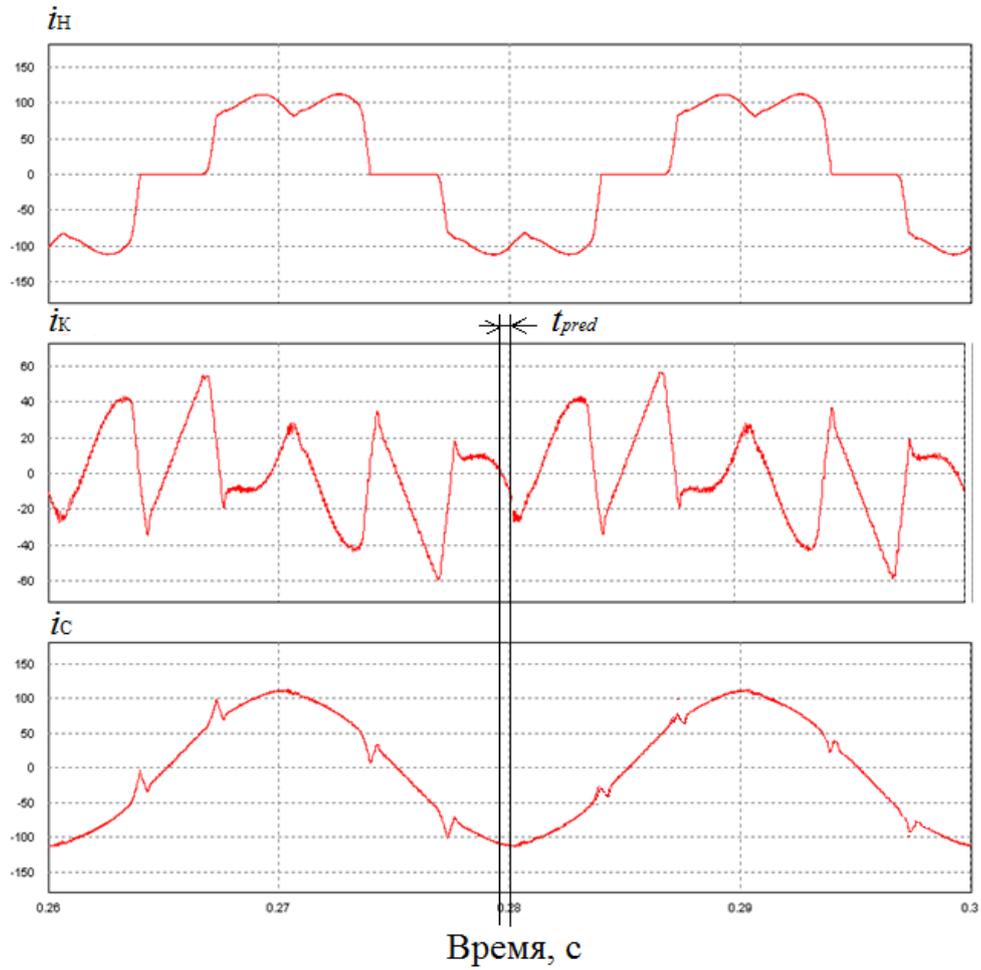


Рисунок 6. Формирование тока компенсации с некоторым упреждением t_{pred} относительно тока нагрузки

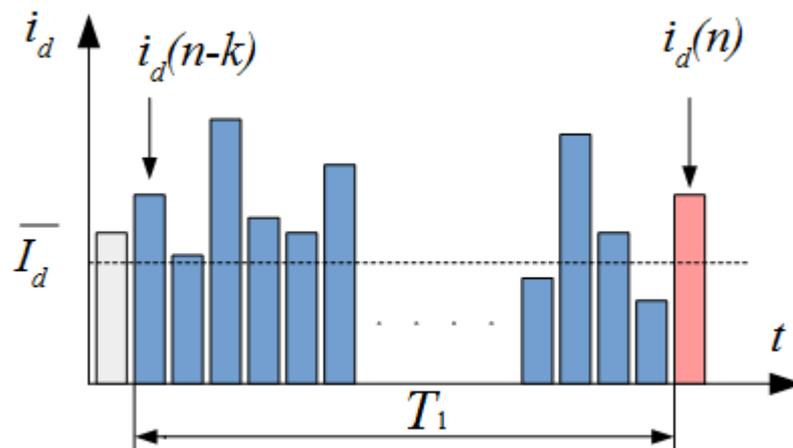


Рисунок 7 – Вычисление среднего значения массива накопленных данных.

Также в главе предложена методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока, предназначенная для системы управления активным силовым фильтром.

В общем случае, коэффициент гармоник тока определяется как отношение среднеквадратического значения амплитуд высших гармоник к среднеквадратическому значению первой гармоники

$$K_{ГТ} = \sqrt{\sum_{n=2}^m \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}, \quad (3)$$

где I_1 – амплитуда первой гармоники, I_n – амплитуда n -й гармоники, m – максимальный номер гармоники

Основываясь на аналогии математического аппарата дискретного преобразования Фурье с преобразованиями перехода к синхронной вращающейся системе координат в дискретном виде делается заключение, что в дискретной системе для синхронной вращающейся dq системы координат синхронизированной по первой гармонике при наличии массива мгновенных значений тока сети размером в N элементов, среднее значение по каждой координате будет эквивалентно амплитуде первой гармоники:

$$I_1 = \sqrt{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2}, \quad (4)$$

а отклонение от среднего значения следует рассматривать как наличие высших гармоник. В итоге, $K_{ГТ}$ предложено вычислять как среднеквадратичные отклонения от среднего значения фазного тока по каждой из dq координат:

$$K_{ГТ} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum_{k=1}^N (i_{dk} - \bar{I}_d)^2}{N}\right) + \left(\frac{\sum_{k=1}^N (i_{qk} - \bar{I}_q)^2}{N}\right)}{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2}}. \quad (5)$$

Последовательность операций алгоритма на основе предложенной методики для вычисления $K_{ГТ}$ следующая: первая операция – вычисление средних значений обобщенного тока сети в dq координатах, как и последующая – вычисление квадратов среднеквадратического отклонения выполняется способом "плавающего среднего" (2). Это позволяет сэкономить вычислительные ресурсы, а также иметь актуальный $K_{ГТ}$ после каждого внесения мгновенных значений тока сети в выборку, при этом, результат будет достоверным только после полного заполнения выборки измеренными

значениям на периоде основной гармонике. Затем производится вычисление $K_{ГТ}$ по формуле (5).

Далее в главе приводится сравнение машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ по алгоритму быстрого преобразования Фурье на процессоре ARM архитектуры с поддержкой функций цифровой обработки сигналов и по алгоритму на основе предложенной методике (таблица 1).

Таблица 1

Затраты машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ по алгоритму быстрого преобразования Фурье (числитель) и алгоритму по предложенной методике (знаменатель)

	Размер входного массива данных, точек		
	64	256	1024
Суммарное время вычисления, мкс	78/ 38	417/ 181	1935/ 652
Требуемый размер оперативной памяти, байт	768/ 656	3072/ 3088	12288/ 12304

Из приведенного сравнения очевидно, что вычисление по предложенному алгоритму выполняется значительно быстрее, чем вычисление по алгоритму быстрого преобразования Фурье, при сопоставимых потребностях в оперативной памяти, но при этом нет необходимости использовать функции цифровой обработки сигналов.

Будучи встроенным в систему управления АСФ, предложенный алгоритм позволяет иметь объективную информацию о коэффициенте гармоник фазного тока в процессе работы фильтра, тем самым отслеживать качество компенсации высших гармоник тока. Это дает возможность системе управления АСФ автоматически выбирать наиболее подходящий режим компенсации высших гармоник тока.

Также в главе проанализированы условия, при которых происходит срыв синхронизации параллельного АСФ с питающей сетью в процессе его работы и предложено решение, которое заключается в подавлении помех в сигналах, снимаемых с датчиков напряжений с помощью цифровых полосовых фильтров.

Четвертая глава содержит данные имитационного моделирования предложенных в ходе исследования алгоритмов и экспериментально полученных данные, подтверждающие их эффективность.

С целью верификации предложенного в Главе 2 алгоритма, было выполнено имитационное моделирование в среде *Power Sim* версии 9.1. Исследуемая модель представляла собой два трехфазных трехуровневых ПП, имеющих общее звено постоянного тока. Через уравнивательные реакторы L_1 и L_2 фаз a, b и c , оба ПП подключены к нагрузке R_H . Упрощенная блок-схема исследуемой модели показана на рисунке 8.

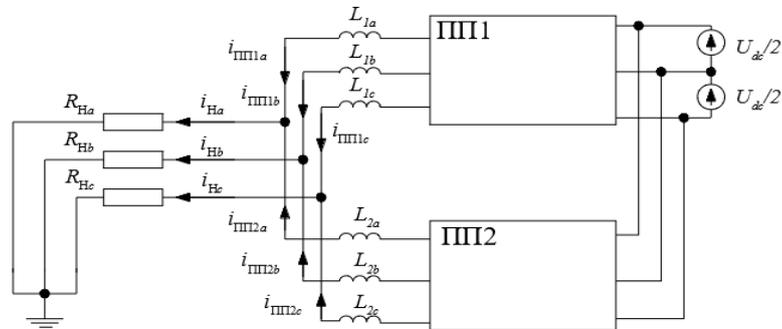


Рисунок 8 Имитационная модель из двух трехуровневых полупроводниковых преобразователей в параллельном включении

Как показало моделирование, применение предложенного в Главе 2 алгоритма векторной ШИМ, обозначенного на графиках как ВШИМ2 позволило, в среднем, снизить циркуляционные токи при параллельном включении двух трехфазных трехуровневых ПП в три раза, по сравнению с исходным алгоритмом, обозначенном как ВШИМ1, с фазовым сдвигом импульсов управления ключами одного ПП относительно другого на $1/2 T_{ШИМ}$, при этом оба упомянутых алгоритма обеспечивают снижение коэффициента гармоник формируемого фазного тока на соизмеримую, по сравнению с ВШИМ1 без фазового сдвига импульсов управления ключами одного ПП относительно другого, величину.

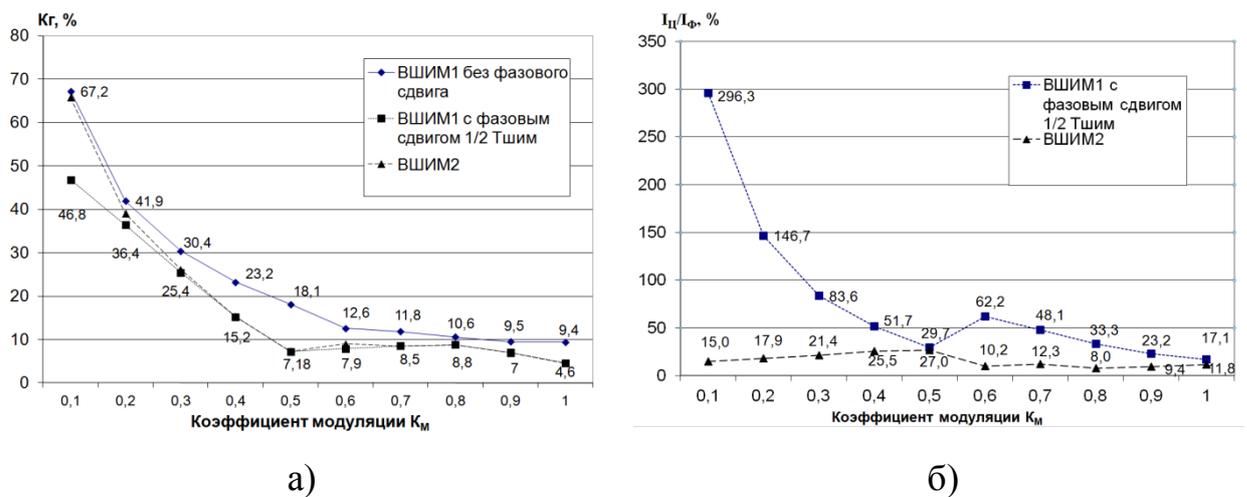


Рисунок 9 а) Коэффициент гармоник тока фазы a , в зависимости от коэффициента модуляции K_M б) Действующее значение циркуляционного тока фазы a в %, по отношению к действующему значению фазного тока

В процессе проведения исследования, в среде имитационного моделирования *Psim* была разработана модель АСФ на базе трехфазного трехуровневого ПП, блок-схема модели представлена на рисунке 10. В модели реализованы: имитация работы дискретной системы управления, формирование управляющих импульсов с заданной паузой неперекрывтия (*Dead Time*), синхронизация с трехфазной питающей сетью (блок ФАПЧ).

На данной модели проверялась эффективность основанного на прогнозировании алгоритма, рассмотренного ранее в Главе 3. Диаграммы, полученные в результате моделирования при работе АСФ с отключенным и включенным режимом прогнозирования представлены на рисунках 11 а) и 11 б) соответственно.

Проведенный анализ диаграмм свидетельствует о снижении коэффициента гармоник фазного тока с 22% до 18% при включенном режиме прогнозирования. При этом коэффициент гармоник тока нагрузки составлял 29%.

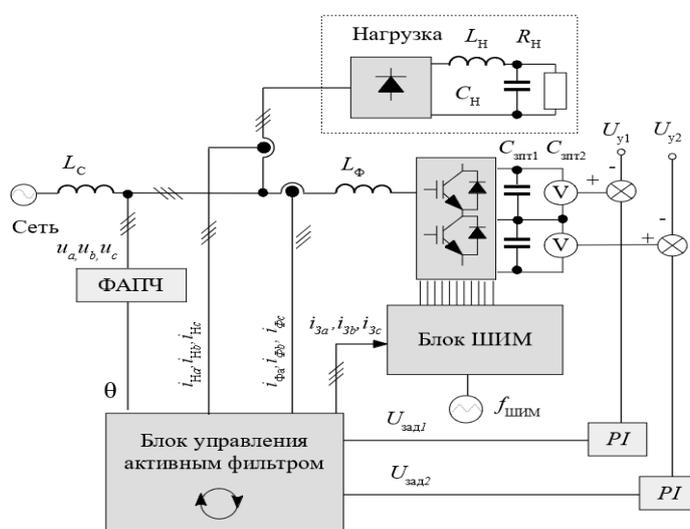


Рисунок 10 – блок-схема имитационной модели АСФ

Таблица 2

Параметры имитационной модели АСФ

Линейное действующее входное напряжение U_c	45 В
Частота входного напряжения	50 Гц
Индуктивность входной линии L_c	0,45 мГн
Индуктивность уравнивающего реактора фильтра L_Φ	1,4 мГн
Емкость накопительных конденсаторов звена постоянного тока $C_{зпт1}$ и $C_{зпт2}$	1500 мкФ
Напряжение на конденсаторах звена постоянного тока $U_{зпт1} + U_{зпт2}$	250 В
Индуктивность в составе нелинейной нагрузки L_H	0,5 мГн
Емкость в составе нелинейной нагрузки C_H	2 мкФ
Сопротивление в составе нелинейной нагрузки R_H	11,5 Ом
Частота задающего генератора ШИМ $f_{ШИМ}$	10,5 кГц
Величина паузы неперекрывтия (<i>DeadTime</i>)	5 мкс
Интервал дискретизации, t_s	95,24 мкс
Число элементов буфера, k	204

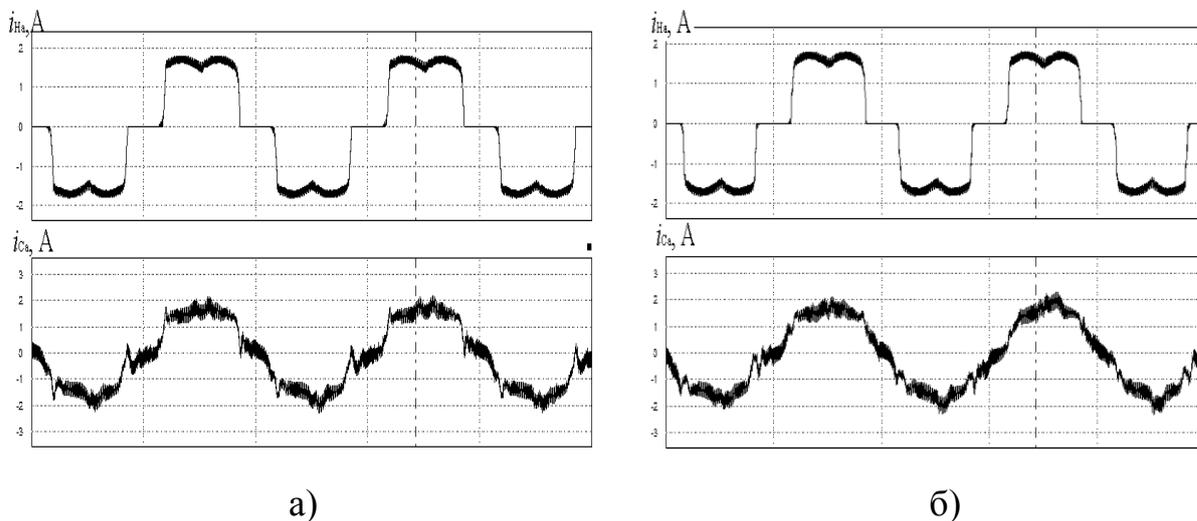


Рисунок 11 – Диаграммы токов нагрузки i_{Na} и сети i_{Ca} при работе АСФ с отключенным режимом прогнозирования а) и включенным б)

Для верификации предложенных в Главе 3 алгоритмов, была разработана экспериментальная установка на базе трехфазных трехуровневых ПП. Силовая часть выполнена на специализированных модулях *SEMIKRON SK30MLI066* с драйверами *SEMIKRON SKHI22BH4R*. Система управления (СУ) для реализации алгоритмов выполнена в виде сменных модулей. Для реализации алгоритмов скалярной ШИМ использовался модуль, собранный на отечественном микроконтроллере производства АО "ПКК Миландр" 1986BE1TK. В качестве нелинейной нагрузки использовался полупроводниковый выпрямитель *SEMIKRON SKD30/12A1*, нагруженный на реостат. Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 12.



Рисунок 12 – Экспериментальная установка АСФ. Общий вид

В ходе проведения экспериментов, алгоритм работы АСФ был реализован на микроконтроллере производства АО "ПКК Миландр", эюры токов нагрузки и сети снимались токовым пробником PA-622 с соответствующих зажимов фазы А с помощью цифрового четырехканального осциллографа АКИП 4126/3А. Полученные осциллограммы токов нагрузки и сети, снятые при отключенном и включенном режиме компенсации гармонических составляющих тока отражены на рисунках 13 а) и 13 б) соответственно, а осциллограммы токов сети, снятые при работе АСФ с отключенным и включенным режимом прогнозирования – на рисунках 14 а) и 14 б).

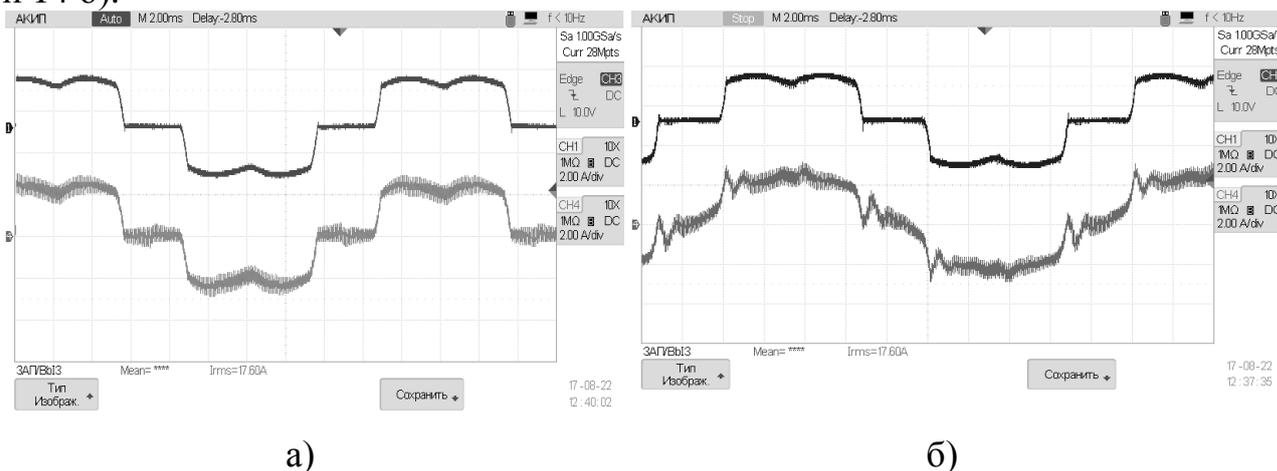


Рисунок 13 – Осциллограммы токов нагрузки (темная линия) и сети (светлая линия), снятые при отключенном режиме компенсации гармонических составляющих тока а) и включенном б).

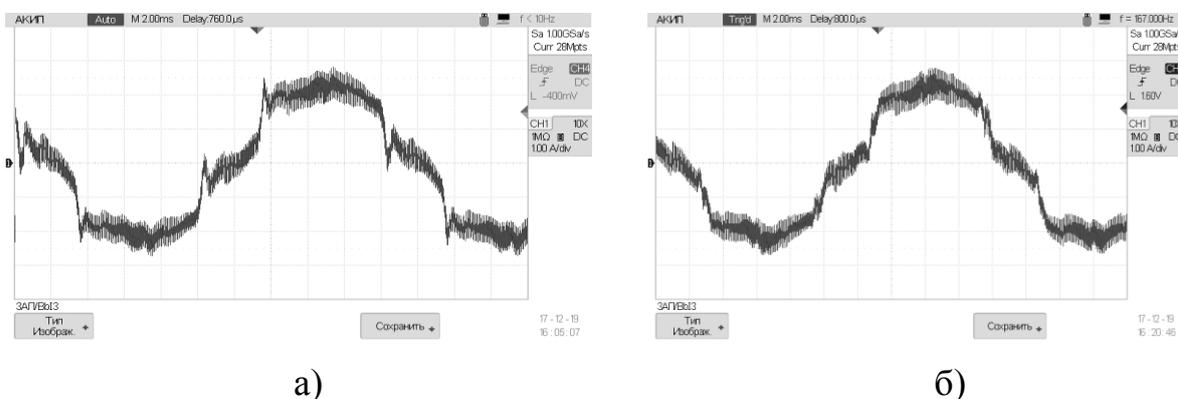


Рисунок 14 – Осциллограммы токов сети, снятые при работе АСФ с отключенным режимом прогнозирования а) и включенным б).

Из проведенного анализа представленных на рисунках 13 и 14 осциллограмм следует, что коэффициент гармоник фазного тока при включении предложенного режима прогнозирования снижается с 23% до 19%, при коэффициенте гармоник тока нагрузки 29%. Полученный экспериментальный результат соответствует результату имитационного моделирования АСФ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана имитационная модель активного силового фильтра на базе трехуровневого полупроводникового преобразователя, позволяющая моделировать работу фильтра с дискретной системой управления с учетом реальных параметров силовых элементов и пауз неперекрытия («мертвого» времени). Сравнение результатов моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований показало расхождение в пределах 5%, что свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели.

2. Показана взаимосвязь величины циркуляционного тока от вида комбинаций состояний ключей реализуемых в алгоритме векторной ШИМ в двух включенных параллельно трехуровневых полупроводниковых преобразователях под управлением векторной ШИМ. На основе выявленной взаимосвязи разработан алгоритм векторной ШИМ, который позволяет снизить циркуляционный ток и улучшить качество формируемого фазного тока.

3. Имитационное моделирование показало, что применение предложенного алгоритма векторной ШИМ позволяет снизить циркуляционные токи в три раза и улучшить коэффициент гармоник формируемого фазного тока на 2 – 7%.

4. Предложен основанный на прогнозировании алгоритм, позволяющий улучшить качество компенсации высших гармоник тока активным силовым фильтром в установившемся режиме. По результатам имитационного моделирования и эксперимента показано, что применение основанного на прогнозировании алгоритма в системе управления активным силовым фильтром позволяет улучшить качество компенсации высших гармоник тока, что выражается в снижении коэффициента гармоник тока сети на 4%.

5. Разработана методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока, позволяющая проводить вычисления в реальном времени на микроконтроллерах, не имеющих аппаратной поддержки функций цифровой обработки сигналов. Затраты времени на вычисление коэффициента гармоник по предложенной методике в два раза меньше чем с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, при близких затратах оперативной памяти.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях из Перечня ВАК

1. **Токарев, В.Г.** Векторная ШИМ для снижения циркуляционных токов в параллельно включенных трехуровневых преобразователях / В.Г. Токарев, С.В. Брованов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2020. – Т. 20, № 1. – С. 94–104. - DOI: DOI:10.14529/power200111.
2. **Токарев, В.Г.** Методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока в трехфазной сети / В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 116–121. DOI: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-116-121.
3. **Токарев В. Г.** Улучшение синхронизации параллельного активного силового фильтра с питающей сетью / В.Г. Токарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 101–108. – DOI: 10.14529/power180411.

Статья в научном издании, индексируемом в SCOPUS

4. Improving the active power filter performance with a prediction-based control method / **V. G. Tokarev**, S. V. Brovanov, A. A. Yakimenko, A. V. Sidorenko, D. Solovev // The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016 : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – P. 577-582. - ISBN 978-5-94301-628-8 . - DOI: 10.1109/EDM.2016.7538802. (SCOPUS)

Патенты и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

5. Трехфазный активный силовой фильтр: п.м. RU175601U1 Российская Федерация : МПК H02J 3/26 / **В.Г. Токарев**, С.В. Брованов, В.А. Колесников, Д.Г. Метальников; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Системы Постоянного Тока" .- №2017108954; заяв. 17.03.2017; опубл. 12.12.2017; Бюл. № 35
6. Программа оценки ожидаемого тока нагрузки через заданный интервал времени для системы управления активным силовым фильтром: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016618931 /**В.Г.Токарев**, С.В.Брованов; Заявитель и правообладатель ФГБУ ВО Новосибирский государственный технический университет. -№2016661505, заяв. 19.08.2016; зарег. 20.11.2016.
7. Программа управления активным силовым фильтром на базе параллельных инверторов напряжения: свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ 2017618611 / М.А.Дыбко, С.В. Брованов, **В.Г. Токарев**, А.С. Семягин; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Системы Постоянного Тока" .- №2017615407; заяв. 06.06.2017; зарег. 04.08.2017.

8. Программа управления активным силовым фильтром на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017619343/ М.А.Дыбко, С.В. Брованов, **В.Г. Токарев**, Д.В. Панфилов; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Системы Постоянного Тока" .- №2017614431; заяв. 15.05.2017; зарег. 24.08.2017

Другие публикации

9. Имитационная и экспериментальная верификация прогнозирующего алгоритма управления активным силовым фильтром / **В.Г. Токарев**, С.В. Брованов, М. А. Дыбко, А. В. Удовиченко // Труды международной семнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», [г. Екатеринбург], 26-30 марта 2018 г. — Екатеринбург : [УрФУ], 2018. — С. 28-33.
10. Оценка энергетической эффективности активных силовых фильтров на базе параллельных многоуровневых преобразователей / М.А. Дыбко, **В.Г. Токарев**, С.В. Брованов, С.А. Харитонов // Труды 16-й международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения " г. Новосибирск 2-6 октября 2018 г.