

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18287691>

Эгамбердиев Б.Э., Холов О.Т, Мухаммедов Б.М.

Институт военной авиации Республики Узбекистан,

e-mail: bahrom_prof@mail.ru

Аннотация

В данной статье представлен новый подход к проектированию и реализации этапа развязки между силовыми и управляющими цепями трехфазного выпрямителя, который управляет методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Схема разработана с использованием 3 микросхем TCA785 и оптопары MOC3021 для каждого импульсного сигнала, генерируемого управляющей схемой. В статье также представлены детализированные схемы как для управляющих, так и для силовых цепей, а также осциллограммы напряжения, полученные на выходе реализованного трехфазного преобразователя. Экспериментальные результаты подтверждают корректную работу предложенной конфигурации и стабильность работы преобразователя.

Ключевые слова

преобразователь частоты, синхронный двигатель, тиристорный инвертор, микросхема TCA785, широтно-импульсная модуляция, функциональная схема, принципиальная схема, моделирование Proteus, управление электроприводом, трансформатор гальванической развязки.

Введение

В настоящее время существует большое количество теоретических и практических решений по реализации преобразователей частоты (ПЧ), что подтверждается широким спектром схем, опубликованных в научной литературе, патентах и инженерных справочниках. Однако при этом крайне редко встречаются примеры, в которых схемы преобразователей не только моделируются, но и полностью реализуются в виде действующего устройства, собранного из доступных радиоэлементов. Особенно это актуально при разработке преобразователей для мощных электроприводов, где высокая

стоимость промышленных ПЧ делает актуальной задачу их самостоятельного проектирования и сборки [1].

В рамках данной работы разработаны как **функциональная**, так и **принципиальная электрическая схема** преобразователя частоты, предназначенного для управления синхронным электродвигателем мощностью 30 кВт, установленным в составе аэродинамической трубы. Проект реализован на базе имеющейся элементной базы с применением силовых тиристоров в качестве основных коммутирующих элементов. Все схемные решения были предварительно промоделированы в программной среде **Proteus**, что позволило провести проверку работоспособности, логики управления и параметров сигнала на этапе проектирования. После успешной верификации схемы была собрана физическая модель устройства, подтверждающая возможность практической реализации разработанного решения [2-6].

Целью данной работы является разработка и реализация системы управления преобразователем частоты, обеспечивающей надёжный пуск и устойчивую работу синхронного электродвигателя в составе экспериментальной установки, с использованием доступных радиоэлементов и с упором на экономичность, воспроизводимость и простоту настройки.

Ключевой особенностью предложенной системы является использование специализированной микросхемы **TCA785** в качестве управляющего элемента. Эта микросхема предназначена для формирования фазоуправляемых импульсов и управления симметричными и несимметричными нагрузками на основе тиристоров. Основными функциями TCA785 являются формирование управляющих импульсов с регулируемым углом сдвига, синхронизация с сетевым напряжением (через схему обнаружения нуля), а также устойчивое и надёжное управление коммутацией в условиях переменного напряжения. Благодаря высокой степени интеграции и наличию встроенных защитных и синхронизирующих функций, TCA785 обеспечивает стабильную работу схемы и позволяет избежать применения сложных дискретных узлов управления [7].

Для повышения надёжности и электробезопасности в схеме использованы понижающие и развязывающие трансформаторы, установленные перед подачей напряжения на силовую часть преобразователя. Их применение обусловлено несколькими критически важными факторами:

Гальваническая развязка между цепями управления и силовыми элементами обеспечивает защиту управляющей логики от высоковольтных и переходных процессов в силовой части;

Формирование необходимых уровней напряжения, соответствующих рабочим параметрам тиристоров, позволяет оптимизировать условия коммутации и снизить тепловые нагрузки на силовые компоненты;

Распределение и симметризация фазных напряжений способствует корректной работе шести тиристоров, и обеспечивает равномерную нагрузку на каждую фазу;

Снижение электромагнитных помех и фильтрация высокочастотных составляющих, возникающих при переключении тиристоров.

Таким образом, разработанная система управления ПЧ сочетает в себе доступность, функциональность и надёжность. Она ориентирована на использование в экспериментальных и лабораторных установках, где важна возможность гибкой настройки параметров, а также в условиях ограниченного бюджета, что делает её практической альтернативой дорогостоящим промышленным решениям.

Анализ существующих преобразователей частоты и обоснование выбора схемы

В настоящее время существует большое разнообразие преобразователей частоты (ПЧ), отличающихся как по применяемым схемным решениям, так и по элементной базе. Наиболее широко распространённой является схема двойного преобразования, включающая в себя выпрямитель, фильтрующее звено постоянного тока и автономный инвертор. Каждое из этих звеньев может реализовываться с использованием различных типов силовых компонентов: тиристоров, IGBT-транзисторов, MOSFET и даже широкозонных полупроводников (SiC, GaN) [8-9].

Преобразователи на тиристорах (SCR) традиционно применяются в мощных промышленных установках, где важны надёжность и способность работать при высоких токах и напряжениях. Основные достоинства тиристорных схем – простота, доступность компонентов, высокая перегрузочная способность, малое количество активных управляющих элементов. К недостаткам можно отнести сравнительно низкую частоту переключения, необходимость в фазовом управлении, ограниченные возможности по формированию синусоидального выходного напряжения и, как следствие, повышенное содержание гармоник.

Преобразователи с инверторами на IGBT-транзисторах обладают более высокой частотой переключения и лучшей формой выходного напряжения. Благодаря применению широтно-импульсной модуляции (ШИМ), становится возможным точное регулирование амплитуды и частоты выходного сигнала, что особенно важно для приводных систем с высокими требованиями к качеству тока. Однако такие преобразователи требуют более сложных схем управления, драйверов, защит, а также обеспечивают менее устойчивую работу при аварийных ситуациях, особенно в условиях нестабильной питающей сети.

Следует также отметить, что большинство известных решений остаются на уровне теоретических разработок или программного моделирования. Полностью законченные, практически реализованные проекты встречаются сравнительно редко, особенно в условиях ограниченного бюджета и использования только доступных компонентов. В этом контексте представляет интерес разработанная в рамках данной работы схема тиристорного преобразователя частоты, спроектированная, смоделированная и изготовленная для реального запуска синхронного электродвигателя мощностью 30 кВт.

Разработанная схема включает в себя следующие узлы: входной выпрямитель, фильтр на базе индуктивности и ёмкости, тиристорный инвертор, систему фазового управления на базе микросхемы TCA785, а также развязывающий трансформатор. Применение трансформатора позволяет обеспечить гальваническую развязку цепей управления и силовой части, а также повысить электробезопасность и улучшить устойчивость схемы к помехам. Управление тиристорами реализовано с помощью фазового регулирования, что позволило отказаться от сложных ШИМ-контроллеров, сохранив при этом возможность регулировки выходного напряжения и частоты.

Преимущество данной схемы заключается в том, что она полностью воспроизводима в условиях ограниченного доступа к специализированной элементной базе. Использование микросхемы TCA785 позволило реализовать компактное и надёжное фазовое управление с точной синхронизацией, а моделирование в Proteus дало возможность предварительно оценить форму выходного тока, характер коммутации тиристоров и переходные процессы при пуске.

Таким образом, по результатам проведённого анализа можно сделать вывод, что выбранное техническое решение представляет собой компромисс

между простотой реализации, надёжностью и функциональностью. В отличие от сложных коммерческих инверторов на базе IGBT, данная схема доступна для самостоятельного повторения, что делает её актуальной для лабораторных установок, учебных стендов и опытных промышленных применений. Кроме того, благодаря полной цепочке от проектирования до практической сборки, подтверждена не только теоретическая состоятельность схемы, но и её практическая реализуемость.

Методика эксперимента

Проектирование функциональной схемы и описание принципа работы

На первом этапе реализации проекта была разработана функциональная схема преобразователя частоты (Рис.1.), предназначенного для запуска и управления синхронным электродвигателем мощностью 30 кВт, установленным в составе аэродинамической трубы. Конструкция схемы ориентирована на использование доступной элементной базы, включая силовые тиристоры и специализированные микросхемы управления.

Трёхфазный выпрямительный блок предназначен для преобразования переменного напряжения сети 380 В, 50 Гц в постоянное напряжение. Полученное постоянное напряжение подаётся на вход инвертора. Использование выпрямителя позволяет отделить управление от нестабильных параметров питающей сети и создать устойчивую постоянную шину напряжения, необходимую для дальнейшего формирования регулируемого переменного сигнала.

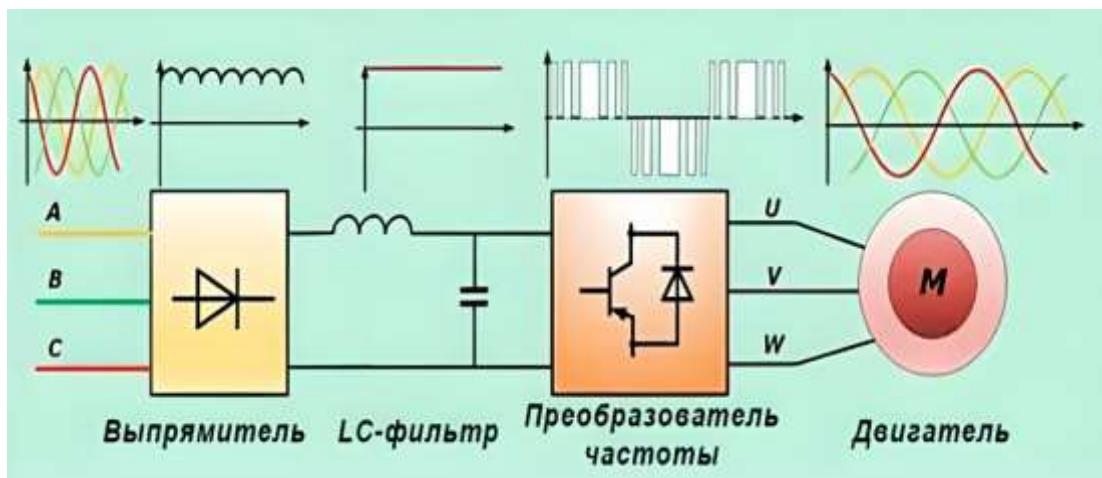


Рис.1 Функциональная схема схема частотного преобразователя

Центральным элементом схемы управления является специализированная микросхема TCA785, предназначенная для управления тиристорами методом фазового регулирования. Микросхема формирует управляющие импульсы с регулируемым углом задержки относительно нулевого перехода сетевого напряжения. Это позволяет реализовать точное управление моментом включения силовых ключей, снижать пусковые токи и управлять выходным напряжением.

Преобразователь частоты который включает себе драйвера и инвертора.

Драйвер служит для согласования уровней сигналов между логической схемой управления и силовой частью. Он обеспечивает гальваническую развязку, усиление по току и напряжению, а также формирует необходимые фронты управляющих импульсов для надёжного открывания тиристоров. Это особенно важно при коммутации высоковольтных цепей, где требуется устойчивое срабатывание силовых ключей при наличии электромагнитных помех.

Инвертор собран из шести тиристоров и предназначен для преобразования постоянного напряжения в трёхфазное переменное напряжение регулируемой частоты. Управление тиристорами осуществляется с помощью импульсов, формируемых блоком управления через драйвер. Частота и форма выходного напряжения инвертора определяются алгоритмом управления и позволяют изменять скорость вращения синхронного двигателя в заданных пределах.

Принцип работы схемы

Работа устройства осуществляется следующим образом: после подачи питания переменное трёхфазное напряжение выпрямляется и сглаживается, формируя стабильное постоянное напряжение на шине инвертора. Блок управления с помощью микросхемы TCA785 синхронизируется с сетевым напряжением и формирует управляющие импульсы с заданным фазовым сдвигом. Эти сигналы подаются на драйвер, который в свою очередь обеспечивает коммутацию тиристоров в силовом инверторе. Последний преобразует постоянное напряжение в переменное трёхфазное с заданной частотой и подаёт его на обмотки электродвигателя.

Таким образом, благодаря изменению угла включения тиристоров возможно варьировать как частоту, так и амплитуду выходного напряжения,

обеспечивая плавный пуск, регулировку скорости и стабильную работу электропривода в различных режимах.

Разработка схемы

После этапа проектирования функциональной и принципиальной схем преобразователя частоты следующим этапом работы стало её моделирование в программной среде Proteus, что позволило на ранней стадии проверить корректность схемных решений, отладить алгоритмы управления и визуализировать сигнальные процессы в цепях управления и силовой части. Целью моделирования являлась проверка работоспособности спроектированной схемы, анализ формирования управляющих импульсов, проверка логики работы микросхемы TCA785, оценка корректности коммутации тиристоров, контроль формы выходного напряжения, а также выявление возможных сбоев и оптимизация параметров элементов. В среде Proteus была воссоздана принципиальная схема, включающая выпрямитель, реализованный на основе диодов и трёхфазного источника напряжения с моделированием фильтра, инвертор на тиристорах, собранный по мостовой схеме из шести тиристоров, блок управления на базе микросхемы TCA785 с цепями синхронизации и формирования управляющих сигналов, драйверы с гальванической развязкой и оптронами, а также нагрузка в виде трёхфазной R-L цепи, имитирующей поведение синхронного двигателя. Параметры моделирования включали питающую сеть с частотой 50 Гц и линейным напряжением 380 В, нагрузку, угол открытия тиристоров от 30 до 90 градусов и временной интервал симуляции до 500 мс для оценки переходных процессов. Результаты моделирования показали корректную работу блока управления: микросхема TCA785 формировала управляющие импульсы с регулируемым фазовым сдвигом, обеспечивая правильную коммутацию тиристоров и формирование симметричного трёхфазного напряжения. Анализ осцилограмм подтвердил соответствие форм сигналов заданным параметрам, отсутствие паразитных срабатываний и сбоев синхронизации. Имитация пускового режима показала, что плавное изменение угла открытия тиристоров позволяет обеспечивать постепенный рост выходного напряжения и скорости вращения двигателя, что уменьшает пусковые токи и механические нагрузки. Оценка токов через силовые ключи подтвердила адекватность выбора элементов для номинальной нагрузки. Проведённое моделирование позволило сократить ошибки при физической реализации, оптимизировать параметры управления, проверить устойчивость и динамику

работы схемы, а также оценить поведение при различных режимах работы. В итоге моделирование в Proteus подтвердило работоспособность и надёжность разработанной схемы, что послужило основанием для её дальнейшей сборки и экспериментальной проверки [10-11].

Принципиальная схема системы управления, содержащая микросхему TCA785, синхронизирующие цепи и логические элементы формирования управляющих импульсов, представлена на рисунке 2. Силовая часть, включающая выпрямитель, тиристорный инвертор и нагрузку, приведена на рисунке 3. Моделирование этих схем позволило осуществить комплексную проверку взаимодействия элементов системы, выявить критические параметры и подтвердить работоспособность устройства до его физической реализации.

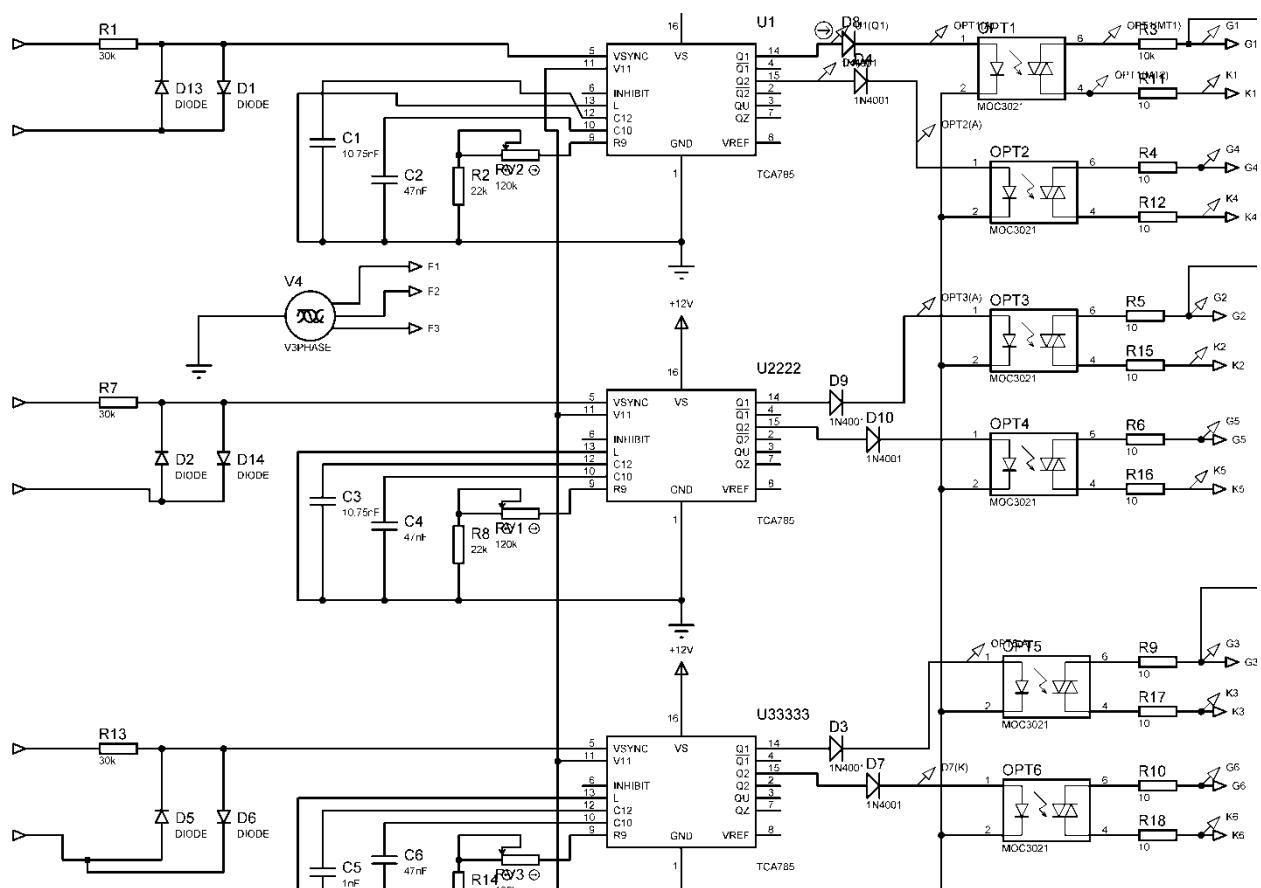


Рис.2. Принципиальная схема системы управления преобразователем частоты
(модель в Proteus)

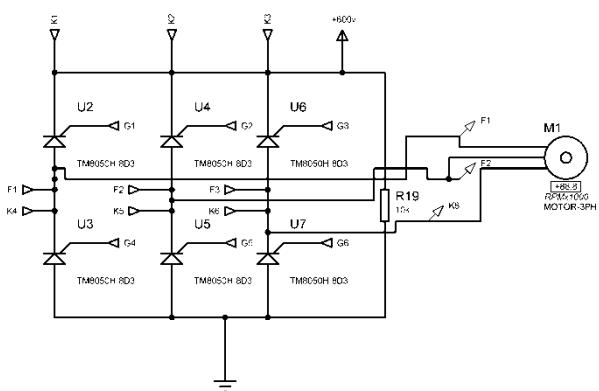


Рис.3. Силовая часть схемы преобразователя частоты с тиристорным инвертором
(модель в Proteus)

После успешной отладки в Proteus была собрана рабочая модель устройства на базе доступных радиоэлектронных компонентов (Рис.4.). В конструкции использованы силовые тиристоры, охлаждаемые через массивные радиаторы, а также самодельные печатные платы для блока управления, собранные на дискретных элементах. В качестве источника питания для управляющей части использовалась аккумуляторная батарея 12 В.

Собранное устройство было испытано в лабораторных условиях при подключении к синхронному электродвигателю мощностью 3 кВт с номинальной частотой вращения 3000 об/мин. В ходе испытаний была обеспечена стабильная работа схемы, устойчивое регулирование выходной частоты, плавный пуск и отсутствие критического нагрева силовых компонентов. Также проверялась работа схемы при различных режимах нагрузки и на холостом ходу (Рис.5.).

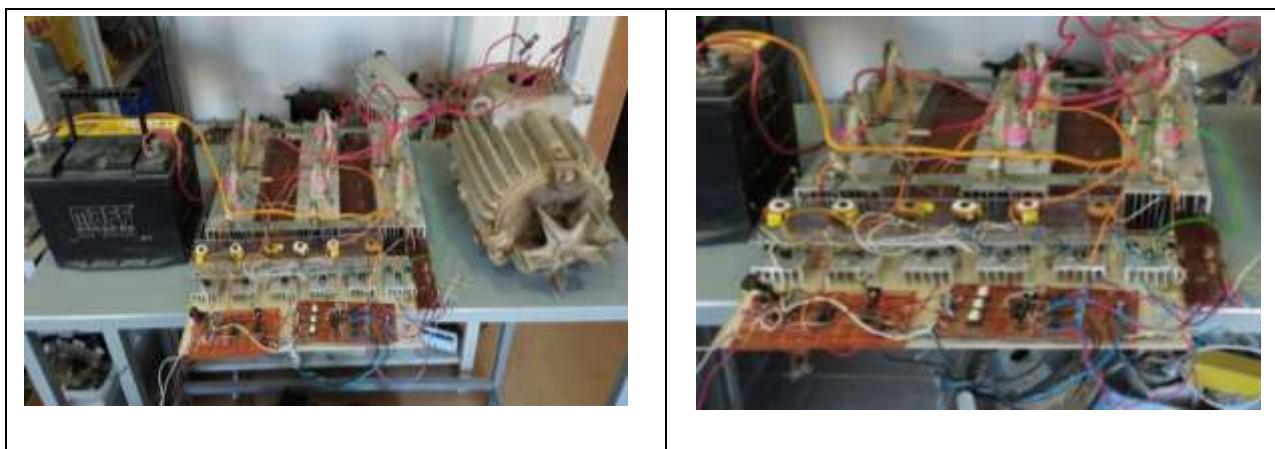


Рис. 4. Внешний вид собранного ПЧ, подключённого к электродвигателю и источнику питания.

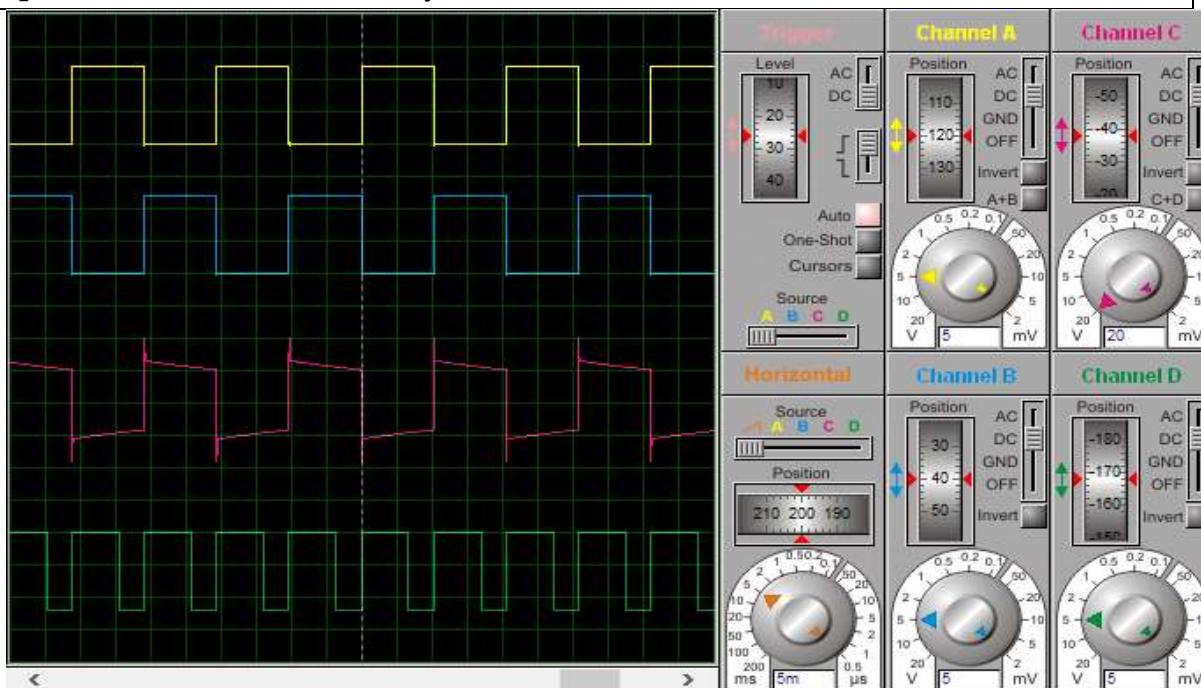


Рис. 5. ШИМ импульсы из выхода преобразователя частоты

Заключение

В данной работе выполнена разработка функциональной и принципиальной схем преобразователя частоты для питания синхронного электродвигателя мощностью 30 кВт. В качестве ключевого элемента управления применена микросхема TCA785, которая обеспечивает точную фазовую синхронизацию и управление тиристорным инвертором. Такая архитектура позволяет реализовать надежную и простую систему управления с минимальными затратами на компоненты.

Для обеспечения электробезопасности, гальванической развязки и стабилизации питающего напряжения перед силовой частью был включен трансформатор, что снижает уровень помех и повышает устойчивость работы системы. Вся схема была разработана и смоделирована в среде Proteus, что позволило проверить корректность работы каждого функционального блока, взаимодействие между ними, а также форму управляющих сигналов без необходимости физической сборки устройства на данном этапе.

Полученное решение отличается доступностью элементной базы и возможностью повторного воспроизведения в условиях ограниченных ресурсов. Разработанные схемы могут служить основой для дальнейшей реализации преобразователя частоты в реальном оборудовании, а также использоваться в учебных и исследовательских целях.

ЛИТЕРАТУРА:

- 1.Иванов С.А. Преобразователи частоты и системы управления электроприводом. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 320 с.
- 2.Петров В.В., Козлов А.Н. Силовая электроника: теория и практика. – СПб.: Питер, 2020. – 450 с.
- 3.Васильев Ю.М. Управление электрическими двигателями: теория и методы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 280 с.
- 4.Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. 4th Edition. – Pearson, 2013. – 912 p.
- 5.Hart D.W. Power Electronics. – McGraw-Hill, 2010. – 600 p.
- 6.Вестник Чувашского университета. Преобразователи частоты: современные методы и технологии. – 2019. – №3. – С. 95-105.
- 7.Datasheet TCA785, Texas Instruments. Available at:
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca785.pdf>
- 8.Мельников А.П., Смирнов И.В. Широтно-импульсная модуляция и управление инверторами. – М.: Радио и связь, 2016. – 210 с.
- 9.Кузнецов И.Н. Преобразователи частоты в судовой энергетике. – СПб.: Судостроение, 2015. – 270 с.
- 10.Бобров В.Г., Кузьмичёв Д.С. Моделирование систем управления электроприводами в Proteus. // Электротехника и электроника. – 2021. – Т. 56, № 4. – С. 34-40.
- 11.Сенатор В.Э., Руденко А.В. Тиристорные преобразователи частоты: теория и применение. – М.: Энергия, 2014. – 300 с.