

УДК 355. 656. 052. 2.

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ И ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 30 КВТ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18976210>

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

Институт военной авиации Республики Узбекистан,

[e-mail: bahrom_prof@mail.ru](mailto:bahrom_prof@mail.ru)

Аннотация

В работе представлена разработка функциональной и принципиальной схемы тиристорного преобразователя частоты для пуска и управления синхронным электродвигателем мощностью 30 кВт, используемого в составе аэродинамической трубы. Работа направлена на решение инженерной задачи создания экономичной и надёжной системы управления электроприводом, обеспечивающей устойчивую работу в различных режимах при минимальных затратах. Актуальность разработки обусловлена необходимостью модернизации устаревшего лабораторного оборудования и дефицитом доступных решений для учебных и исследовательских задач. Использование недорогой элементной базы без применения промышленных модулей позволило снизить стоимость устройства без ущерба для его функциональности. Моделирование схемы в среде Proteus обеспечило предварительную отладку логики, проверку взаимодействия силовой и управляющей частей, а также анализ переходных процессов. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его применимость в образовательных и экспериментальных установках.

Ключевые слова

преобразователь частоты, синхронный двигатель, тиристорный инвертор, микросхема ТСА785, 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 [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

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 тиристорov 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 [Ошибка! Источник ссылки не найден.-Ошибка! Источник ссылки не найден.].

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 тиристорov. 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 [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

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 преобразователем частоты сочетает в себе доступность, функциональность и надёжность. Она ориентирована на применение в экспериментальных и лабораторных установках, где требуется гибкая настройка параметров, а также в условиях ограниченного бюджета, что делает её практической альтернативой дорогостоящим промышленным решениям.

В настоящее время существует большое разнообразие преобразователей частоты (ПЧ), которые различаются как по схемным решениям, так и по используемой элементной базе. Наиболее широко распространённой является схема двойного преобразования, включающая выпрямитель, фильтр постоянного тока и автономный инвертор, реализуемые на базе различных силовых компонентов – тиристоров, IGBT, MOSFET и других [8–9]. Наиболее близкими к разрабатываемой схеме являются решения, основанные на трёхфазном зависимом инверторе тока с дополнительными фазными источниками напряжения. Устройство с подобной архитектурой защищено патентом IAP20250300 [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] и послужило основой для создания более простой и доступной схемы преобразователя частоты. В отличие от запатентованного устройства, представленная в настоящей работе схема ориентирована на использование доступных компонентов и упрощённое фазовое управление тиристорным инвертором, что обеспечивает её практическую применимость в лабораторных и учебных установках.

В то же время преобразователи с инверторами на IGBT-транзисторах обеспечивают более высокую частоту переключения и возможность формирования выходного сигнала с улучшенной формой благодаря применению широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Это делает их предпочтительными для приводных систем с высокими требованиями к динамике и качеству выходного тока. Однако такие системы требуют более сложных схем управления, специализированных драйверов и защит, а также отличаются меньшей устойчивостью к помехам и аварийным режимам, особенно в условиях нестабильного электропитания.

Следует также отметить, что большинство современных разработок в области ПЧ ограничиваются либо теоретическими исследованиями, либо программным моделированием. Завершённые, практически реализованные проекты, особенно с использованием недорогих и доступных компонентов, встречаются достаточно редко.

В этой связи представляет интерес схема тиристорного преобразователя частоты, разработанная в рамках данной работы. Устройство спроектировано, смоделировано и собрано с целью запуска синхронного электродвигателя мощностью 30 кВт в составе аэродинамической установки. Такой подход демонстрирует возможность создания полноценной системы управления электроприводом при минимальных затратах и с использованием исключительно доступной элементной базы.

Методика эксперимента

Разработанная схема включает следующие функциональные узлы: входной выпрямитель, LC-фильтр на базе индуктивности и ёмкости, тиристорный инвертор, систему фазового управления на основе микросхемы ТСА785, а также развязывающий трансформатор. Применение трансформатора обеспечивает гальваническую развязку между управляющей и силовой частями, повышает электробезопасность и устойчивость схемы к электромагнитным помехам. Управление тиристорами реализовано методом фазового регулирования, что позволило отказаться от сложных ШИМ-контроллеров и упростить схему без потери ключевых функций управления. При этом сохраняется возможность регулирования как выходного напряжения, так и частоты, что обеспечивает достаточную гибкость в управлении электродвигателем. Ключевым преимуществом разработанной схемы является её воспроизводимость в условиях ограниченного доступа к специализированной компонентной базе. Применение микросхемы ТСА785 позволило реализовать компактную и надёжную систему управления с

точной синхронизацией с питающей сетью. Моделирование в среде Proteus дало возможность предварительно проанализировать форму выходного тока, характер коммутации тиристоров и поведение схемы в переходных режимах, в частности – при запуске и остановке двигателя. Таким образом, проведённое исследование позволяет сделать вывод, что предложенное техническое решение представляет собой эффективный компромисс между простотой реализации, надёжностью и функциональностью. В отличие от сложных промышленных инверторов на базе IGBT, данная схема доступна для самостоятельного повторения и адаптации, что делает её особенно актуальной для использования в лабораторных установках, учебных стендах и в рамках опытных инженерных разработок. Кроме того, завершённый цикл проектирования, моделирования и практической сборки подтверждает не только теоретическую состоятельность схемы, но и её реальную применимость в условиях ограниченных ресурсов.

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. Основу схемы составляют следующие функциональные блоки:

- Выпрямитель (AC-DC);
- Блок управления (на базе микросхемы TCA785);
- Драйвер управляющих сигналов;
- Инвертор напряжения (DC-AC);
- Синхронный электродвигатель (нагрузка).

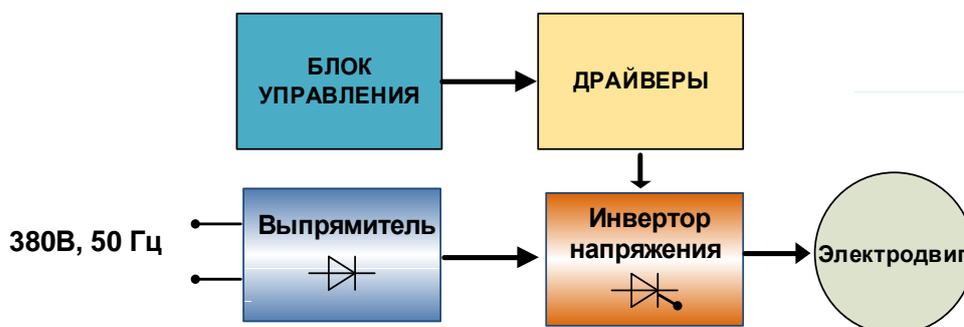


Рис.1 Функциональная схема частотного преобразователя

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.

Центральным элементом схемы управления является специализированная микросхема ТСА785, 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. Дополнительно в состав блока управления входят цепи синхронизации с сетью, формирователи сигналов и элементы защиты. Для расширения функциональности и повышения гибкости системы в состав блока управления дополнительно был включён **микроконтроллер Arduino**,

Arduino взаимодействует с силовой частью через управляющие цепи, согласованные по уровням и защищённые с помощью оптронов. Таким образом, система управления реализует комбинированный подход: **аппаратная синхронизация и фазовая задержка на базе ТСА785** сочетается с **цифровой логикой управления**, реализованной на Arduino, что повышает надёжность и адаптивность схемы.

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 тиристорov. Это особенно важно при коммутации высоковольтных цепей, где требуется устойчивое срабатывание силовых ключей при наличии электромагнитных помех.

Инвертор собран из шести тиристорov 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. Перед подачей напряжения на инвертор в схеме применяются понижающие и развязывающие трансформаторы. Их основное назначение заключается в обеспечении: гальванической развязки между силовой и управляющей частью, формирования необходимых уровней питающего напряжения, подавления высокочастотных помех, выравнивания фазных напряжений в трёхфазной системе.

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.

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 ТСА785 формировала управляющие импульсы с регулируемым фазовым сдвигом, обеспечивая правильную коммутацию тиристоров и формирование симметричного трёхфазного напряжения. Анализ осциллограмм 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 [Ошибка! Источник ссылки не найден.-
Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Принципиальная схема системы управления, содержащая микросхему ТСА785, 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.

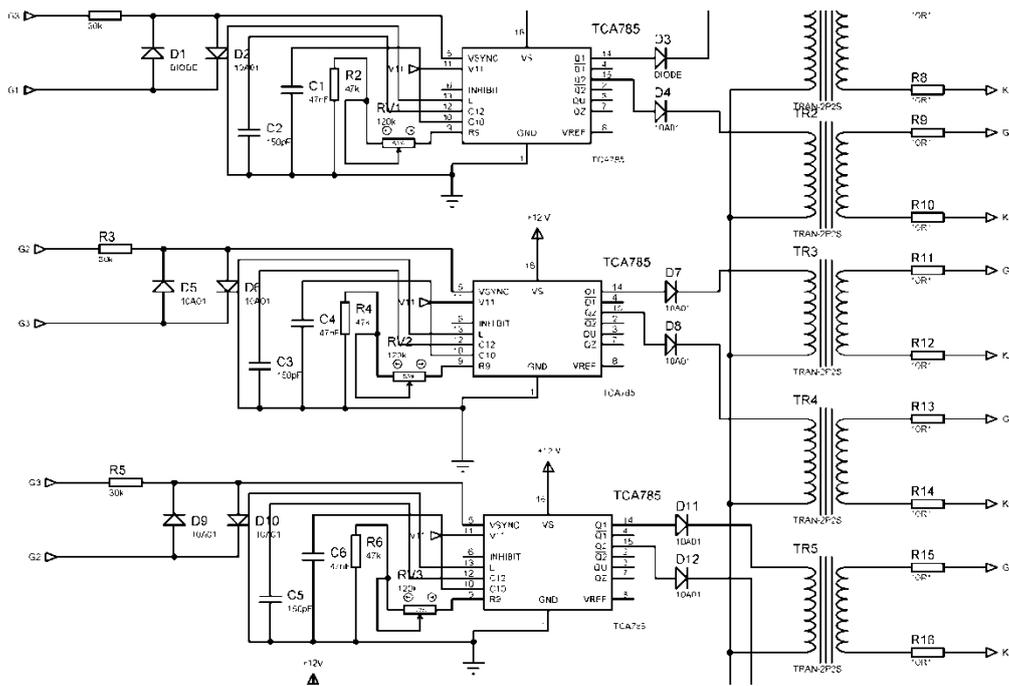


Рис.2. Принципиальная схема системы управления преобразователем частоты (модель в Proteus)

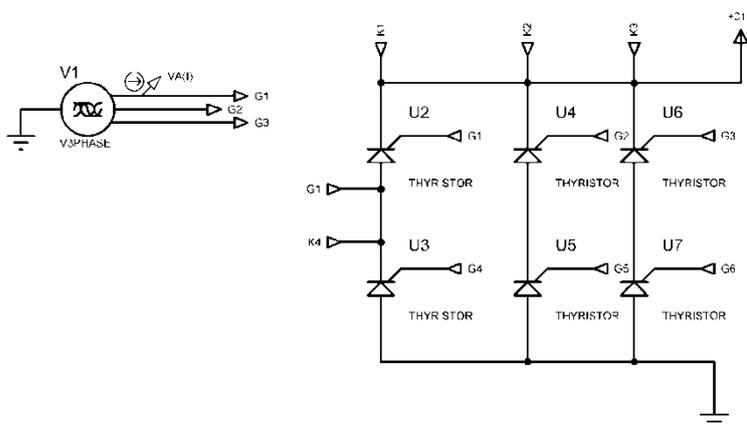


Рис.3. Силовая часть схемы преобразователя частоты с тиристорным инвертором (модель в Proteus)

Для реализации алгоритма управления тиристорным инвертором использовался микроконтроллер **Arduino Uno**, выполняющий функции формирования управляющих импульсов, расчёта частоты переключения и отображения текущей скорости вращения на жидкокристаллическом дисплее (LCD). Управление осуществляется по шестиступенчатому циклу

коммутации, соответствующему стандартной последовательности включения пар тиристорov в мостовой трёхфазной схеме.

Регулирование частоты коммутации реализовано с помощью двух кнопок, подключённых к цифровым входам контроллера, что позволяет пользователю изменять значение задержки между переключениями фаз в пределах от 500 до 20000 микросекунд. Изменение задержки прямо пропорционально влияет на выходную частоту преобразователя и, соответственно, на скорость вращения подключённого двигателя.

В программе реализована функция расчёта текущей скорости в оборотах в минуту (RPM) на основе выбранной задержки, с выводом значения на LCD-дисплей. Также предусмотрена защита от ложных срабатываний путём использования антидребезговой задержки.

Управляющие импульсы подаются на соответствующие выходы микроконтроллера кратковременным сигналом заданной длительности (50 мкс). Ниже приведена функция, реализующая активацию очередной пары тиристорov на основе текущей фазы коммутации.

Таблица 1.

Функция переключения фаз в системе управления (Arduino)

Листинг 1. Функция переключения фаз (Arduino)
<code>void activatePhase(int fase) {</code>
<code> deactivateAll(); // Сброс всех управляющих сигналов</code>
<code> delayMicroseconds(100); // Пауза для надёжности коммутации</code>
<code> switch (fase) {</code>
<code> case 1: pulseGate(BB2); pulseGate(CC1); break;</code>
<code> case 2: pulseGate(AA1); pulseGate(BB2); break;</code>
<code> case 3: pulseGate(AA1); pulseGate(CC2); break;</code>
<code> case 4: pulseGate(BB1); pulseGate(CC2); break;</code>
<code> case 5: pulseGate(AA2); pulseGate(BB1); break;</code>
<code> case 6: pulseGate(AA2); pulseGate(CC1); break;</code>

Функция pulseGate() формирует короткий положительный импульс на управляющем выводе соответствующего тиристорa. Функция deactivateAll() предварительно сбрасывает все сигналы, исключая наложение управляющих импульсов.

Программный код был протестирован в среде **Arduino IDE** и интегрирован с моделью схемы, разработанной в Proteus, что позволило

обеспечить полную совместимость программной и аппаратной частей системы.

После успешной программной отладки схемы в среде Proteus была собрана рабочая модель устройства на основе доступных радиоэлектронных компонентов (см. рис. 4). Конструкция включает силовые тиристоры, установленные на массивных радиаторах для эффективного отвода тепла, а также самодельные печатные платы блока управления, выполненные на дискретных элементах. Питание управляющей части обеспечивалось от автономного источника – аккумуляторной батареи напряжением 12 В.

Испытания собранного устройства проводились в лабораторных условиях с подключением к синхронному электродвигателю мощностью 3 кВт с номинальной частотой вращения 3000 об/мин. В ходе тестирования была достигнута стабильная работа схемы во всём диапазоне выходных частот, обеспечен плавный пуск электродвигателя, а также подтверждена эффективность системы охлаждения – перегрева силовых компонентов не наблюдалось. Дополнительно проверялась работоспособность схемы в различных режимах: при холостом ходе, частичной и номинальной нагрузке. Во всех случаях устройство демонстрировало устойчивую работу и корректное функционирование логики управления.

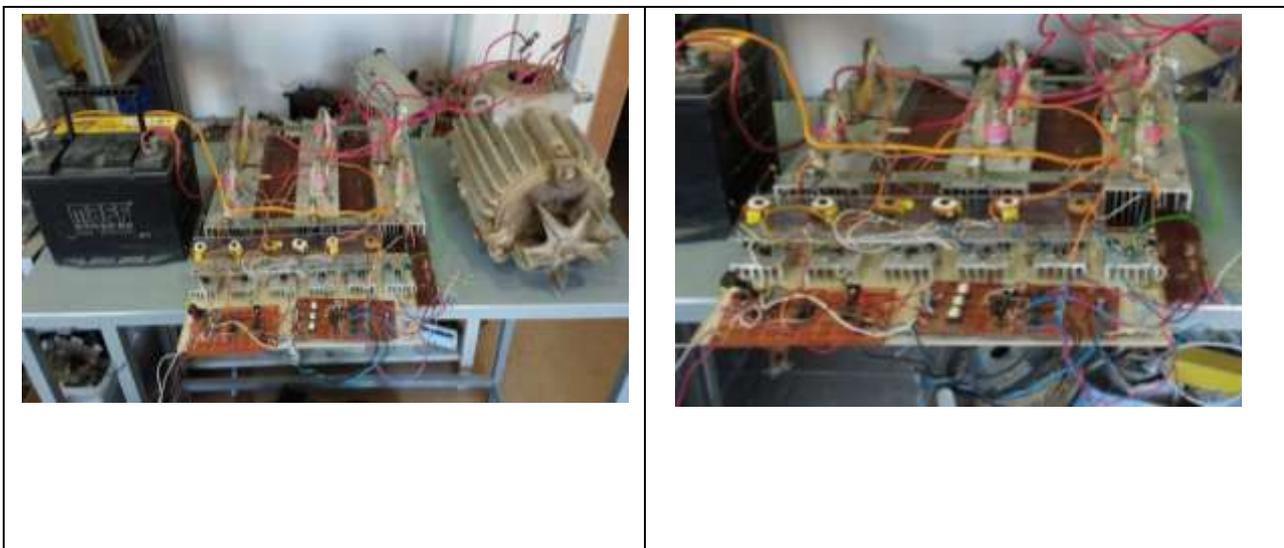


Рис. 4. Внешний вид собранного ПЧ, подключённого к электродвигателю и источнику питания.

Заключение

В данной работе представлена разработка функциональной и принципиальной схемы тиристорного преобразователя частоты для питания синхронного электродвигателя мощностью 30 кВт. В качестве ключевого

управляющего элемента применена микросхема TCA785, обеспечивающая точную фазовую синхронизацию и надёжное управление тиристорами. Предложенная архитектура позволяет реализовать простую, эффективную и экономичную систему управления, пригодную для лабораторного и учебного применения.

Для повышения электробезопасности и устойчивости схемы к помехам, перед силовой частью введён развязывающий трансформатор, выполняющий функции гальванической развязки и стабилизации питающего напряжения. Вся система была предварительно смоделирована в среде Proteus, что позволило выявить и устранить возможные ошибки, а также провести анализ логики работы и переходных процессов без необходимости в начальной физической реализации.

Полученное техническое решение отличается доступностью элементной базы, технологичностью сборки и возможностью повторного воспроизведения в условиях ограниченных ресурсов. Разработанная схема может быть использована как основа для практической реализации преобразователя частоты в реальных установках, а также для учебных и исследовательских целей. Результаты работы подтверждают работоспособность предложенной схемы и её применимость в различных прикладных задачах управления синхронными электроприводами.

REFERENCES:

1. Ivanov S.A. Frequency converters and electric drive control systems. Moscow: Energoatomizdat; 2018. 320 p.
2. Petrov V.V, Kozlov A.N. Power electronics: theory and practice. St. Petersburg: Piter; 2020. 450 p.
3. Vasiliev Y.M. Control of electric motors: theory and methods. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom; 2017. 280 p.
4. Rashid M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. 4th ed. Pearson; 2013. 912 p.
5. Hart D.W. *Power Electronics*. McGraw-Hill; 2010. 600 p.
6. Modern methods and technologies of frequency converters // *Vestnik of Chuvash University*. 2019;3:95-105.
7. Texas Instruments. *Datasheet: TCA785 Phase Control IC*. Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca785.pdf>
8. Melnikov A.P, Smirnov I.V. Pulse-width modulation and inverter control. Moscow: Radio i svyaz; 2016. 210 p.

9. Kuznetsov I.N. Frequency converters in marine power systems. St. Petersburg: Sudostroenie; 2015. 270 p.
10. Bobrov V.G, Kuzmichev D.S. Modeling control systems for electric drives in Proteus. *Electrotechnics and Electronics*. 2021;56(4):34-40.
11. Senator V.E, Rudenko A.V. Thyristor frequency converters: theory and application. Moscow: Energiya; 2014. 300 p.
12. Egamberdiev B.B, Kholov O.T. Three-phase dependent current inverter with additional phase voltage sources: patent Uzbekistan IAP20250300. Published 15 Aug 2025.

UDC 355. 656. 052. 2.

DEVELOPMENT OF FUNCTIONAL AND CIRCUIT SCHEMES OF A FREQUENCY CONVERTER FOR A 30 KW SYNCHRONOUS MOTOR

B. E. Egamberdiev, O.T. Kholov, B.M. Mukhammedov
Military Aviation Institute of the Republic of Uzbekistan
e-mail: bahrom_prof@mail.ru

Abstract

This paper presents the development of the functional and schematic design of a thyristor frequency converter for starting and controlling a 30 kW synchronous motor used in an aerodynamic wind tunnel setup. The work addresses the engineering challenge of creating a cost-effective and reliable motor control system that ensures stable operation in various modes with minimal expenses. The relevance of this development is driven by the need to modernize outdated laboratory equipment and the lack of accessible solutions for educational and research purposes. The use of inexpensive components without industrial modules reduced the device cost without compromising its functionality. Simulation of the circuit in the Proteus environment enabled preliminary debugging of the control logic, verification of the interaction between the power and control sections, and analysis of transient processes. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach and its applicability in educational and experimental setups.

Keywords

frequency converter, synchronous motor, thyristor inverter, TCA785 integrated circuit, pulse-width modulation, functional diagram, circuit schematic, Proteus simulation, motor drive control, galvanic isolation transformer.

Introduction

Currently, there exists a wide range of theoretical and practical solutions for implementing frequency converters (FCs), as evidenced by the extensive variety of circuit designs published in scientific literature, patents, and engineering manuals. However, examples of frequency converter circuits that are not only simulated but also fully realized as functional devices assembled from readily available electronic components are rare. This issue is especially relevant for the development of converters for high-power drives, where the high cost of industrial frequency converters makes the task of independent design and assembly particularly important [1]. Within the scope of this work, both the functional and schematic electrical diagrams of a frequency converter intended to control a 30 kW synchronous motor installed in an aerodynamic wind tunnel were developed. The project is based on available componentry, using power thyristors as the main switching elements. All circuit designs were preliminarily simulated in the Proteus software environment, enabling verification of operability, control logic, and signal parameters during the design phase. Following successful verification, a physical prototype of the device was assembled, confirming the practical feasibility of the proposed solution [2-6]. The objective of this work is the development and implementation of a frequency converter control system that ensures reliable starting and stable operation of the synchronous motor within the experimental setup, using accessible electronic components with an emphasis on cost-effectiveness, reproducibility, and ease of adjustment.

To enhance reliability and electrical safety, step-down and isolation transformers are incorporated into the circuit before supplying voltage to the power section of the converter. Their use is motivated by several critically important factors: Galvanic isolation between the control circuits and power elements protects the control logic from high-voltage and transient processes occurring in the power section; Formation of the required voltage levels, matching the operating parameters of the thyristors, optimizes switching conditions and reduces thermal stress on power components; Distribution and phase voltage balancing ensures correct operation of the six thyristors and provides even load distribution across each phase; Reduction of electromagnetic interference and filtering of high-frequency components generated during thyristor switching.

Thus, the developed frequency converter control system combines accessibility, functionality, and reliability. It is aimed at use in experimental and laboratory setups where flexible parameter tuning is required, as well as in budget-constrained environments, making it a practical alternative to costly industrial solutions.

Currently, a wide variety of frequency converters (FCs) exist, differing in both circuit design and the employed component base. The most widely used configuration is the double-conversion scheme, which includes a rectifier, DC filter, and autonomous inverter, implemented using various power components such as thyristors, IGBTs, MOSFETs, and others [8-9]. The solutions closest to the developed scheme are based on a three-phase dependent current inverter with additional phase voltage sources. A device with similar architecture is protected by patent IAP20250300 [12] and served as the foundation for creating a simpler and more accessible frequency converter circuit. Unlike the patented device, the scheme presented in this work focuses on the use of readily available components and simplified phase control of the thyristor inverter, ensuring its practical applicability in laboratory and educational setups.

At the same time, converters with IGBT-based inverters offer higher switching frequencies and the ability to form output signals with improved waveform quality through the use of pulse-width modulation (PWM). This makes them preferable for drive systems with stringent requirements for dynamics and output current quality. However, such systems demand more complex control circuits, specialized drivers and protections, and are less resilient to interference and fault conditions, especially under unstable power supply conditions.

It is also worth noting that most modern developments in the field of frequency converters are limited to either theoretical studies or software-based simulations. Fully completed and practically implemented projects – especially those based on low-cost and readily available components – are relatively rare.

In this context, the thyristor-based frequency converter scheme developed in this work is of particular interest. The device was designed, simulated, and assembled to enable the operation of a 30 kW synchronous motor as part of an aerodynamic testing facility. This approach demonstrates the feasibility of creating a fully functional motor control system using only accessible components and minimal financial resources.

Experimental Methodology

The developed circuit includes the following functional units: an input rectifier, an LC filter based on inductance and capacitance, a thyristor inverter, a phase control system based on the TCA785 integrated circuit, and an isolation transformer. The use of the transformer ensures galvanic isolation between the control and power sections, improves electrical safety, and enhances the circuit's resistance to electromagnetic interference. Thyristor control is implemented through phase angle regulation, which eliminates the need for complex PWM controllers while retaining the key capabilities for adjusting both output voltage and frequency. This provides sufficient flexibility in motor control.

A key advantage of the proposed design is its reproducibility under conditions of limited access to specialized components. The application of the TCA785 chip allowed the implementation of a compact and reliable control system with precise synchronization to the supply network. Simulation in the Proteus environment enabled preliminary analysis of output current waveforms, thyristor commutation behavior, and circuit dynamics during transients, particularly at motor startup and shutdown.

Thus, the study confirms that the proposed technical solution represents an effective compromise between simplicity of implementation, reliability, and functionality. Unlike complex industrial IGBT-based inverters, this design is suitable for replication and adaptation, making it especially relevant for use in laboratory setups, educational stands, and pilot engineering projects. Moreover, the completed cycle of design, simulation, and physical assembly confirms not only the theoretical soundness of the circuit, but also its practical applicability under resource-constrained conditions.

At the initial stage of the project, a functional diagram of the frequency converter was developed (Fig. 1). This converter is intended for starting and controlling a 30 kW synchronous motor installed in an aerodynamic wind tunnel. The design emphasizes the use of widely available components, including power thyristors and specialized control ICs. The schematic is structured around the following functional blocks: Rectifier (AC-DC); Control unit (based on the TCA785 Gate signal driver;integrated circuit); Voltage inverter (DC-AC); Synchronous motor (load).

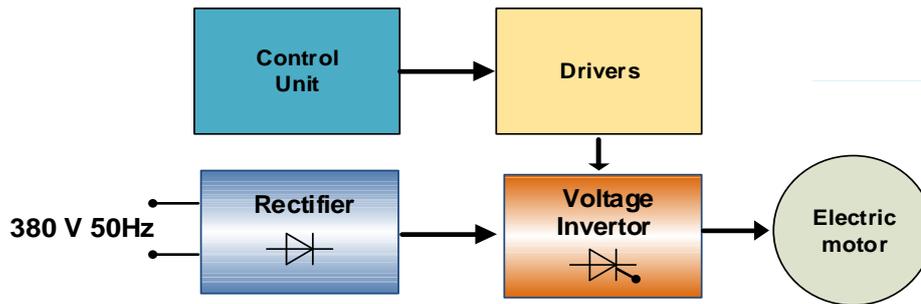


Fig. 1. Functional diagram of the frequency converter

The three-phase rectifier unit is designed to convert the AC mains voltage of 380 V, 50 Hz into a DC voltage. The resulting DC voltage is supplied to the inverter input. The use of the rectifier allows the control system to be decoupled from unstable grid parameters and creates a stable DC bus necessary for further generation of a controllable AC output.

The central element of the control circuit is the specialized integrated circuit TCA785, intended for phase angle control of thyristors. The IC generates control pulses with an adjustable delay angle relative to the zero-crossing point of the AC voltage. This enables precise timing of the power switch triggering, reduction of inrush currents, and control over the output voltage. The control block also includes synchronization circuits, signal shapers, and protection elements.

To expand functionality and increase system flexibility, a microcontroller (Arduino) is integrated into the control unit. Arduino interacts with the power section through level-matched and opto-isolated control lines. Thus, the control system implements a hybrid approach: hardware-based synchronization and phase delay provided by the TCA785 are combined with digital control logic implemented via the Arduino, enhancing both reliability and adaptability.

The gate driver ensures signal level matching between the logic control circuit and the power section. It provides galvanic isolation, current and voltage amplification, and generates the required pulse edges for reliable thyristor triggering. This is especially important in high-voltage switching, where stable activation of power switches is required in the presence of electromagnetic interference.

The inverter is built using six thyristors and is designed to convert the DC voltage into a three-phase AC voltage with variable frequency. Thyristors are controlled by pulses generated by the control unit through the driver. The output frequency and waveform of the inverter are determined by the control algorithm and allow for speed adjustment of the synchronous motor within specified limits.

Before power is supplied to the inverter, step-down and isolation transformers are used in the circuit. Their main functions include: providing galvanic isolation

between the power and control sections, forming the required power supply voltage levels, suppressing high-frequency noise, and balancing the phase voltages in the three-phase system.

The operation of the device proceeds as follows: after power-up, the three-phase AC voltage is rectified and smoothed, forming a stable DC voltage on the inverter bus. The control unit, using the TCA785 IC, synchronizes with the AC mains and generates control pulses with a specified phase shift. These signals are sent to the driver, which in turn ensures the commutation of the thyristors in the power inverter. The inverter then converts the DC voltage into three-phase AC with the required frequency and supplies it to the motor windings.

By varying the firing angle of the thyristors, it is possible to control both the frequency and the amplitude of the output voltage, thereby enabling smooth startup, speed regulation, and stable operation of the motor in different modes.

After designing the functional and schematic diagrams of the frequency converter, the next stage involved simulation in the Proteus environment. This allowed early verification of design correctness, debugging of control algorithms, and visualization of signal processes in both the control and power circuits. The simulation aimed to verify the operability of the designed circuit, analyze the generation of control pulses, examine the logic of the TCA785 IC, assess the correctness of thyristor commutation, monitor output voltage waveform, and identify potential faults while optimizing component parameters.

In Proteus, the full schematic was reproduced, including: a rectifier using diodes and a three-phase voltage source with a simulated LC filter; a bridge inverter of six thyristors; a control block based on the TCA785 with synchronization circuits and control pulse shaping; drivers with galvanic isolation using optocouplers; as well as a three-phase R-L load that emulates the behavior of the synchronous motor. Simulation parameters included a supply grid of 50 Hz and line voltage of 380 V, load, a thyristor firing angle in the range of 30° to 90°, and a simulation time interval up to 500 ms to assess transient responses.

The simulation results demonstrated correct operation of the control block: the TCA785 IC generated control pulses with adjustable phase shift, ensuring proper commutation of the thyristors and formation of a symmetrical three-phase voltage. Oscilloscope analysis confirmed that signal shapes matched the specified parameters, with no spurious firings or synchronization failures. Startup simulation showed that gradual change in thyristor firing angle allowed gradual increase in output voltage and motor speed, reducing inrush currents and mechanical stress. Evaluation of currents through power switches confirmed the choice of components was adequate for nominal load. The conducted simulations helped

reduce errors in hardware implementation, optimize control parameters, verify stability and dynamics of the circuit, and assess behavior under different operating conditions. Overall, simulation in Proteus confirmed the functionality and reliability of the developed schematic, forming the basis for its further assembly and experimental verification [10-11].

The schematic diagram of the control system, including the TCA785 IC, synchronization circuits, and logic elements for control pulse generation, is shown in Fig. 2. The power section, comprising the rectifier, thyristor inverter, and load, is illustrated in Fig. 3. Simulating these circuits enabled comprehensive verification of the system's component interactions, identification of critical parameters, and confirmation of correct operation prior to hardware realization.

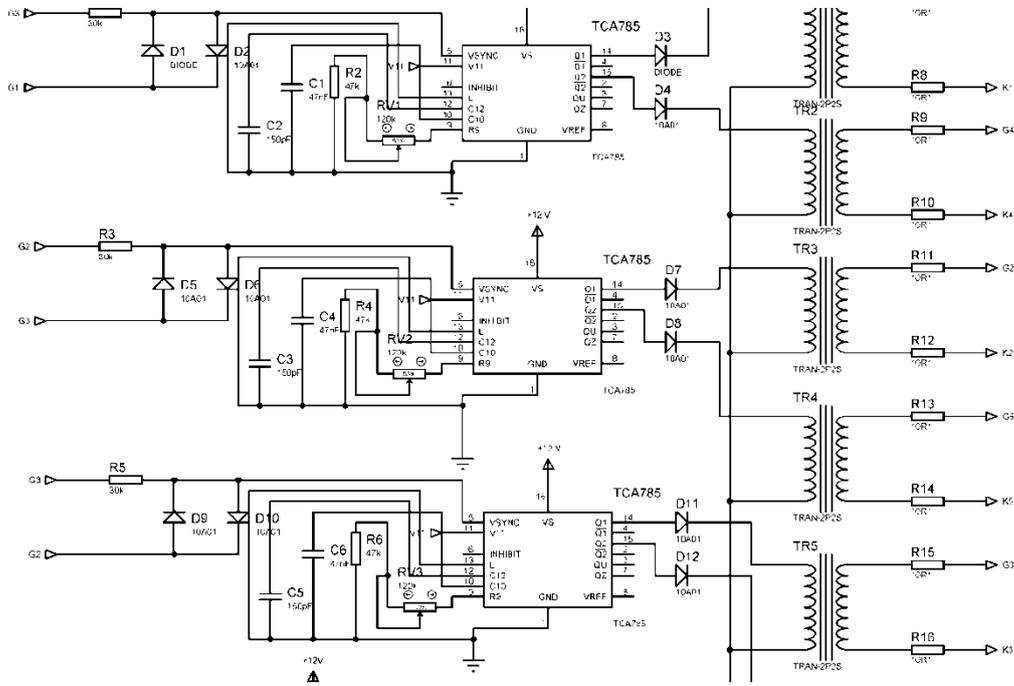


Fig. 2. Schematic diagram of the frequency converter control system (Proteus model)

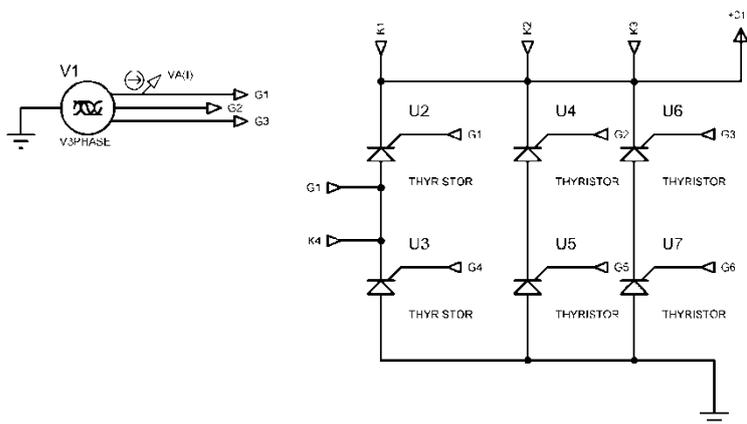


Fig. 3. Power stage of the frequency converter circuit with a thyristor inverter (Proteus model)

To implement the control algorithm for the thyristor inverter, an Arduino Uno microcontroller was used. It performs functions such as generating control pulses, calculating switching frequency, and displaying the current rotational speed on an LCD screen. The control is carried out using a six-step commutation cycle, corresponding to the standard sequence of thyristor pair activation in a three-phase bridge circuit.

The switching frequency is adjusted via two buttons connected to the digital inputs of the controller, allowing the user to modify the delay between phase transitions in the range from 500 to 20,000 microseconds. This delay directly affects the output frequency of the converter and, consequently, the rotational speed of the connected motor.

The program includes a function for calculating the current speed in revolutions per minute (RPM) based on the selected delay, with the result displayed on the LCD screen. Protection against false triggering is implemented using a debounce delay.

Control pulses are sent to the respective microcontroller outputs as short-duration signals (50 μs). The following is a function that implements the activation of the next pair of thyristors based on the current commutation phase.

Table 1. Phase switching function in the control system (Arduino)

<code>void activatePhase(int fase) {</code>
<code> deactivateAll(); // Reset all control signals</code>
<code> delayMicroseconds(100); // Delay for reliable commutationswitch (fase) {</code>
<code> case 1: pulseGate(BB2); pulseGate(CC1); break;</code>
<code> case 2: pulseGate(AA1); pulseGate(BB2); break;</code>
<code> case 3: pulseGate(AA1); pulseGate(CC2); break;</code>
<code> case 4: pulseGate(BB1); pulseGate(CC2); break;</code>
<code> case 5: pulseGate(AA2); pulseGate(BB1); break;</code>
<code> case 6: pulseGate(AA2); pulseGate(CC1); break;</code>

The pulseGate() function generates a short positive pulse on the control terminal of the corresponding thyristor, ensuring its reliable triggering. The deactivateAll() function resets all control signals in advance, preventing any overlap of gate pulses. The program code was tested in the Arduino IDE and

integrated with the circuit model developed in Proteus, enabling full compatibility between the software and hardware components of the system.

After successful software debugging in the Proteus environment, a working prototype of the device was assembled using readily available electronic components (see Fig. 4). The design includes power thyristors mounted on large heat sinks for effective thermal dissipation, as well as custom-made printed circuit boards for the control unit built with discrete components. The control circuit was powered by a standalone 12 V battery.

The assembled device was tested under laboratory conditions with a 3 kW synchronous motor rated at 3000 RPM. During testing, the circuit demonstrated stable operation across the entire output frequency range, smooth motor startup, and effective heat management, with no overheating of power components observed. Additionally, the system's performance was tested under various load conditions: no-load, partial load, and full rated load. In all cases, the device showed stable operation and correct functioning of the control logic.

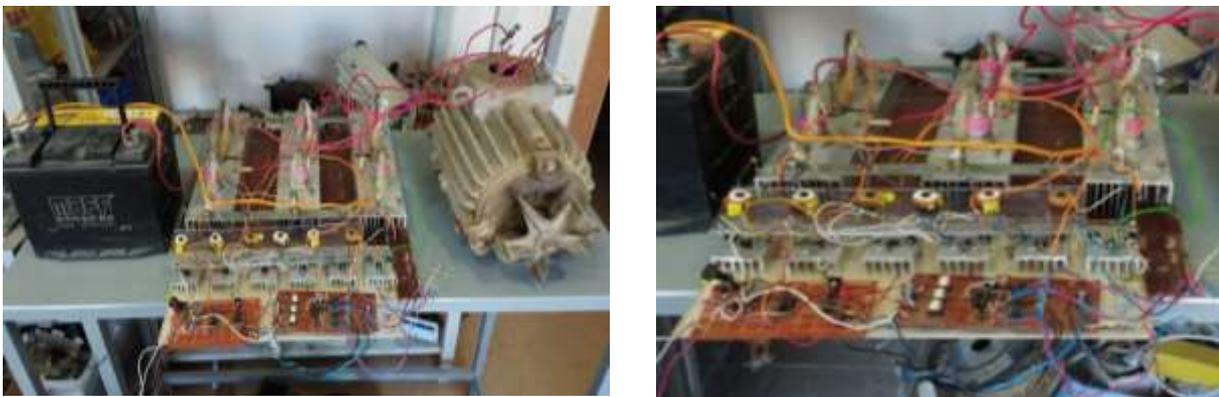


Fig. 4. External view of the assembled frequency converter connected to the electric motor and power supply.

Conclusion

This work presents the development of a functional and circuit diagram of a thyristor-based frequency converter designed to power a 30 kW synchronous electric motor. The key control element is the TCA785 IC, which provides precise

phase synchronization and reliable thyristor control. The proposed architecture enables the creation of a simple, efficient, and cost-effective control system suitable for laboratory and educational use.

To enhance electrical safety and improve resistance to electromagnetic interference, an isolation transformer was introduced before the power stage. It provides galvanic isolation and stabilizes the supply voltage. The entire system was initially simulated in the Proteus environment, allowing potential errors to be identified and corrected, and enabling the analysis of control logic and transient processes without the need for immediate physical implementation.

The proposed technical solution stands out due to the availability of components, ease of assembly, and potential for reproduction under resource-constrained conditions. The developed circuit can serve as a basis for practical implementation of a frequency converter in real-world applications, as well as for educational and research purposes. The results confirm the operability of the proposed design and its applicability to various tasks in the control of synchronous electric drives.

REFERENCES:

1. Ivanov S.A. Frequency converters and electric drive control systems. Moscow: Energoatomizdat; 2018. 320 p.
2. Petrov V.V, Kozlov A.N. Power electronics: theory and practice. St. Petersburg: Piter; 2020. 450 p.
3. Vasiliev Y.M. Control of electric motors: theory and methods. Moscow: Goryachaya liniya – Telecom; 2017. 280 p.
4. Rashid M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. 4th ed. Pearson; 2013. 912 p.
5. Hart D.W. *Power Electronics*. McGraw-Hill; 2010. 600 p.
6. Modern methods and technologies of frequency converters // *Vestnik of Chuvash University*. 2019;3:95-105.
7. Texas Instruments. *Datasheet: TCA785 Phase Control IC*. Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca785.pdf>
8. Melnikov A.P, Smirnov I.V. Pulse-width modulation and inverter control. Moscow: Radio i svyaz; 2016. 210 p.
9. Kuznetsov I.N. Frequency converters in marine power systems. St. Petersburg: Sudostroenie; 2015. 270 p.
10. Bobrov V.G, Kuzmichev D.S. Modeling control systems for electric drives in Proteus. *Electrotechnics and Electronics*. 2021;56(4):34-40.

11. Senator V.E, Rudenko A.V. Thyristor frequency converters: theory and application. Moscow: Energiya; 2014. 300 p.
12. Egamberdiev B.B, Kholov O.T. Three-phase dependent current inverter with additional phase voltage sources: patent Uzbekistan IAP20250300. Published 15 Aug 2025.