

вого инвертора – все собственные числа рассматриваемой системы имеют отрицательную действительную часть, а также приемлемый уровень демпфирования.

Проведённые экспериментальные исследования с помощью созданной модели в пространстве состояний ВСГ-Т демонстрируют высокую эффективность функционирования разработанной предлагаемой системы управления для СИ для обеспечения надёжности и устойчивости современных энергосистем.

## **РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

**Ю.Д. Бай, П.П. Радько, Б.Д. Малюта**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ*

### **Введение**

В данной статье описано управление двухуровневым силовым преобразователем, основными и комплементарными каналами таймера микроконтроллера с целью формирования широтно-импульсной модуляции и может применяться в проектных и научно-исследовательских организациях электроэнергетической отрасли. Данная система будет на физическом уровне осуществлять:

- управление прецизионным источником опорного напряжения;
- формирование положительной и отрицательной полуволн трехфазного напряжения на выходе двухуровневого преобразователя.

### **Используемый метод моделирования**

Ввиду недопустимости натуральных экспериментов в ЭЭС, особенно аварийных, и невозможности, из-за сложности, полноценного физического моделирования ЭЭС основным способом получения этой информации служит преимущественно математическое моделирование, полнота и достоверность которого определяются, прежде всего, адекватностью применяемых математических моделей оборудования и ЭЭС в целом.

Радикальным решением данной проблемы является создание средств моделирования ЭЭС, обладающих свойствами бездекомпозиционного достаточно достоверного воспроизведения на неограниченном интервале, в том числе в реальном времени, непрерывного значимого спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом [1].

В рамках данного подхода, для дальнейшего изучения и оценки влияния внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в работе обозначены основные моменты создания управляемого источника ВИЭ и силового преобразователя (СП) [2].

### **Реализация физической модели**

Общая схема требуемой физической модели представлена на рис. 1. Выделенным цветом (красный) определены первоочередные элементы, реализация которых несет в себе основные функции и точность моделирования СП.

### 1. Источник питания

Выполняет роль первичного источника энергии. Имитирует солнечные панели, ветроэнергетические установки, накопитель энергии и др. Для его реализации решено использовать микросхему опорного питания, управляемую посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Таким образом, можно обеспечить стабильное управляемое напряжение, в соответствии с разрабатываемым алгоритмом.

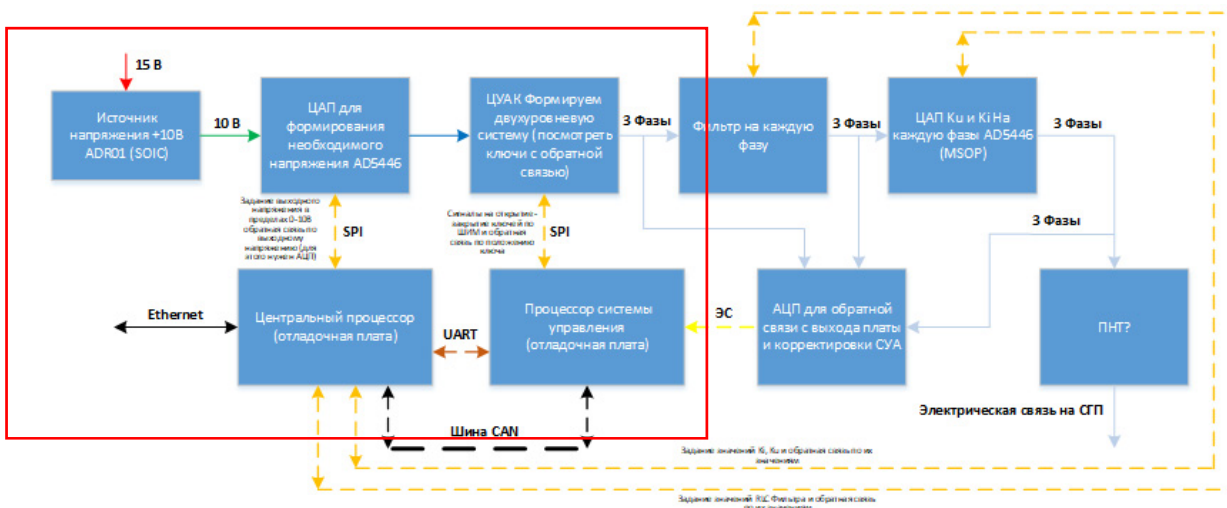


Рис. 1. Структурная схема силового преобразователя (СП)

Выбранная модель – ADR01A [3], прецизионный источник опорного напряжения, имеет 4 уровня выхода по напряжению 10.0 V/5.0 V/2.5 V/3.0 V: Прецизионный источник может быть и по току, и по напряжению, но, в случае токовых выходов, нужно будет ставить операционный усилитель (ОУ) для перехода на напряжение.

### 2. ЦАП источника питания

ЦАП источника питания выбран быстродействующий прецизионный 14-битный токовый ЦАП AD5446YRMZ [4] по схеме однополярного включения, что, в отличие от четырехквadrантного способа реализации хоть и обеспечивает получение только отрицательных напряжений, но управляем на всей полосе преобразования. Управление ЦАП будет осуществлено по SPI протоколу передачи данных. В качестве питающей микросхемы АЦП выбран стабилизатор напряжения LD33 на 3.3 V.

На выходе ЦАП будут использованы два одноканальных ОУ ADA4077-1ARZ [5], первый как оконечный для ЦАП, второй для формирования положительных значений напряжения, т. к. для управления СП требуется подача напряжения обоих фронтов.

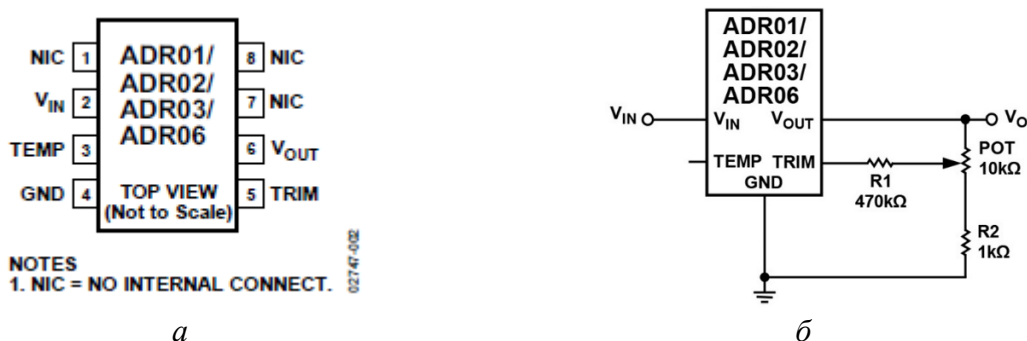


Рис. 2. Схемы включения (а) и подстройки (б) микросхемы опорного напряжения ADR01A

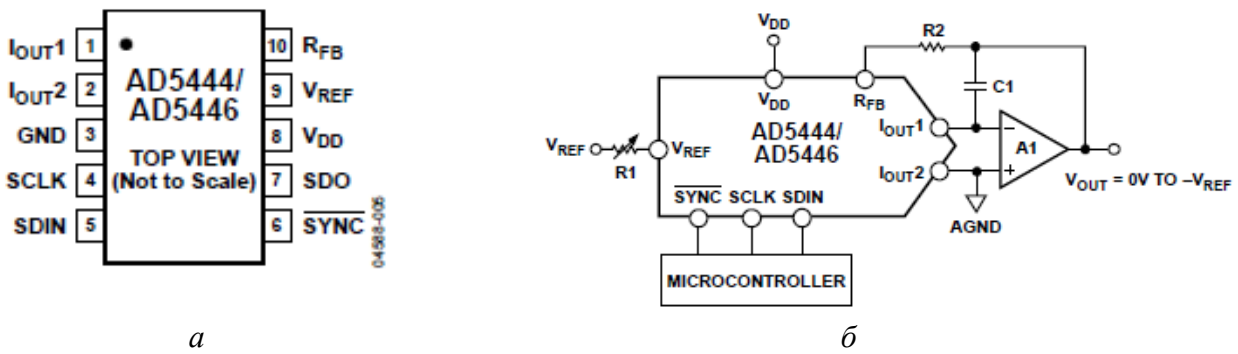


Рис. 3. Схемы включения (а) и работы в однополярном режиме (б) микросхемы ЦАП AD5446YRMZ

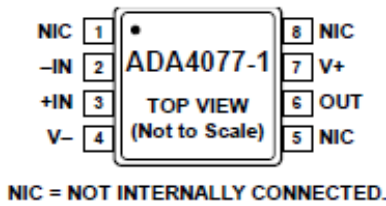


Рис. 4. Схема включения одноканального ОУ ADA4077-1ARZ

### 3. Статический преобразователь напряжения (СПН)

В настоящее время используют двух- или трёхуровневые СПН. Для реализации была выбрана двухуровневая схема с точки зрения соотношения простоты реализации и качества выходных характеристик [6]. Однако реализация самих ключей довольно сложна, в связи с количеством элементов. Поэтому на первом этапе предлагаю сделать силовой ключ и диод с помощью цифро-управляемых аналоговых ключей (ЦУАК).

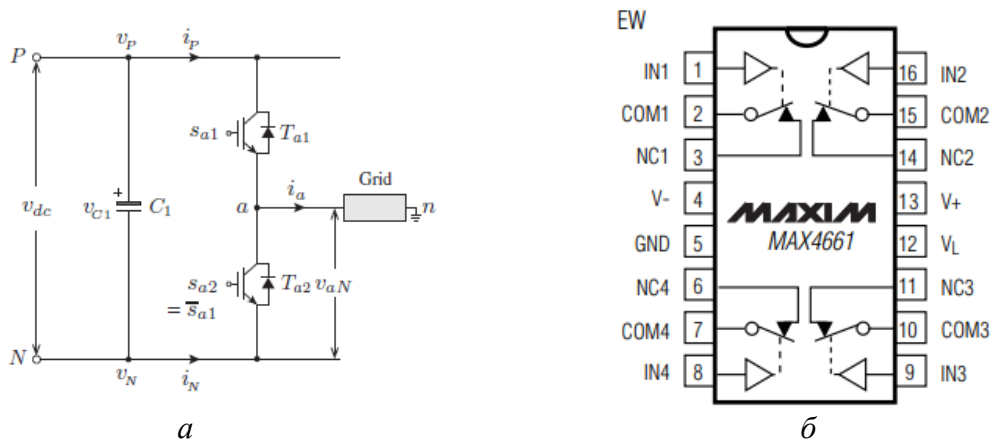
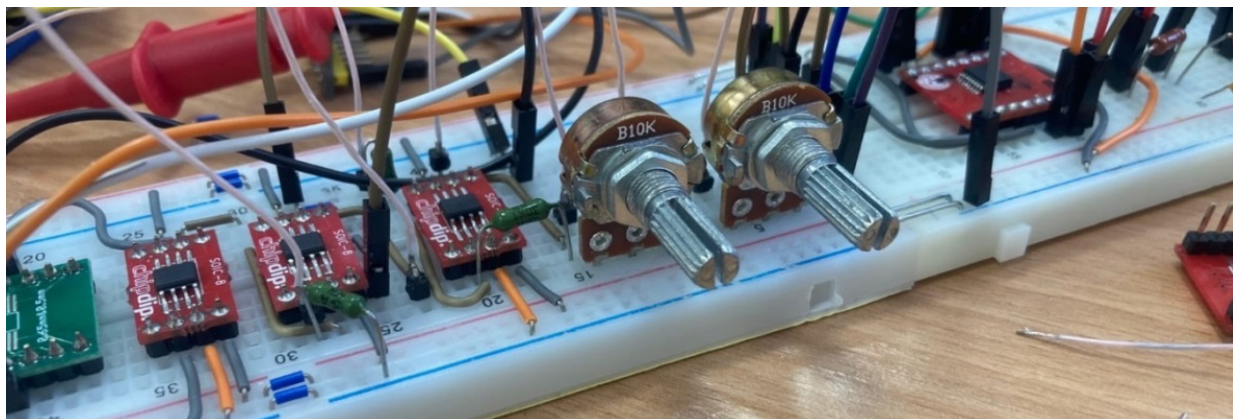


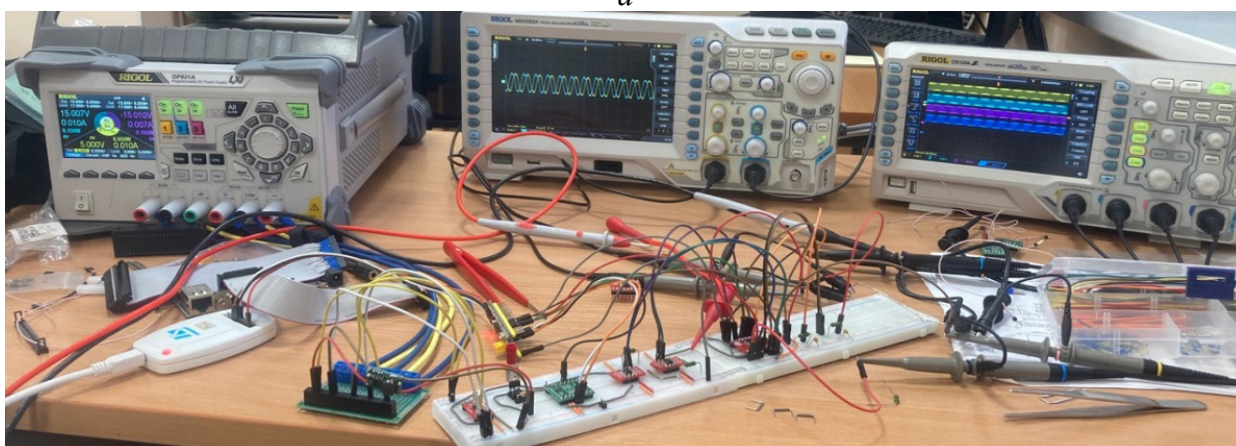
Рис. 5. Реализация СП с ЦУАК (на одну фазу) (а) и схема включения MAX4661

Для физической модели были выбраны два аналоговых КМОП ключа MAX4661 (по четыре нормально закрытых управляемых ключа в каждом) [7]. Управление ключами будет осуществлено по SPI протоколу передачи данных.

Управление всеми ЦАП производится с помощью микроконтроллера STM32F103C8T6, управление ключами осуществляется с помощью основных и комплементарных каналов расширенного таймера TIM1 [8], код был написан в Keil uVision 5. На выходе подключен RC фильтр, рассчитанный на 50 Гц. Итоговый результат сборки физической модели и системы управления силовым преобразователем представлен ниже.



а



б

Рис. 6. Результаты реализации разрабатываемой физической модели СП

### Выводы

В данной работе представлены результаты разработки и реализации двухуровневого силового преобразователя. Проведенные контрольно-экспериментальные исследования с использованием осциллографа подтвердили свойства и возможности разработанной модели, а именно:

- управление прецизионным источником опорного напряжения (оценка уровня выходного сигнала в соответствии с заданным кодом ЦАП);
- формирование положительной и отрицательной полуволн трехфазного напряжения на выходе двухуровневого преобразователя (оценка ШИМ и итоговой частоты выходных синусоид).

Дальнейшая работа над преобразователем будет идти в области настройки системы управления по току и напряжению на его выходе с использованием пакета поддержки «Embedded Coder Support for STM32 Microcontrollers» среды Matlab Simulink.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00204.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A novel approach to validation of a positive-sequence modeling of a converter-interfaced generation with hydrogen energy storage in practical power systems / A.A. Suvorov, A.B. Askarov, V.E. Rudnik et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, iss. 12. – P. 4529–4542.

2. Дунаев М.П. Моделирование универсального полупроводникового преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. –2018. –№ 2 (10). – С. 128–135. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-2-13
3. Data Sheet. ADR01/ADR02/ADR03/ADR06. Analog Devices. 2012.
4. Data Sheet. AD5444/AD5446. Analog Devices. 2012.
5. Data Sheet ADA4077-1/ADA4077-2/ADA4077-4. Analog Devices. 2012.
6. Гельвер Ф.А., И.В. Белоусов Совершенствование структур и алгоритмов управления каскадного преобразователя частоты // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020, Санкт-Петербург, 04–07 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2021. – С. 28–33. – EDN MCNESQ.
7. Data Sheet MAX4661/MAX4662/MAX4663. Analog Devices. 2012.
8. PLL design for inverter grid connection. Simulations for ideal and non-ideal grid conditions – J. Ögren

## СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ НА БАЗЕ ARDUINO

**А.С. Сорогин**

*Тюменский индустриальный университет,  
КЭЭ, гр. ЭКа-20-1*

Научный руководитель: Р.Н. Хамитов, д.т.н., профессор КЭЭ ТИУ

Солнечная панель при нагреве свыше  $25^{\circ}$  с каждым градусом теряет выдаваемую мощность. Солнечные панели в летнее время года работают при температуре  $60\text{--}70^{\circ}\text{C}$ , что снижает их эффективность на  $15\text{--}17\%$ . Кроме снижения эффективности солнечные элементы из-за работы в повышенных температурах начинают деградировать и возникает эффект “hot spot” (рис. 1), который может привести к пожару [1].

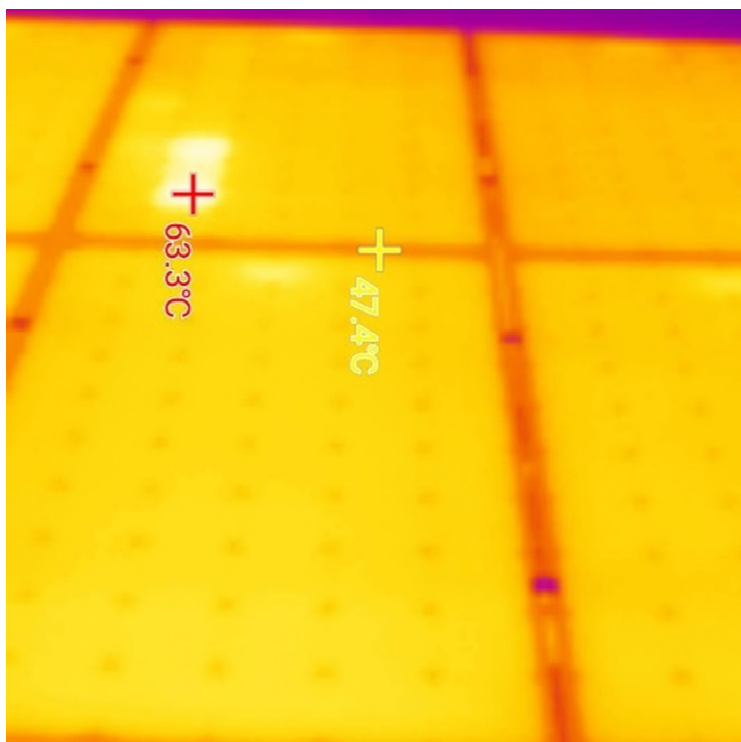


Рис. 1. Фотография тепловизора при возникновении эффекта “hot spot” на солнечной панели