

# РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Дуванов Е.С., Чуркин Д.А.

Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия  
evgenyduvanov@yandex.ru, curkindmitriy@gmail.com

Пашенко А.Ф.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия  
paschenko\_alex@mail.ru

*Аннотация.* В данной работе описан процесс проектирования автоматизированного устройства, предназначенного для сбора показаний микроклимата в жилых и производственных помещениях с целью последующего анализа, а также исследования переходных процессов при применении классических и гибридных методов управления. Особое внимание уделено описанию критериев выбора силовых и логических элементов электрической схемы, обеспечивающих эффективный контроль мощности нагрузки. В качестве практического подтверждения реализован и продемонстрирован пример управления устройством в средах MATLAB Simulink и Simscape с использованием классических алгоритмов управления. Дополнительно проведен анализ потенциала предложенного устройства в части автоматизации сборки и обработки экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* микроконтроллер, электрическая схема, сбор данных, переходные процессы, MATLAB, Simulink, Simscape.

## Введение

Современные подходы к изучению переходных процессов и моделированию динамических систем требуют не только теоретических знаний, но и владения практическими навыками работы с контрольно-измерительными средствами и программными обеспечениями [1-3]. Использование коммерческих решений в исследовательской деятельности часто затруднено вследствие их недоступности при значительном числе обучающихся и ограниченном количестве оборудования. Чтобы обеспечить массовый сбор экспериментальных данных, необходимо масштабируемое и доступное решение, способное устанавливаться в различных точках исследования без значительных финансовых затрат.

Для решения данной проблемы предложена автоматизированная система для сбора данных и проведения практических испытаний, основанная на микроконтроллере ESP32. Устройство автоматически измеряет показатели микроклимата в жилых и производственных помещениях, формируя таблицы необходимых параметров для последующего анализа. Ключевыми преимуществами являются компактные размеры и низкая себестоимость по сравнению с коммерческими аналогами. Система выполняет экспериментальную верификацию теоретических моделей методов управления и автоматизирует процессы сбора и обработки данных.

Данное устройство интегрируется с программными средами MATLAB-Simulink и Simscape, что позволяет выполнять анализ и визуализацию результатов в режиме реального времени, тем самым повышая эффективность научного исследования и образовательного процесса.

В процессе разработки учитывалось требование применения широко распространенных компонентов с целью снижения себестоимости изделия и расширения спектра возможных сценариев его эксплуатации. Указанное обстоятельство обуславливало необходимость детального анализа физических характеристик и технологических ограничений используемых компонентов на этапе проектирования.

## 1. Техническая реализация разработанного устройства

В базовой конфигурации устройство включает следующие основные компоненты: нагревательный элемент в виде резистора сопротивлением 1 кОм, охлаждающий вентилятор формата 30×30 мм, термопара для измерения температуры, программируемый контроллер ESP32 в формате отладочной платы, два транзистора IRF3205 для управления нагрузкой, два оптических драйвера HCPL-3120-000E для управления транзисторами, набор резисторов различных номиналов, набор конденсаторов различных номиналов, линейный стабилизатор напряжения на 15 В, PD (Power Delivery) триггер.

Схема подключения компонентов (рис. 1) разработана в приложении EasyEda. Наличие графической схемы упрощает проектирование печатной платы и визуализирует размещение компонентов и их подключение между собой.

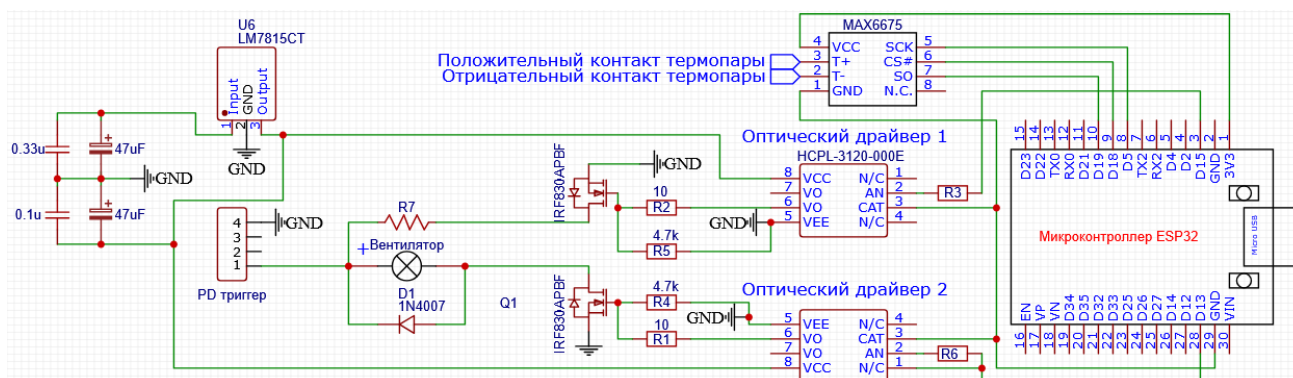


Рис. 1. Разработанная схема подключения компонентов

Данная схема использует современную технологию *Power Delivery*, реализованную в импульсных источниках питания. Она динамически адаптирует выходное напряжение, что позволяет питать экспериментальную схему от стандартного источника на 20 В и обеспечивает стабильную работу устройства.

В качестве транзистора выбран *N*-канальный *MOSFET* *IRF830APBF* (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) с максимальным напряжением сток–исток 500 В и током стока до 5 А в корпусе TO-220AB с полевым эффектом и требующем подачи положительного напряжения на затвор для включения. Выводы подключаются следующим образом: сток (*Drain*) – к отрицательному контакту нагрузки, исток (*Source*) – к минусу питания (или земле), а затвор (*Gate*) служит логическим входом для управления [4].

Оптический драйвер *HCPL-3120-000E* использован для упрощения работы с *MOSFET* транзистором. В технической документации *IRF830APBF* указано минимальное напряжение на затворе для открытия равно 4 вольт [5]. Для управления нагрузкой использован логический микроконтроллер *ESP32* с напряжением питания 3,3 вольт, которого не хватит для управления транзистором, также питание нагрузки равно 20 вольт, не допустимого для питания *ESP32*.

*HCPL-3120-000E* представляет собой оптоэлектронный драйвер силовых IGBT/MOSFET-транзисторов, реализующий гальваническую развязку между цепями управления и силовыми цепями. Его функционирование основано на последовательном преобразовании электрического сигнала в оптический и обратно в электрический с усилением мощности.

Для управления *MOSFET* *IRF830APBF* применяется оптический драйвер *HCPL-3120-000E*, который обеспечивает гальваническую развязку между логикой *ESP32* (работающей на 3,3 В) и силовой частью с нагрузкой в 20 В. Так *ESP32* не способна напрямую открыть транзистор (напряжение на затворе для открытия должно быть 4 В) и не выдерживает 20 В, а *HCPL-3120* преобразует логический сигнал в оптический, затем в усиленный электрический, обеспечивая безопасное и мощное включение *MOSFET*.

Катод подключен к минусу низковольтной части (к земле *ESP32*), анод – к управляющему выводу. Контакты *Vcc* и *Vee* подключены к плюсу и минусу соответственно, а контакт *Vo* соединяется с затвором транзистора. При подаче положительного сигнала на анод загорается светодиод внутри схемы. Свет попадает на оптический транзистор (который открывается при освещении затвора), в результате замыкаются контакты *Vo* и *Vcc*. После подачи отрицательного сигнала на анод контакты *Vo* и *Vcc* размыкаются, а *Vo* и *Vee* замыкаются. В технической документации *HCPL-3120-000E* указано [5], что при подаче на *Vcc* и *Vee* напряжения ниже 12 вольт оптический транзистор не откроется (рис. 2).

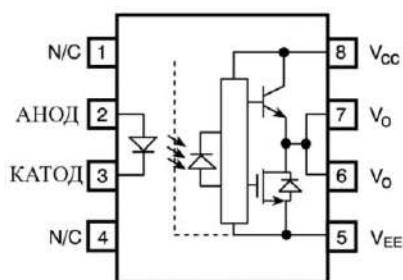


Рис. 2. Схема оптического драйвера *HCPL-3120-000E*



Рис. 3. График выходных характеристик транзистора IRF830APBF

На выходных характеристиках транзистора (рис. 3) наблюдается, что при напряжении затвор-исток  $V_{GS} = 4$  В *MOSFET* не переходит в режим полного насыщения: линия зависимости  $I_D$  от  $V_{DS}$  остается практически линейной, что указывает на ограничение тока стока независимо от  $V_{DS}$ . По оси абсцисс откладывается напряжение сток-исток  $V_{DS}$ , а по оси ординат – максимальный ток стока, при этом каждому значению  $V_{GS}$  соответствует отдельная кривая. При  $V_{GS} = 4$  В ток стока не превышает 1 А, тогда как для полного открытия требуется порядка 10 В. Согласно техническим характеристикам IRF830, максимально допустимое напряжение на затворе составляет  $\pm 20$  В [4].

Для обеспечения ограничения напряжения на затворе до 15 В используется линейный стабилизатор LM7815CT, техническая документация которого рекомендует установку конденсаторов 0,33 мкФ и 0,1 мкФ на выходе для стабильной работы.

Переход транзистора в открытое состояние происходит не мгновенно, а с задержкой, что обусловлено физическими параметрами его структуры. В технической документации указываются два основных параметра, определяющих динамику этого процесса: заряд затвора, необходимый для его открытия, и входная емкость затвора [6]. Для модели IRF830APBF соответствующие значения составляют 22–32 нКл и 600 мкФ соответственно.

Наличие входной емкости затвора (600 мкФ) приводит к тому, что даже незначительные электромагнитные воздействия, способны индуцировать на затворе напряжение, достаточное для его открытия. С целью подавления подобных помех и снижения влияния входной емкости используется резистор «подтяжки», который служит для удержания транзистора в закрытом состоянии при отсутствии управляющего сигнала, создавая соединение затвора с истоком для *P* – канальных транзисторов или общим проводом (землей) для *N* – канальных транзисторов. Выбор его номинала осуществляется с учетом необходимости обеспечения эффективного разряда затвора при минимальном влиянии на скорость переключения. Расчет значения сопротивления производится по формуле:

$$\tau = R \times C, R = \frac{\tau}{C}, \quad (1)$$

где  $C$  – входная емкость затвора,  $\tau$  – время переключения,  $R$  – сопротивление «подтягивающего» резистора.

При управлении затвором с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) частотой 20 кГц период сигнала составляет:

$$T = \frac{1}{20000} = 0,00005 = 50 \text{ мкс}. \quad (2)$$

Следовательно, номинал резистора следует выбирать таким образом, чтобы время переключения удовлетворяло условию  $\tau < 50$  мкс. Для резистора номиналом 4.7 кОм время переключения составляет:

$$\tau = R \times C = (600 \times 10^{-12}) \times 4700 = 2,82 \text{ мкс}. \quad (3)$$

Полученное значение (2.82 мкс) значительно меньше допустимого предела (50 мкс), что подтверждает пригодность выбранного резистора для работы на указанной частоте.

Увеличение сопротивления приведет к возрастанию задержки открытия транзистора. При увеличении задержки выше периода работы ШИМ, транзистор не успеет изменить свое состояние в соответствии с коэффициентом заполнения, что приведет к нестабильной работе устройства.

## 2. Программная реализация управления устройством

### 2.1. Настройка дискретного ПИД регулятора

Перед началом исследований переходных процессов в *MATLAB-Simulink* необходимо загрузить прошивку в микроконтроллер *ESP32*. Так как предполагается взаимодействие с управляющим компьютером, в прошивке реализованы механизмы передачи и приема данных (через *com* порт). Управляющая программа принимает два численных параметра, задающие коэффициенты заполнения ШИМ для управления вентилятором и нагревателем (вторым контуром управления), а также передает данные с датчиков температуры, полученные с термопары.

В качестве метода управления выбран классический ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятора. Математическое описание данного регулятора имеет вид [7]

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \dot{e}(t) \right], \quad (4)$$

где  $u(t)$  – выход регулятора,  $e(t) = y^0(t) - y(t)$  – ошибка регулирования,  $y^0(t)$  – заданное значение выхода,  $K_p$  – пропорциональный коэффициент,  $T_i$  – время интегрирования,  $T_d$  – время дифференцирования.

На вход ПИД-регулятора подается ошибка  $e(t)$ , выход ПИД-регулятора является управляющим воздействием  $u(t)$  для некоторого процесса, управляющего величиной  $y(t)$ .

Поскольку архитектура *MATLAB* подразумевает дискретное моделирование (разбиение времени на шаги фиксированного размера), в работе применяется дискретный тип данного регулятора, описываемый разностным уравнением (рис. 4). Используя метод прямоугольников для вычисления суммы, получим дискретный алгоритм ПИД-регулятора

$$u(k) = K_p \left[ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_i} (e(k) - e(k-1)) \right]. \quad (5)$$

Настройка параметров ПИД-регулятора осуществляется с использованием методов оптимизации, направленных на минимизацию критерия качества управления. Пропорциональный коэффициент  $K_p$  определяет амплитуду управляющего воздействия, прямо пропорционального текущей ошибке. Интегральный коэффициент  $K_i$  отражает накопленный эффект ошибки во времени, способствуя устранению устойчивого смещения выходного сигнала. Дифференциальный коэффициент  $K_d$  обеспечивает реакцию на скорость изменения ошибки, вводя корректирующее влияние и повышая стабильность управления.

Блок *Serial\_Configuration* загружает в модель библиотеку для работы с *COM*-портом. Данный блок содержит основные параметры конфигурации интерфейса подключения, включая номер *COM*-порта, скорость передачи данных.

Блок *Serial\_Receive* передает байтовые данные, поступающие через *COM*-порт, указанный в настройках *Serial\_Configuration*. Позволяет конфигурировать параметры обработки входящего сигнала, а также количество принимаемых байтов или использование терминатора (специального символа для обозначения окончания строки), а также кодировку данных.

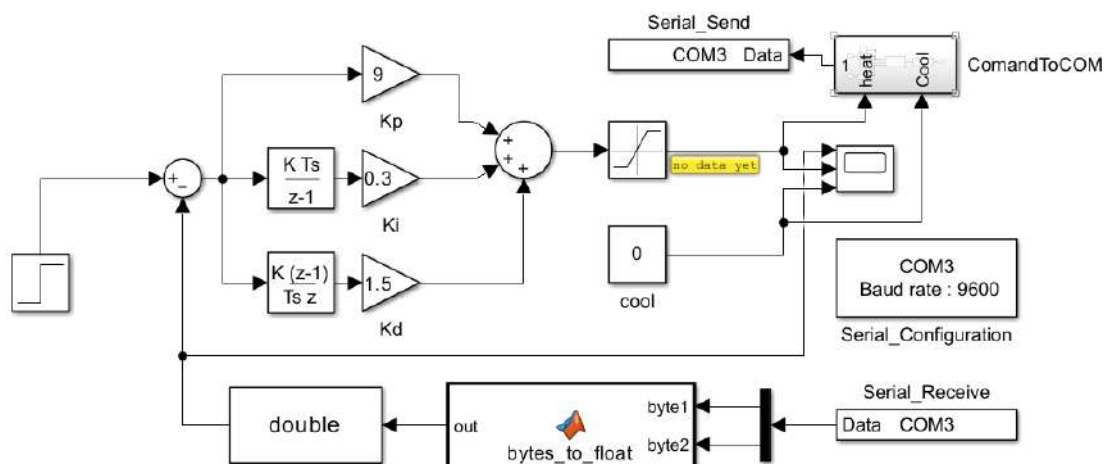


Рис. 4. Схема автоматизированной системы управления устройством с дискретным ПИД-регулятором в *MATLAB-Simulink*

Блок *Serial\_Send* отвечает за передачу данных через *COM*-порт, указанный в конфигурации *Serial\_Configuration*.

*MATLAB-Simulink* использует формат данных *double*, в то время как через *COM*-порт передаются 8-битные целочисленные данные типа *uint8*. Для корректной обработки таких сигналов необходимо преобразовать из *uint8* в *double*. Для такого преобразования сигнала была написана функция *bytes\_to\_float*, преобразующая два числа формата *uint8* в одно число типа *float*.

Логический микроконтроллер ESP32 формирует пакет байтов с показаниями датчиков (обратная связь) и отправляет их через *COM*-порт. Блок *bytes\_to\_float* разбивает полученную строку данных на отдельные байты (по количеству или до символа-терминатора), достигнув конца строки преобразует их в числа с плавающей запятой и переводит в тип *double* посредством блока *Data Type Conversion* для последующей обработки.

## 2.2. Особенности настройки цифровой модели физического устройства

Для цифровой модели физического устройства используется идентичная схема с ПИД-регулятором. В данной схеме отсутствуют блоки для работы с *COM*-портом, а также добавлены блоки из библиотеки *Simscape* для имитации физических свойств компонентов электрической цепи.

В блоке *DC Voltage Source* задаются параметры источника напряжения, приближенные к характеристикам реального блока питания. В блоке *Thermal Resistor* настраиваются параметры резистора приближенные к резистору, установленному на плату. С помощью блока *Switch* обеспечивается коммутация электрической цепи на основании внешнего управляющего сигнала регулятора.

Полученные результаты на физическом объекте и цифровой модели отличаются из-за несоответствия параметров блока *Thermal Mass* характеристикам реальной среды, в которой проводились испытания. В *Simscape* не моделируются теплообмен с воздухом помещения, потоки через щели под дверью и другие внешние явления, влияющие на конечную температуру.

Блок *Thermal Mass* имеет расширенные настройки физических параметров — постоянная или переменная масса, удельная теплоемкость и начальная температура. При точной настройке параметров блока (масса, удельная теплоёмкость и начальная температура), его поведение можно адаптировать для моделирования различных условий окружающей среды (неотапливаемое помещение, открытый воздух или теплоизолированная среда).

В блоке *Conductive Heat Transfer* задаются геометрические и физические параметры теплообмена: форма (плоская или цилиндрическая), площадь контакта, теплопроводность и толщина слоя. Эти параметры определяют интенсивность теплопередачи между нагревательным элементом и окружающей средой [8, 9].

Различие между результатами цифровой модели и реальным физическим экспериментом обусловлено тем, что в модели не учтены такие эффекты, как конвекция воздуха, теплообмен через плохо изолированные стены и другие случайные потоки. Для получения более точного соответствия необходимо проводить испытания в контролируемых условиях, исключая влияние внешних факторов.

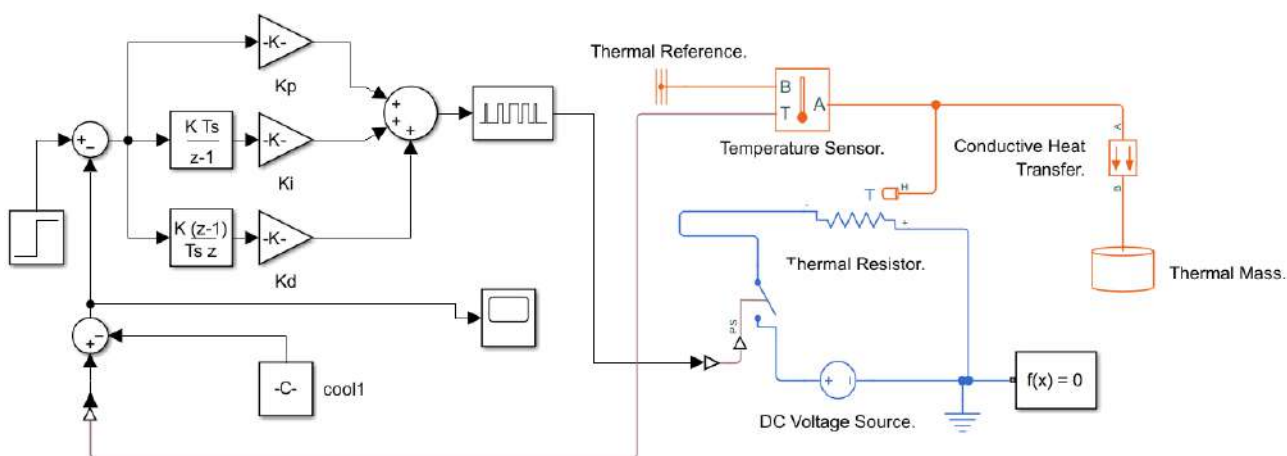


Рис. 5. Цифровая модель разработанного физического устройства с дискретным ПИД-регулятором в *MATLAB-Simulink* библиотеками *Simscape*



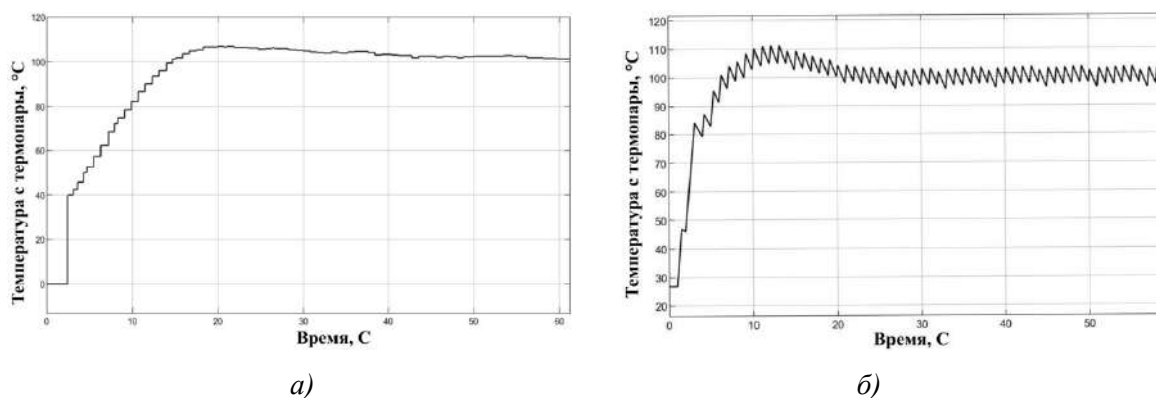


Рис. 6. Графики переходных процессов а) автоматизированной системы управления устройством с дискретным ПИД-регулятором и б) цифровой моделью

На рис. 6 представлены графики переходных процессов автоматизированной системы управления устройством с дискретным ПИД регулятором и его цифровой моделью. Получены коэффициенты  $K_p = 9,003$ ;  $K_i = 0,554$ ;  $K_d = 0,5235$ .

Из графиков видно, что переходный процесс автоматизированной системы управления устройством с дискретным ПИД-регулятором обладает наибольшим временем переходного процесса ( $T_{1\_пп} = 60$  с), в отличие от цифровой модели физического устройства ( $T_{2\_пп} = 25$  с), и одинаковым перерегулированием равным  $110^\circ\text{C}$ . Данные отличия обусловлены большей инерционностью реальной системы, в которой присутствуют задержки, обусловленные массой, теплоемкостью и дополнительными физическими эффектами.

### 2.3. Мониторинг и потенциальное применения разработанного устройства в теплоэнергетике

В современной промышленной теплоэнергетике при создании надежных систем управления необходимо опираться на анализ больших массивов данных, так как они служат основой прогноза потребления и оценки рисков [10-13]. Однако для формирования таких массивов крайне важно иметь не только программную, но и аппаратную платформу.

Разработанное автоматизированное устройство представляет собой систему сбора данных, в состав которой входят логический микроконтроллер *ESP32* с расширительной платой, датчики и специализированные программные модули для дальнейшего их подключения (рис. 7).

На схеме платы расширения представлены следующие компоненты: 2 модуля для термопары типа *K* (*MAX6675*), 2 дополнительных микроконтроллера *Atiny8*, 2 датчика давления (*MS580314BA01*), датчик влажности и температуры (*DHT11*) и датчик углекислого газа (*MG811*). Для стабильной работы компонентов, требуются следующие детали: резистор на  $10\text{k}\Omega$  в количестве 5 штук, конденсатор емкостью  $0.1\mu\text{F}$  в количестве 2 штук.

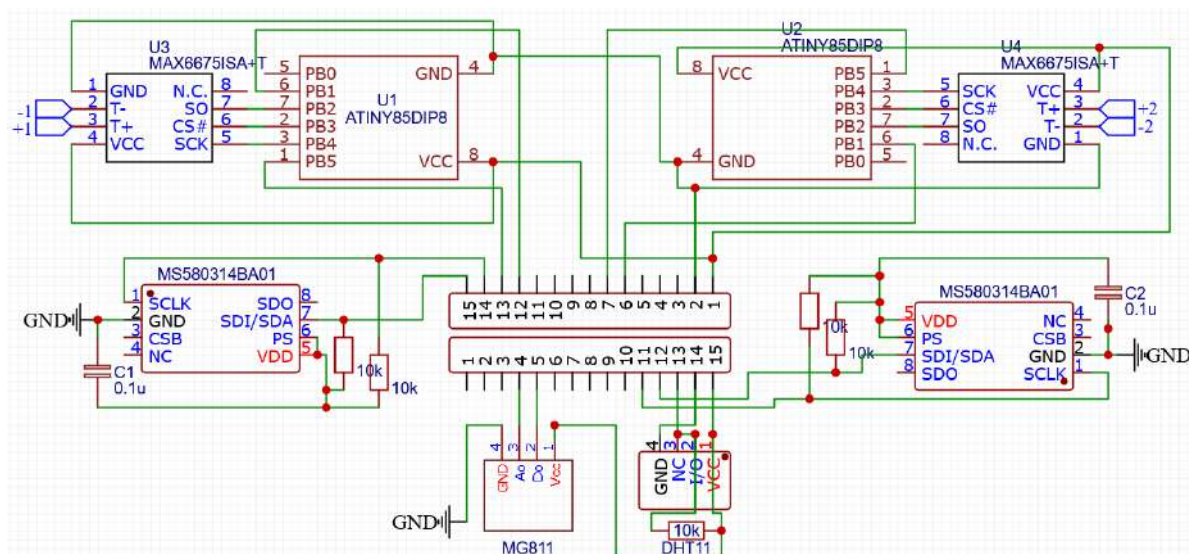


Рис. 7. Разработанная схема платы расширения автоматизированного устройства с датчиками

Предлагается интеграция разработанного автоматизированного устройства с расширительными модулями в учебный стенд кафедры промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «ЛГТУ», представляющий собой модель системы теплоснабжения. Данный стенд позволяет имитировать различные тепловые схемы, включая открытые и закрытые системы отопления, а также тупиковую линию горячего водоснабжения. Исследование параметров давления, расхода и циркуляции воды позволяет анализировать влияние регулировок на эффективность теплоснабжения.

В составе стенда используется тепловычислитель ТСРВ-043, осуществляющий сбор данных о температуре, давлении и расходе, однако он не учитывает параметры микроклимата в помещении, что также может существенно влиять на точность прогнозирования.

Разработанное устройство обеспечивает дополнительный сбор микроклиматических данных, включая температуру воздуха, влажность и другие параметры, и тем самым расширяет возможности анализа [14-15].

Благодаря комплексному подходу к сбору и обработке массива больших данных, автоматизированное устройство может использоваться для повышения точности расчетов за счет формирования дополнительных признаков для создания математической модели прогнозирования с последующей оптимизации режимов теплоснабжения, что особенно актуально для задач энергоэффективности в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве.

### 3. Заключение

В ходе выполнения исследования спроектировано автоматизированное устройство для сбора данных и исследования переходных процессов. Разработанное устройство интегрируется с программными средами *MATLAB-Simulink* и *Simscape*, позволяя проводить анализ переходных процессов при классических и гибридных методах управления [16-18].

В процессе разработки уделено внимание выбору компонентов, обеспечивающих эффективный контроль мощности нагрузки, а также созданию программного обеспечения для взаимодействия с управляющим компьютером.

Благодаря компактным размерам и низкой себестоимости, устройство потенциально может быть использовано для повышения точности расчетов за счет формирования дополнительных признаков при создании математических моделей прогнозирования энергоэффективности. Кроме того, программное обеспечение обладает модульной архитектурой, что позволяет адаптировать его под различные задачи исследований и расширять функциональность в соответствии с требованиями конкретного производства.

Планируется дальнейшее развитие данного малогабаритного автоматизированного устройства и интеграции в него методов машинного обучения и нечеткой логики для локального прогнозирования признаков.

### Литература

1. Duvanov E.S., Kudinov Y.I., Pashchenko F.F., Ponomarev A.A. Analysis and synthesis of the Modified MRAC-MIT system and the MRAC-Lyapunov system // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2020. – P. 521–526.
2. Ponomarev A.A., Kudinov Y.I., Pashchenko F.F., Duvanov E.S. Analysis and synthesis of adaptive PID Controller with MRAC-MIT system // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2020. – P. 527–532.
3. Дуванов Е.С., Кудинов Ю.И., Кудинов И.Ю., Пономарев А.А., Пащенко Ф.Ф., Пащенко А.Ф. Сравнительный анализ модифицированной системы MRAC-MIT и системы MRAC-Ляпунова // Информатика и системы управления. – 2021. – № 1 (67). – С. 31–43.
4. Транзистор IRF830APBF. <https://static.chipdip.ru/lib/410/DOC009410200.pdf> (дата обращения 14.05.2025).
5. Оптический драйвер HCPL-3120/J312. <https://static.chipdip.ru/lib/774/DOC059774173.pdf> (дата обращения 14.05.2025).
6. Стабилизатор напряжения LM7815CT. <https://static.chipdip.ru/lib/230/DOC005230955.pdf> (дата обращения 14.05.2025).
7. Астафьева М.А., Дуванов Е.С., Кудинов Ю.И. Разработка и исследование адаптивного ПИД-регулятора // В книге: автоматизация и информатика. Тенденции развития современной науки. Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. – 2018. – С. 22–24.
8. Kudinov Y.I., Duvanov E.S., Kudinov I.Y., Pashchenko A.F., Pashchenko F.F., Pikina G.A., Andryushin A.V., Arakelyan E.K., Mezin S.V. Construction and analysis of adaptive fuzzy linear quadratic regulator // В сборнике:

- Journal of Physics: Conference Series. 3. Сер. "3rd Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering" – Actual Issues of Thermal Power Engineering and Thermal Engineering. – 2020. – С. 042065.
9. Кудинов Ю.И., Дуванов Е.С., Кудинов И.Ю., Пащенко А.Ф., Пащенко Ф.Ф., Андрюшин А.В., Аракелян Э.К., Мезин С.В., Пикина Г.А. Разработка и исследование нечеткого квадратичного регулятора температуры // В сборнике: Современные проблемы теплофизики и энергетики. материалы III международной конференции. – Москва. – 2020. – С. 582–583.
  10. Габидуллин А.И., Бускин Р.В. Использование искусственного интеллекта в теплоэнергетике. Перспективы развития // Тенденции развития науки и образования. – 2024. – № 105–14. – С. 118–121.
  11. Корченко М.Д. Способы применения нейросетей в энергетике // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 6 (75). – С. 1444–1448.
  12. Гарифуллин Р.Ф. Будущее нейросетевых исследований в сфере энергетики // В сборнике: Технические и естественнонаучные исследования современной России: проблемы, тенденции развития. Сборник научных статей. – Волгоград, 2024. – С. 182–184.
  13. Моисеев И.А., Берсенева И.А. Использование нейросетевых алгоритмов в энергетике для прогнозного регулирования // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 71–73.
  14. Pashchenko A.F., Rassadin Yu.M. Microclimate Monitoring System Design for the Smart Grid Analysis and Constructive Parameters Estimation // IFAC-PapersOnLine. – М.: Elsevier, 2022. – Vol 55. – P. 479–484.
  15. Пащенко А.Ф., Базенков Н.И., Петров И.В., Рассадин Ю.М., Серeda Л.А., Шушко Н.И. Работы и проекты центра интеллектуальной электроэнергетики ИПУ РАН // Датчики и системы. – 2024. – №2 (274). – С. 3–11.
  16. Pashchenko F.F., Kudinov Y.I., Pashchenko A.F., Duvanov E.S. Fuzzy quadratic control of thermal object // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). – IEEE, 2019. – P. 288–293.
  17. Duvanov E.S., Fedyanin T.V., Pashchenko A.F. The Feasibility of Using a Predictive Neural Network Controller in the Problem of Maintaining the Water Level in a Reservoir // 2024 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD). – IEEE, 2024. – P. 1–5.
  18. Кудинов Ю.И., Дуванов Е.С., Сизых П.А., Пономарев А.А., Раимжонов А.И. Программная реализация системы управления тепловым объектом с использованием контроллера Siemens Simatic S7-1200 // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2021. – № 1 (44). – С. 16–21.