

УДК 621.389

## Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополнительным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры

Собко А. А., Осинцев А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р.

**Актуальность работы:** Для создания новых устройств часто нет новых методик. Одним из таких устройств является климатическая ТЕМ-камера со специализированной системой автоматического регулирования температуры. В таких системах широко используются элементы Пельтье (ЭП). В задаче терморегулирования с использованием ЭП, необходимо изменять направление и амплитуду тока, изменяя полярность и напряжение электропитания ЭП. Для этого необходимо использовать реверсивный преобразователь, например, на базе классической мостовой схемы. Однако для управления такой схемой требуется не менее двух управляющих сигналов, например, широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что усложняет управление большим количеством мостовых схем с ЭП. Так, в терморегуляторе климатической ТЕМ-камеры необходимо 24 ЭП. При этом одновременное включение 24 ЭП, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры, приведёт к неравномерному нагреву, что нарушит распределение электромагнитного поля внутри ТЕМ-камеры. Для обеспечения равномерного распределения температуры можно использовать распределённую систему управления группой ЭП, работающих в многофазном режиме, с разделением по времени. **Цель работы** – разработать методику управления группой ЭП и создать реверсивный преобразователь для управления ЭП, сигналом ШИМ, с возможностью его включения в состав терморегулятора климатической ТЕМ-камеры. **Новизна работы:** для новой запатентованной климатической ТЕМ-камеры разработаны методика управления группой ЭП и алгоритм контроля температуры, отличающиеся наличием автоматизированной системы управления с обратной связью в виде программного пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Создан реверсивный преобразователь для управления электропитанием ЭП, отличающийся тем, что полномостовая схема (H-мост), обеспечивающая смену полярности напряжения на ЭП, соединена относительно источника электропитания последовательно с ключевым элементом, управляющим средней мощностью электропитания ЭП. **Результат:** описаны методика управления группой ЭП и алгоритм контроля температуры ТЕМ-камеры, обеспечивающие распределённое управление группой ЭП с поддержкой многофазного режима работы, путём объединения ЭП в группы, управление которыми разнесено во времени. Показана возможность управления электропитанием ЭП посредством одного ШИМ сигнала с изменением полярности сигналом реверса и применением многофазного электропитания группы ЭП. Выполнены моделирование и эксперимент по управлению электропитанием ЭП реверсивным преобразователем, обеспечивающим токи до 10 А, в двух направлениях через ЭП, с управлением средней мощностью посредством ШИМ сигнала. Приведены схемы и представлен макет терморегулятора на базе ЭП. Представлены осциллограммы токов и напряжений на реверсивных преобразователях с ЭП. **Практическая значимость:** разработанный реверсивный преобразователь позволяет обеспечить мощность на ЭП до 91 Вт, с управлением средней мощностью одним ШИМ сигналом и КПД 81,8% и может быть включен в состав терморегулятора климатической ТЕМ-камеры для равномерного локального нагрева или охлаждения внешних стенок ТЕМ-камеры, что позволит прецизионно поддерживать заданную температуру в её внутреннем объеме.

**Ключевые слова:** элемент Пельтье, распределённая система управления, система автоматического управления, ПИД-регулятор, мостовая схема, реверсивный преобразователь, широтно-импульсная модуляция, многофазное управление электропитанием.

### Библиографическая ссылка на статью:

Собко А. А., Осинцев А. В., Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополнительным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 323-341. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10413.

### Reference for citation:

Sobko A. A., Osintsev A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Methodology of a group of Peltier elements control by means of reversible converters with an optional power control switch for climatic TEM-chamber. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 4, pp. 323-341. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10413 (in Russian).

### Актуальность

Термоэлектрические элементы на основе эффекта Пельтье нашли широкое применение [1-3], в особенности при терморегулировании систем на кристалле [4], мощных полупроводниковых лазеров [5-7] и перестраиваемых СВЧ генераторов [8]. Например, разработка специального терморегулятора на элементе Пельтье (ЭП) позволила исследовать оптические эффекты в кристаллах при поддержании их стабильной заданной температуры [9], а терморегулятор с использованием ЭП позволил повысить экономию электроэнергии в жилых помещениях [10]. Таким образом, применение ЭП актуально для разработок новых систем терморегулирования, в том числе для прецизионных радиоэлектронных средств.

В задаче терморегулирования с использованием ЭП, необходимо изменять амплитуду и направление электрического тока, изменяя полярность напряжения электропитания на ЭП. Для решения этой задачи может быть использована однофазная мостовая схема, состоящая из двух стоек с ключевыми элементами, также называемая схемой типа Н-мост [11, 12]. В данной схеме ток нагрузки в импульсе и паузе управляется транзисторами, чем обеспечивается возможность протекания тока в обоих направлениях. Известны реверсивные преобразователи электроэнергии [13-16], предназначенные для изменения направления постоянного тока сменой полярности напряжения. Например, в работе [16] описан реверсивный однофазный мостовой транзисторный преобразователь, позволяющий осуществлять реверсивный запуск и работу электродвигателя постоянного тока в обратном направлении, что позволяет расширить функциональные возможности электродвигателя постоянного тока, используя реверсивный запуск и работу двигателя постоянного тока от одной мостовой схемы. При этом для управления традиционными мостовыми схемами необходимо наличие не менее двух управляющих сигналов, например широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что усложняет управление большим количеством мостовых схем с ЭП. Так, в терморегуляторе, для создания новой климатической экранированной камеры [17], необходимо не менее 24 ЭП для равномерного нагрева и охлаждения внутреннего объема ТЕМ-камеры.

ТЕМ-камера должна удовлетворять возможности распространения поперечных электромагнитных волн в широком диапазоне частот с минимальным рассогласованием контрольно-измерительного тракта. При этом одновременное включение 24 ЭП, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры, приведёт к неравномерному нагреву, с возникновением значительных термических напряжений [18], вплоть до деформации конструкции. Это повлияет на распределение электромагнитного поля в камере вследствие сжатия/расширения материала и изменения геометрии ТЕМ-камеры, что недопустимо в соответствии с техническими требованиями. Одним из возможных вариантов решения данной задачи видится использование распределенной системы регулирования (управления) электропитания, частным случаем которого является многофазное управление [19-21]. Подобное электропитание используется, например, для электропитания ядер процессора, что позволяет оптимально распределить токи по

драйверам, ключам и фильтрам электропитания процессора [22]. Алгоритмы управления подобных систем основываются на специализированных пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторах: комбинированные, каскадные и т.д. Учитывая рост производительности вычислительных средств, в том числе микроконтроллеров (МК), для решения подобного класса задач, в последнее время, активно проводят исследования в областях нейронных сетей и методов машинного обучения, что позволяет добиться наибольшего качества управления и уменьшения времени для достижения результата. Такое решение позволит реализовать распределение энергии по группе ЭП, обеспечивающее равномерный нагрев или охлаждение поверхности и внутреннего объема ТЕМ-камеры.

Таким образом, актуальна разработка методики управления группой ЭП многофазным электропитанием и реверсивным преобразователем для терморегулятора новой климатической ТЕМ-камеры.

### Методика

ТЕМ-камера представляет собой три объемные части корпуса с прямоугольным поперечным сечением. Две части имеют линейное сужение поперечного сечения, выполненное в форме пирамидального рупора, а третья имеет форму прямоугольного параллелепипеда с регулярным поперечным сечением вдоль корпуса камеры. Полный режим работы климатической ТЕМ-камеры соответствует температурным диапазонам от  $+26^{\circ}\text{C}$  до минус  $50^{\circ}\text{C}$  и от минус  $50^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ . Максимальная холодопроизводительность системы при охлаждении от  $+150^{\circ}\text{C}$  до минус  $50^{\circ}\text{C}$  составляет около 1 кВт [23]. Расположение ЭП на стенках корпуса ТЕМ-камеры (рис. 1) ограничено размерами применяемых ЭП (1) температурных датчиков (2) и печатных плат (3) для обеспечения работоспособности применяемых температурных датчиков. В работе использованы ЭП ТЕС1-12712 с максимальным током 12,5 А, тепловой мощностью 110 Вт и размером  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Помимо ЭП, необходимы прецизионные температурные датчики (ПЦДТ), для мониторинга температуры и обеспечения обратной связи регулятора, при этом необходимо располагать их таким образом, чтобы иметь точное представление о градиенте температуры всей поверхности ТЕМ-камеры. Также расположение всех элементов на камере ограничиваются наличием проводных отводов питания, заземления, управления и обратной связи, что необходимо учитывать при разработке.

Поскольку на двух частях ТЕМ-камеры, выполненных в виде рупора, располагается по одному ЭП ( $A$  и  $F$ ), в то время как в центральной части расположены 4 ЭП ( $B-E$ ), при одновременном включении всех ЭП с одинаковым уровнем мощности не удастся достичь равномерного нагрева. На каждый ЭП приходится различная площадь поверхности, и на каждую группу ЭП приходится различный объем внутри ТЕМ-камеры с общим максимальным объемом 3,5 дм<sup>3</sup>. Таким образом, для равномерного нагрева/охлаждения поверхности ТЕМ-камеры и её внутреннего объема, необходимо рассчитывать управляющий сигнал ШИМ для каждого ЭП ( $A-F$ ) исходя из эффективности терморегуляции части поверхности, находящейся под ЭП на пирамидальных частях камеры.

Поскольку классический ПИД-регулятор рассчитывает сигнал управления только одного объекта, то для управления группой объектов и контроля температуры поверхности ТЕМ-камеры разработан алгоритм распределенной системы регулирования (управления) электропитания ЭП, учитывая обратные связи от ПЦДТ.

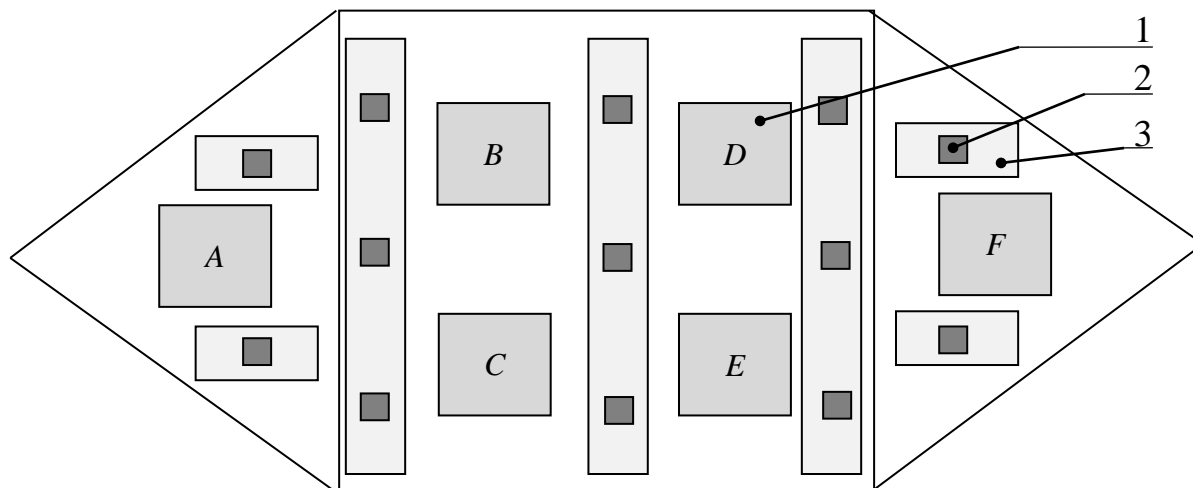


Рис. 1. Схема размещения ЭП и ТД на поверхности ТЕМ-камеры

Операции, участвующие в процессе работы распределенной системы регулирования, представлены на рис. 2. Целью данного алгоритма является регулирование температуры поверхности ТЕМ-камеры. Ядром алгоритма является автоматизированная система управления с обратной связью в виде программного ПИД-регулятора.

Алгоритм содержит блок автоматического управления на основе ПИД-регулятора, в котором и происходит расчет ШИМ сигнала, управляющего термоэлектрическими ЭП. На первом шаге алгоритм выполняет: инициализацию программных структур; загрузку данных из энергонезависимой памяти, в частности коэффициенты ПИД-регулятора, счетчиков, констант; инициализацию ПЦДТ.

На втором шаге происходит опрос ПЦДТ и запись результата в массив *temp\_read*. Далее блок ПИД-регулятора обрабатывает массив данных о температуре и заполняет массив *PID\_result*, содержащий *Sig* «коэффициент» сигнала управления термоэлектрических ЭП. После того, как расчеты в блоке ПИД-регулятора выполнены, происходит подготовка к началу работы фазы определенной группы ЭП, в которую входит загрузка параметров работы многофазности, определяющих: длительность работы каждой фазы, порядок работы фаз, условия начала и окончания работы фазы питания. Весь процесс работы климатической ТЕМ-камеры контролируется. Отслеживается состояние системы с целью выявления ошибок и сбоев, которые оказывают влияние на результаты исследования, а в критичном случае могут привести к возникновению аварийной ситуации. В случае регистрации ошибки, в зависимости от классификации её серьезности, принимается решение о прекращении работы климатической ТЕМ-камеры, либо (если это незначительная ошибка, возникшая единожды за

все время работы) работа в ТЕМ-камере будет продолжена, но информация об этом инциденте будет показана оператору при окончании работы.

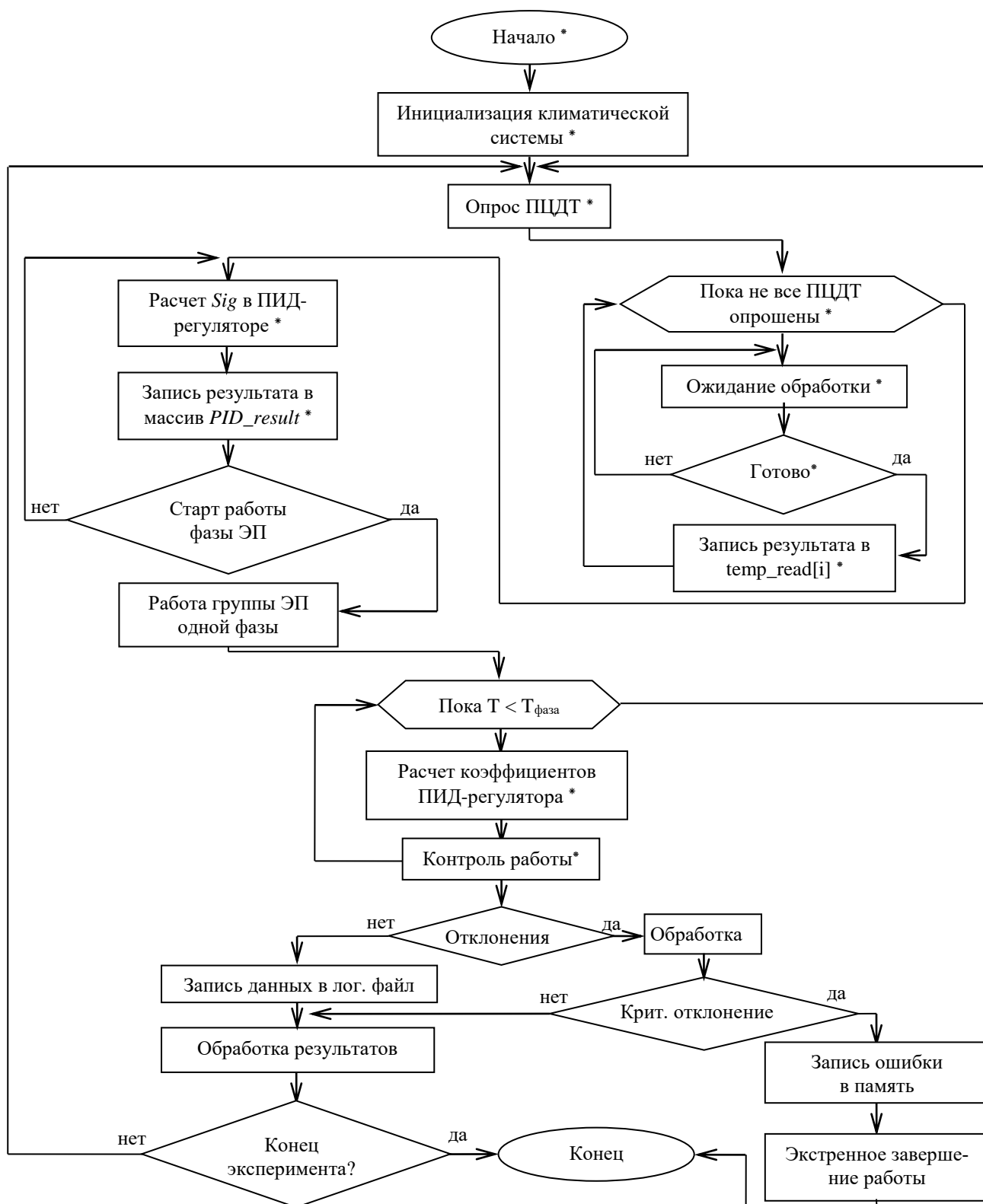


Рис. 2. Алгоритм контроля температуры климатической ТЕМ-камеры, где блоки распределенной системы регулирования отмечены (\*)



### Реверсивный преобразователь

Для точного регулирования мощности и возможности изменять амплитуду и направление тока протекания, изменяя полярность напряжения электропитания на ЭП, разработан реверсивный преобразователь (рис. 3). Он отличается тем, что две пары активных ключевых элементов (АЭ) АЭ1–АЭ4 соединены относительно источника электропитания последовательно с ключевым элементом АЭ5 и позволяют управлять направлением тока через ЭП и средней мощностью, используя один сигнал реверса (1 или 0) и один ШИМ сигнал. Использование одного ШИМ сигнала, управляющего элементом АЭ5, снижает риск возникновения сквозного тока через стойки мостовой схемы. Применение управляющих элементов (УЭ) УЭ1 и УЭ2, позволяет преобразовать уровень управляющего сигнала до необходимого уровня срабатывания элементов АЭ1–АЭ4. Элемент УЭ3 аналогично является преобразователем уровня ШИМ сигнала для элемента АЭ5. Появление одновременно высокого уровня напряжения на выходе УЭ1 и УЭ2 исключается использованием линии задержки ЛЗ и инвертора, который также предназначен для изменения направления тока протекания через ЭП в зависимости от режима его работы (нагрев или охлаждение). Для снижения уровня кондуктивных помех по цепям электропитания, в схеме предусмотрены слаботочный (Ф1) и сильноточный (Ф2) фильтры.

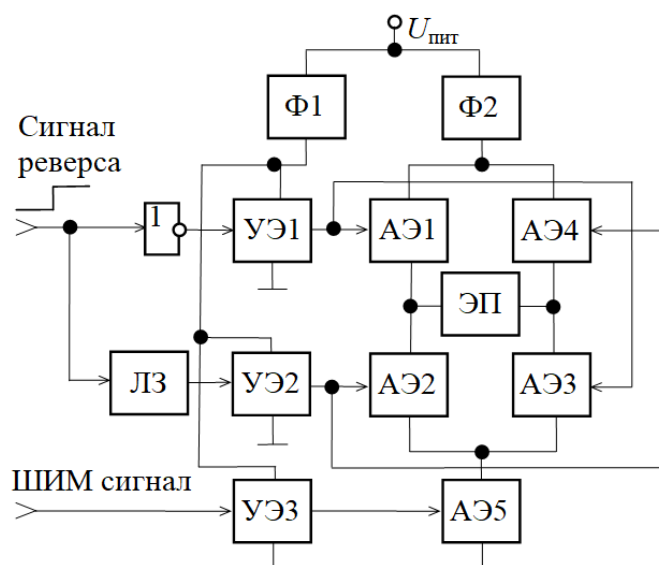


Рис. 3. Структурная схема реверсивного преобразователя для электропитания ЭП

В зависимости от электрических характеристик элементов АЭ1–АЭ5, возможно управлять температурой поверхностей одного и более ЭП. Управление режимом работы осуществляется сигналом реверса от МК или микропроцессора (МП), который поступает на инвертор и линию задержки. При поступлении на инвертор низкого уровня сигнала, на элементе УЭ1 устанавливается инвертированный высокий уровень сигнала, а на элемент УЭ2 сигнал проходит через линию задержки, значение которой выбрано равным задержке сигнала в инверторе. Протекание тока через ЭП возможно при подаче на вход УЭ3 управляющего ШИМ сигнала от МК или МП. Элемент УЭ1 вводит пару диагно-

нальных элементов АЭ1 и АЭ3 в режим насыщения. При этом пара диагональных элементов АЭ2 и АЭ4 находится в режиме отсечки. В зависимости от того, в каком режиме находится элемент АЭ5, через ЭП протекает требуемое значение тока, определяя мощность нагрева ЭП. Для охлаждения этой же стороны ЭП, необходимо сменить направление тока через ЭП. Для этого на инвертор и ЛЗ подаётся высокий уровень сигнала реверса от МК или МП. При этом пара диагональных элементов АЭ2 и АЭ4 перейдет в режим насыщения, а пара диагональных элементов АЭ1 и АЭ3 – в режим отсечки, тем самым протекание тока будет осуществляться по диагонали мостовой схемы. Также для защиты от сквозных токов предусмотрена и программная защита, реализуемая в программе МК, предполагающая отключение управляющего ШИМ на время переключения сигнала реверса. Средняя мощность на нагрузке регулируется изменением коэффициента заполнения  $D$  и частоты  $f$  управляющего ШИМ сигнала. Такой подход позволяет управлять мощностью ЭП посредством ШИМ сигнала с возможностью изменять направление тока в нагрузке сигналом реверса. Для достижения и прецизионного поддержания заданной температуры ЭП, в МК реализуется ПИД регулятор, выполняющий расчет коэффициента заполнения выходного (управляющего) ШИМ сигнала исходя из данных о температуре ЭП, при этом сам ЭП не обесточивается, пока происходят нагрев и удержание заданной температуры.

На основе структурной схемы управления ЭП (рис. 3), разработана принципиальная схема (рис. 4). В качестве ключевых элементов в плечах схемы выбраны комплементарные пары полевых транзисторов с каналами р- и n-типа, низким сопротивлением сток-исток и малым (40–50 нс) временем переключения.

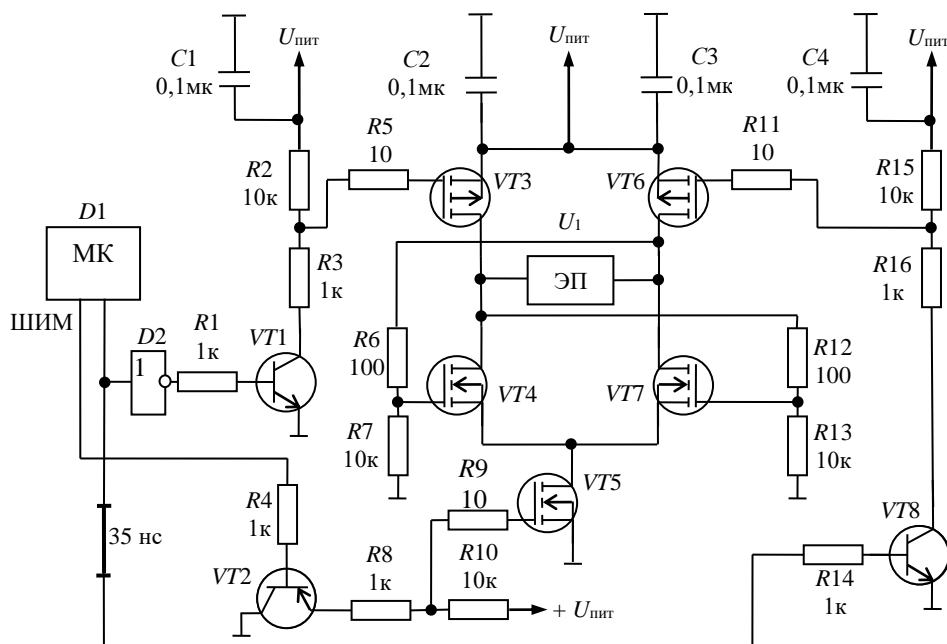


Рис. 4. Принципиальная схема реверсивного преобразователя для электропитания ЭП

В частности, при положительном электропитании, для элементов АЭ1, АЭ4 выбраны транзисторы IRF9540N, а для АЭ2, АЭ3, АЭ5 – IRFZ46N. В каче-

стве управляющих элементов УЭ1, УЭ2 выбраны биполярные транзисторы BC547A, а для УЭ3 выбран BC557A. Изменение уровня сигнала реверса, задающего режим работы, выполняется инвертирующим буфером HEF4049. Для уменьшения количества управляющих элементов затворы транзисторов VT4 и VT7 включены по диагонали к стокам транзисторов VT3 и VT6. Управление транзистором VT5 осуществляется ШИМ сигналом от МК ATmega2560. Преобразование уровня ШИМ сигнала для VT5 осуществляется биполярным транзистором VT2 (BC557A). Необходимое напряжение на затворах для насыщения полевых транзисторов обеспечивается усилительными каскадами по напряжению на биполярных транзисторах VT1, VT2, VT8. Нагрузочные резисторы R2, R10, R15 в цепях коллектора транзисторов VT1, VT2, VT8 необходимы для установки уровня управляющего сигнала. Резисторы R5, R9, R11 обеспечивают ограничение тока заряда емкостей «затвор-исток»  $C_{зи}$  полевых транзисторов. При высоком уровне сигнала на VT1 и соответственно, низком на VT8, ток в реверсивном преобразователе протекает по цепи VT6, ЭП, VT4 и VT5. При смене уровней сигналов ток протекает через VT3, ЭП, VT7 и VT5.

### Моделирование и эксперимент

Выполнено моделирование разработанного реверсивного преобразователя в программе LTspice. Частота ШИМ сигнала выбрана 245 Гц исходя из результатов экспериментов, показавших снижение эффективности нагрева ЭП с ростом частоты управляющего ШИМ сигнала, при малых коэффициентах заполнения, а также из модуля импеданса ЭП, измеренного при помощи RLC измерителя Rohde&Schwarz HM8118. Они показали незначительное его изменение в диапазоне  $850 \pm 2$  мОм на низких частотах и существенное увеличение до 900 мОм на частотах выше 24 кГц.

При моделировании схемы получена максимальная сила тока через ЭП 9,5 А с амплитудой напряжения 8 В (рис. 5). При моделировании, ЭП заменен на сопротивление, имитирующее ЭП, значение которого выбрано исходя из измеренного на заданной частоте значения.

Разработана топология печатной платы (ПП), по которой создан экспериментальный макет с двумя реверсивными преобразователями для управления двумя ЭП. При трассировке ПП проведена минимизация паразитных электромагнитных связей между трассами, в частности уменьшены количество пересечений и протяженность печатных проводников, находящихся на разных слоях ПП. Силовые проводники, по которым протекают токи до 10 А для ЭП, реализованы шириной не менее 3 мм при толщине фольги 35 мкм. Выполнена минимизация габаритов ПП и реализована возможность принудительного охлаждения полевых транзисторов.



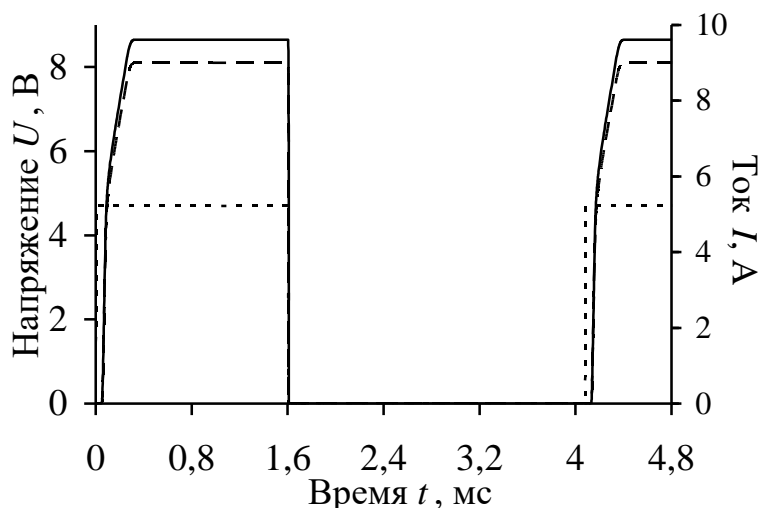
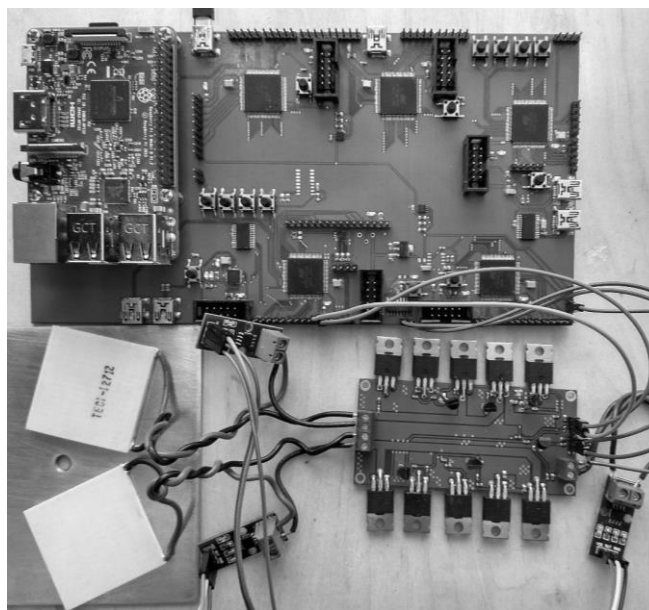
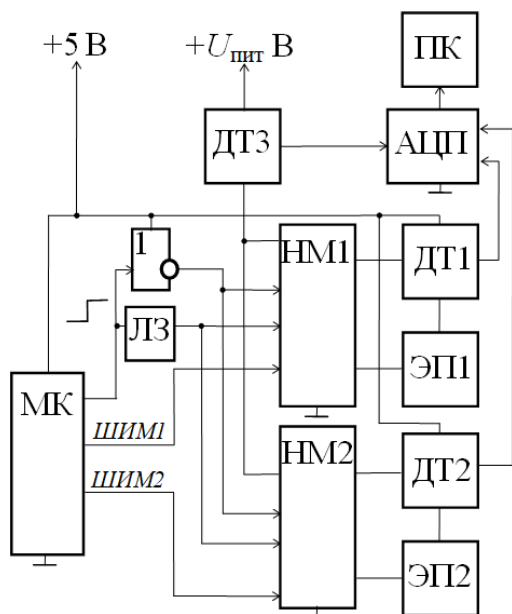


Рис. 5. Результаты моделирования напряжения (---) и тока ЭП (—), управляющий ШИМ сигнал (- - -)

Разработанная ПП использована в экспериментальном макете (рис. 6) терморегулятора климатической экранированной камеры, который содержит разработанные реверсивные преобразователи (НМ1, НМ2), датчики тока (ДТ1–ДТ3), ЭП (ЭП1, ЭП2) и плату управления с группой из 5 МК ATmega2560, из которых 4 отведены для независимого управления электропитанием ЭП через реверсивные преобразователи НМ1, НМ2. Значения температуры поверхности нагреваемой/охлаждаемой группой из 4 ЭП, измеряются 9 температурными датчиками и передаются в МК по интерфейсу связи I<sup>2</sup>C. В МК реализовано программное обеспечение, осуществляющее усреднение данных о температуре вблизи каждого ЭП, расчёт коэффициентов заполнения ШИМ-сигналов для поддержания заданной температуры каждым ЭП и задержки по времени каждого из 4 ШИМ-сигналов относительно друг друга, обеспечивая многофазность, путём разнесения во времени периодов работы каждого ЭП. Каждый МК содержит 16 независимых выходов аппаратного ШИМ сигнала и аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и может управлять 4 группами по 4 ЭП.

На рис. 6 показан вариант терморегулятора с 2 ЭП, поверхность ТЕМ-камеры имитирует медная пластина 100x100 мм. В качестве управляющего сигнала использован ШИМ сигнал частотой  $f=245$  Гц с различными коэффициентами заполнения  $D_+$ .

Измерение амплитуд напряжений и токов выполнено двумя методами: при помощи осциллографа Keysight EDUX 1002G и датчиков тока ACS712-20В. При измерении тока в цепи ЭП и питания последовательно включались шунты сопротивлением 0,01 Ом, напряжение на которых измерялось осциллографом. Сигналы от трёх датчиков тока ACS712-20В оцифровывались АЦП МК и передавались в ПК. Датчиками ДТ1 и ДТ2 измерялись токи, через ЭП1 и ЭП2, а датчиком ДТ3 измерялся суммарный ток потребления через два реверсивных преобразователя и два ЭП. Время измерения датчика тока составляло 5 мкс, ошибка измерения  $\pm 1,5\%$  [24].

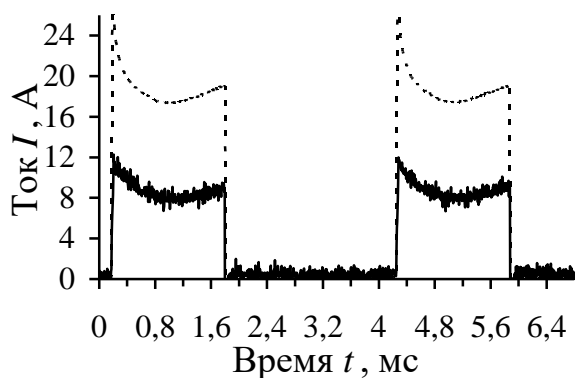


а

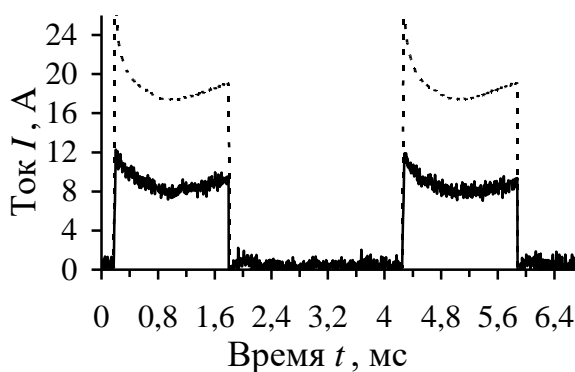
б

Рис. 6. Структурная схема (а) и экспериментальный макет (б) терморегулятора для климатической ТЕМ-камеры

Для лабораторного макета и проверки многофазного управления электропитанием ЭП [25] в однофазном режиме работы (одновременное включение ЭП) в качестве управляющего сигнала использовался ШИМ сигнал частотой  $f=245$  Гц, с коэффициентом заполнения  $D=40\%$ , что соответствует длительности импульса  $W_+=1,6$  мс и времени между импульсами  $W_-=2,47$  мс. Импульсы токов (рис. 7) каждого ЭП достигали значения  $I_1=I_2=9,5$  А, а суммарный ток потребления составлял около  $I_3=19$  А совместно с двумя реверсивными преобразователями и двумя ЭП. При этом форма импульсов отличается наличием выбросов длительностью до 0,2 мс, которые могут быть обусловлены паразитными параметрами ЭП [26].



а



б

Рис. 7. Амплитуда импульсов тока через ЭП1 (а), ЭП2 (б) (—) и суммарный ток электропитания двух реверсивных преобразователей с ЭП (- - -)

В двухфазном режиме два управляющих сигнала с аналогичными параметрами, представленными выше ( $f=245$  Гц,  $D=40\%$ ), разносятся по времени на 2 мс, чем обеспечивается сдвиг фазы электропитания на  $180^\circ$  для каждого ЭП

(рис. 8). Таким образом, двухфазный режим позволил снизить единовременный суммарный потребляемый ток от источника питания до  $I_3=9,5$  А, что примерно равно току потребления одного ЭП  $I_1=I_2=9,5$  А. Длительность выброса при этом сократилась до 5 мкс.

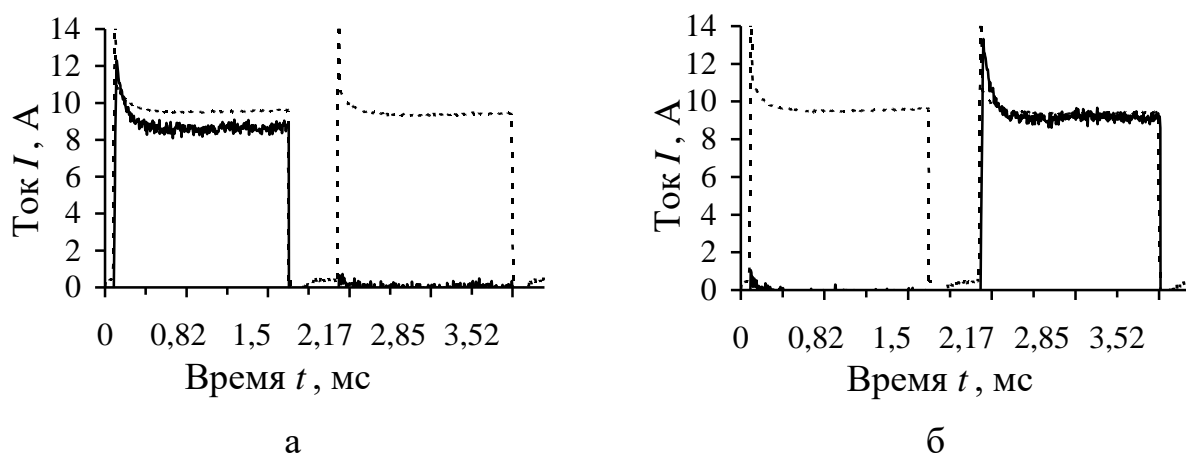


Рис. 8. Импульсы тока на ЭП1 (а) и ЭП2 (б) (—) и суммарный ток электропитания двух реверсивных преобразователей (- - -) для двухфазного режима работы

В 4-фазном режиме электропитания ЭП, управляющий сигнал выбран частотой  $f=121$  Гц, с коэффициентом заполнения  $D=20\%$ , что соответствует длительности импульса  $W_+=1,62$  мс и времени между импульсами  $W_-=6,63$  мс, со сдвигом импульса относительно первого, 2,06, 4,13, и 6,18 мс, для каждого последующего, соответственно. Тем самым, в 4-фазном режиме сдвиг фазы составляет  $90^\circ$ , что позволило обеспечить суммарный ток  $I_3$  потребления реверсивными преобразователями с ЭП, не более тока потребления одного ЭП, около 9,5 А.

### Усовершенствование преобразователя

Измерения энергетических характеристик разработанного реверсивного преобразователя показали возможность обеспечения мощности на ЭП до 77 Вт с коэффициентом полезного действия (КПД)  $\eta=73\%$  и коэффициентом мощности  $\lambda=0,875$ . Высокие потери (до 10,5 Вт) вызваны активным сопротивлением открытого канала транзистора IRF9540N, при этом потери на активном сопротивлении канала IRFZ46N менее 1,5 Вт, а потери мощности при переключении не превышают 0,96 Вт, что говорит о суммарных потерях в транзисторах, достигающих 14,6 Вт. Исходя из полученных результатов и анализа энергетических характеристик для дальнейших исследований в схему внесены изменения. Транзисторы АЭ1 и АЭ4 заменены на IRF4905 с меньшим активным сопротивлением открытого канала (20 мОм), а УЭ1–УЭ3 заменены на полевые транзисторы (2N7002), что позволило добиться более устойчивых управляющих уровней на затворах АЭ и увеличить плотность монтажа компонентов на ПП реверсивного преобразователя (рис. 9а).

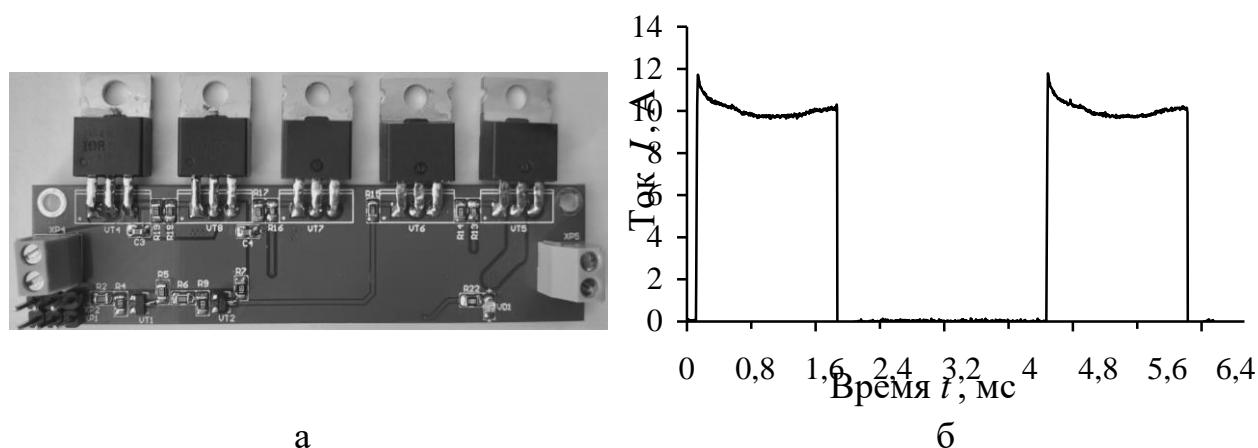


Рис. 9. Усовершенствованный реверсивный преобразователь (а) и импульсы тока на ЭП (б) при управляющем ШИМ с  $D_+=40\%$ ,  $f=245$  Гц

Благодаря описанным изменениям увеличилось напряжение и ток на ЭП, а мощность на ЭП достигла 91 Вт, при КПД  $\eta=81,8\%$ . Суммарные потери в транзисторах снижены до значения не более 6,63 Вт, большая их часть приходится на два транзистора IRFZ46N, включенных последовательно относительно источника питания (АЭ2 и АЭ5, или АЭ3 и АЭ5). Также удалось снизить уровень выбросов и тем самым улучшить форму импульсов тока ЭП (рис. 9б). В предложенной схеме, КПД ниже, чем в существующих классических мостовых схемах (H-мост), что объясняется последовательным включением в цепь дополнительного ключа. При этом за счёт данного решения возможно управлять средней мощностью на нагрузке посредством одного ШИМ сигнала, с возможностью реверса направления протекания тока.

### Заключение

Разработаны методика управления группой ЭП и алгоритм контроля температуры, обеспечивающие распределённое управление группой ЭП с поддержкой многофазного режима работы, и создан реверсивный преобразователь для электропитания ЭП с управлением посредством одного ШИМ сигнала и сигнала реверса. Приведены результаты моделирования и экспериментов, показавшие работоспособность реверсивного преобразователя, обеспечивающего мощность на ЭП до 91 Вт, с управлением средней мощностью одним ШИМ сигналом и КПД 81,8%. Приведены схемы и представлен макет терморегулятора на базе ЭП. Представлены осциллограммы токов и напряжений на реверсивных преобразователях с ЭП.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика с алгоритмом распределенной системы регулирования электропитания ЭП, поддерживающим многофазный режим работы ЭП в группах, разнесенных по времени;
- для новой запатентованной климатической ТЕМ-камеры создан реверсивный преобразователь для управления электропитанием ЭП;
- показана возможность применения многофазного электропитания ЭП, в виде разнесения работы каждого ЭП по времени, обеспечивая в каж-

дый момент времени нагрузку на источник питания не более средней мощности одного ЭП.

Разработанный терморегулятор будет использован в устройстве климатической экранированной камеры для равномерного локального нагрева или охлаждения внешних стенок ТЕМ-камеры, что позволит прецизионно поддерживать заданную температуру в её внутреннем объеме. Также равномерный нагрев или охлаждение ТЕМ-камеры позволит снизить неравномерность возбуждаемого электромагнитного поля внутри конструкции ТЕМ-камеры, вследствие растяжения или сжатия металла.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10162) в ТУСУРе.*

### Литература

1. Schilling A., Zhang X., Bossen O. Heat flowing from cold to hot without external intervention by using a “thermal inductor” // Science advances. 2019. № 4. P. eaat9953. – URL: <https://advances.sciencemag.org/content/5/4/eaat9953> (дата обращения: 24.05.2019).
2. Elsheikh M. H., Shnawah D. A., Sabri M. F. M., Said S. B. M., Hassan M. H., Bashir M. B. A., Mohamad M. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance // Renew. Sustain. Energy Rev. 2014. Vol. 30. P. 337-355.
3. Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures // Energies. 2017. Vol. 10. № 9. P. 1329.
4. Kim S., Lee H., Kim N., Yoo J. A thin film thermoelectric cooler for Chip-on-Board assembly // IEICE Electronics Express. 2010. Vol. 7. № 21. P. 1615-1621.
5. Zou W. D., Ye Q., Xie H. H., Zhao L. Z. LD temperature control based on TMS320F2812 // Infrared and Laser Engineering. 2008. Vol. 37. № 4. P. 642-645.
6. Xie H., Zou W. D., Huang C. H. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier // Chinese Journal of Scientific Instrument. 2009. Vol. 30. № 7. P. 1530–1534.
7. Li J., Xu X., Zhang J., Wang X., Cao J. High power laser constant temperature control system // IEEE International conference on mechatronics and automation (Takamatsu, Japan, 6–9 August 2017). – Takamatsu, 2017. – P. 1–5.
8. Zhou F., Wang R. G., Ji Z. B., Zhao L. Tunable photonic microwave signal generation based on TEC temperature controller // Journal of Optoelectronics Laser. 2014. Vol. 25. № 9. P. 1691–1694.
9. Дубровин А. Н., Мандель А. Е., Шандаров С. М., Шмаков С. С. Терморегулятор для исследований температурных зависимостей оптических эффектов в кристаллах // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 156–158.
10. Sun X. Zhang L., Liao S. Performance of a thermoelectric cooling system integrated with a gravity-assisted heat pipe for cooling electronics // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 116. P. 433–444.



11. Rodriguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J. O., Kouro S. Multilevel Voltage-source-converter Topologies for Industrial Medium-voltage Drives // IEEE Transactions on Industrial Electronics 2007. Vol. 54. № 6. P. 2930–2945.
12. Pang D. Y., Jeon W. S., Choi K. H., Kwon T. K., Kim N. G., Lee S. C. Temperature Control using Peltier Element by PWM method // Power, 2005. – Vol. 6203. – P. L6203. – URL: [http://2005.iccas.org/submission/paper/upload/1final\\_TEC\\_ICCAS2005.pdf](http://2005.iccas.org/submission/paper/upload/1final_TEC_ICCAS2005.pdf) (дата обращения: 30.05.2019).
13. Mohan N., Underland T. M., Robbins W. P. Power Electronics Converters, application and design. – John Wiley & Sons, 2003. – 832 p.
14. Немцов М. В., Немцова М. Л. Электротехника и электроника. – Академия, 2007. – 338 с.
15. Климаш В. С. Реверсивный преобразователь // Патент на изобретение RU 2138901, опубл. 27.09.1999.
16. Дядьков В. В., Ниценко И. В., Стальная М. И., Черемисин П. С. Реверсивный однофазный мостовой транзисторный преобразователь // Патент на изобретение RU 2485664, опубл. 20.06.2013.
17. Комнатнов М. Е., Газизов Т. Р. Климатическая экранированная камера // Патент на изобретение RU 2558706, бюл. №22.
18. Колокольцев В. М., Савинов А. С., Андреев С. М., Ангольд К. Б. Расчет термонапряженного состояния нагрева стального цилиндрического объекта // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 1. С. 37-45. DOI: 10.15503/1995-2732-2019-17-1-37-45.
19. Miwa B. A., Otten D. M., Schlecht M. E. High efficiency power factor correction using interleaving techniques // [Proceedings] APEC'92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (Boston, USA, 23-27 February 1992). – Boston, 1992. – P. 557–568.
20. Thongbuaban P., Jantaramin N. New switch-control technique for multiphase interleaved converters with current sharing and voltage regulation // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (Beijing, China, 20-23 August 2011). – Beijing, 2011. – P. 1–4.
21. Jantaramin N., Thongbuaban P. Maximum-power-point tracking using multiphase interleaved converters based on multi-unit synchronization // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (Busan, South Korea, 26-29 Oct. 2013) – Busan, 2013. – P. 1528–1531.
22. Гавриков В., Башмаков П. TPSM831D31 – новое решение от Texas Instruments для организации питания цифровой вычислительной техники // Компоненты и технологии. 2018. № 12. С. 54–58.
23. Komnatnov M., Gazizov T., Melkozerov A. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber // [Proceedings] of IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (Ottawa, Canada, 11–14 August 2015). – Ottawa, 2015. – P. 1–4.
24. Техническая документация на линейный датчик тока ACS712 // Allegro MicroSystems. 2017. – URL:

<https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>  
(дата обращения: 20.05.2019).

25. Osintsev A. V., Sobko A. A., Komnatnov M. E. Multiphase power supply when inverting currents for group of Peltier elements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1015. № 5. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052023/pdf> (дата обращения: 22.05.2019).

26. Cernaianu M.O., Gontean A. Parasitic elements modelling in thermoelectric modules // *IET Circuits, Devices & Systems*. 2013. Vol. 7. № 4. P. 177–184.

### References

1. Schilling A., Zhang X., Bossen O. Schilling A. Heat flowing from cold to hot without external intervention by using a “thermal inductor”. *Science advances*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. eaat9953. Available at: <https://advances.sciencemag.org/content/5/4/eaat9953> (accessed 24 May 2019).

2. Elsheikh M. H., Shnawah D. A., Sabri M. F. M., Said S. B. M., Hassan M. H., Bashir M. B. A., Mohamad M. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 2014, vol. 30, pp. 337–355.

3. Chen J., Li K., Liu C., Li M., Lv Y., Jia L., Jiang S. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures. *Energies*, 2017, vol. 10, no. 9, pp. 1329.

4. Kim S., Lee H., Kim N., Yoo J. A thin film thermoelectric cooler for Chip-on-Board assembly. *IEICE Electronics Express*, 2010, vol. 7, no. 21, pp. 1615–1621.

5. Zou W. D., Ye Q., Xie H. H., Zhao L. Z. LD temperature control based on TMS320F2812. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, vol. 37, no. 4, pp. 642–645.

6. Xie H., Zou W. D., Huang C. H. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, vol. 30, no. 7, pp. 1530–1534.

7. Li J., Xu X., Zhang J., Wang X., Cao J. High power laser constant temperature control system. *IEEE International conference on mechatronics and automation*. Takamatsu, 2017, pp. 1–5.

8. Zhou F., Wang R. G., Ji Z. B., Zhao L. Tunable photonic microwave signal generation based on TEC temperature controller. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2014, vol. 25, no. 9, pp. 1691–1694.

9. Dubrovin A. N., Mandel' A. E., Shandarov S. M., Shmakov S. S. A thermostatic controller for investigating temperature dependencies of optical effects in crystals. *Instruments and Experimental Techniques*, 2011, vol. 54, no. 4, pp. 593–595 (in Russian).

10. Sun X., Zhang L., Liao S. Performance of a thermoelectric cooling system integrated with a gravity-assisted heat pipe for cooling electronics. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 116, pp. 433–444.

11. Rodriguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J. O., Kouro S. Multilevel Voltage-source-converter Topologies for Industrial Medium-voltage Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945.
12. Pang D. Y., Jeon W. S., Choi K. H., Kwon T. K., Kim N. G., Lee S. C. Temperature Control using Peltier Element by PWM Method. *Power*, 2005, Vol. 6203, pp. L6203. Available at: [http://2005.iccas.org/submission/paper/upload/1final\\_TEC\\_ICCAS2005.pdf](http://2005.iccas.org/submission/paper/upload/1final_TEC_ICCAS2005.pdf) (accessed 30 May 2019).
13. Mohan N., Underland T. M., Robbins W. P. *Power Electronics Converters, application and design*. John Wiley & sons, 2003. 832 p.
14. Nemtsov M. V., Nemtsova M. L. *Electrotekhnika i elektronika* [Electrical engineering and electronics]. Academy Publ., 2007, 338 p. (in Russian).
15. Klimash V. S. *Reversivnyj preobrazovatel'* [Reversible converter]. Patent Russia, no. 2138901. 1999. (in Russian).
16. Dyadkov V. V., Nitsenko I. V., Stalnaya M. I., Cheremisin P. S. *Reversivnyj odnofaznyj mostovoj tranzistornyj preobrazovatel'* [Reversing single-phase bridge transistor converter]. Patent Russia, no. 2485664. 2013. (in Russian).
17. Komnatnov M. E., Gazizov T. R. *Klimaticheskaya ekranirovannaya kamera* [Climatic screened camera]. Patent Russia, no. 2558706. 2015. (in Russian).
18. Kolokoltsev V. M., Savinov A. S., Andreev S. M., Allgold K. V. Calculation of a thermal stress state, when heating a steel cylindrical object. *Vesnik Magniogoiskogo Gosudarsh'eniogo Tekhnicheskogo Unh'ersilela im. G.I. Nosova*, 2019, vol. 17, no. L, pp. 37-15. DOI: 10.1850371995-2732-2019-17-1-37-45.
19. Miwa B. A., Otten D. M., Schlecht M. E. High efficiency power factor correction using interleaving techniques. *APEC'92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Boston, 1992, pp. 557–568.
20. Thongbuaban P., Jantharamin N. New switch-control technique for multiphase interleaved converters with current sharing and voltage regulation. *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Beijing, 2011, pp. 1-4.
21. Thongbuaban P., Jantharamin N. Maximum-power-point tracking using multiphase interleaved converters based on multi-unit synchronization. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Busan, 2013, pp 1528–1531.
22. Gavrikov V., Bashmakov P. TPSM831D31 – novoye resheniye ot Texas Instruments dlya organizatsii pitaniya tsifrovoy vychislitel'noy tekhniki [TPSM831D31 – new solution from Texas Instruments for catering to digital computing technology]. *Components and technologies*, 2018, no. 12, pp. 54–58 (in Russian).
23. Komnatnov M., Gazizov T., Melkozerov A. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber. *IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications*. August 11–14, 2015, Ottawa, Canada. P. 1–4.
24. Linear Current Sensor ACS712. Available at: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx> (accessed 20 May 2019).

25. Osintsev A. V., Sobko A. A., Komnatnov M. E. Multiphase power supply when inverting currents for group of Peltier elements. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1015, no. 5. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052023/pdf> (accessed 22 May 2019).

26. Cernaianu M. O., Gontean A. Parasitic elements modelling in thermoelectric modules. *IET Circuits, Devices & Systems*, 2013, vol. 7, no. 4, pp.177–184.

Статья поступила 4 декабря 2019 г.

### Информация об авторах

*Собко Александр Александрович* – аспирант кафедры телевидения и управления, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, системы управления, схемотехника, трассировка печатных плат. E-mail: alexfreetibet@gmail.com

*Осинцев Артем Викторович* – аспирант кафедры автоматизации и обработки информации, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: встраиваемые системы, робототехника, проектирование устройств, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), автоматизированные системы управления, интернет вещей (IoT). E-mail: kubenet@gmail.com

*Комнатнов Максим Евгеньевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Доцент кафедры телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; экранирование; устройства для испытаний на электромагнитную совместимость. E-mail: maxmek@mail.ru

*Газизов Тальгат Рашитович* – доктор технических наук, доцент. Заведующий кафедрой телевидения и управления. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, численные методы. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.



## Methodology of a group of Peltier elements control by means of reversible converters with an optional power control switch for climatic TEM-chamber

A. A. Sobko, A. V. Osintsev, M. E. Komnatnov, T. R. Gazizov

**The relevance of the work:** There are often no new techniques to create new devices. One of such devices is a climatic TEM- chamber with a specialized system of automatic temperature control. In such specialized automatic temperature control systems Peltier elements (PE) are used widely. When PE are used to solve thermal management problem, it is necessary to change the direction and amplitude of the current by changing the polarity and voltage of the PE power supply. For that purpose it is necessary to use a reversible converter, for example, on the basis of a classical H-bridge circuit. But, it requires at least two control signals, such as pulse-width modulation (PWM), which makes it difficult to control a large number of H-bridge with PE. For example, it is necessary to use 24 PE in a climatic TEM-chamber temperature controller. In this case, the simultaneous inclusion of 24 PE, located on the TEM-chamber surface, leads to a variable heating and then to the electromagnetic field distribution deviation inside the TEM-chamber. To ensure uniform temperature distribution, a distributed control system for a group of PE, which operate in multiphase time-division mode, can be used. **The aim of the work is** to develop the methodology of a group of PE control and to create a reversible converter to control PE, PWM signal with the possibility of its inclusion in climatic TEM-chamber temperature controller. **The novelty of the work.** PE group control methodology and a temperature control algorithm for the new patented climatic TEM-chamber, which are characterized by the presence of an automated control system with feedback coupling in the form of a proportional-integral-differentiating regulator, are developed. A reversible converter for PE power control, which is distinguished by the fact that the power circuit (H-bridge), which provides PE voltage polarity reverse, is connected in series (relative to the power supply source) with the crucial element, which controls the PE average power supply, is created. **Results:** PE group control methodology and a temperature control algorithm for the TEM-chamber, which provide distributed control of PE group with multiphase operation mode support, are described. Multiphase operation mode support is achieved by combining PEs into groups, whose control is separated in time. The possibility of PE power supply control by means of a single PWM signal, with polarity change by reverse signal and PE group multiphase power supply use is shown. PE power supply control simulation and experiment are carried out. PE power supply control, in this case, is performed by the reversible converter, which provides currents up to 10 A, in two directions through PE, with control of average power by means of PWM signal. Circuits and a model of the thermoregulator based on PE are presented. Oscillograms of currents and voltages of reverse converters with PE are shown. **Practical relevance.** Developed reversible converter allows to provide PE power up to 91 W with average power control by one PWM signal and efficiency of 81.8 %. Converter can be included into the climatic TEM-chamber temperature controller to provide uniform local heating or cooling of external sides of TEM-chamber. It allows to maintain the set temperature in its internal capacity accurately.

**Key words** Peltier element, distributed control system, automatic temperature control system, proportional-integral-differentiating regulator, H-bridge circuit, reversible converter, pulse width modulation, multiphase power control.

### Information about Authors

*Alexander Alexandrovich Sobko* – postgraduate student at the Department of Television and Control, junior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Area of expertise: electromagnetic compatibility, control systems, circuit diagram, PCB layout. E-mail: alexfreetibet@gmail.com

*Artem Viktorovich Osintsev* – postgraduate student at the Department of Data Processing Automation, junior research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Tomsk



State University of Control Systems and Radioelectronics. Area of expertise: embedded system, robotics, device design, FPGA, automated control systems, Internet of Things. E-mail: kubenet@gmail.com

*Maksim Evgen'evich Komnatnov* – Ph.D. in Engineering Sciences, Senior Research fellow of the Research Laboratory of «Safety and Electromagnetic Compatibility of Radioelectronic Facilities» (SECRF). Associate Professor at the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; electromagnetic shielding; facilities for EMC testing. E-mail: maxmek@mail.ru

*Talgat Rashitovich Gazizov* – Dr. habil. in of Engineering Sciences, Assistant Professor, Head of the Department of Television and Control. Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility; numerical methods. E-mail: talgat@tu.tusur.ru

Address: Russia, 634035, Tomsk, Lenina prospect, 40.