

**СИСТЕМА БИВАРИАНТНОГО ПОДВОДА ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ
К МАССИВУ ИГОЛЬЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ УСТАНОВКИ
ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ КОРМОСМЕСЕЙ****SYSTEM FOR BIVARIATE SUPPLY OF POWER VOLTAGE TO AN ARRAY OF NEEDLE ELECTRODES
OF A MULTI-ELECTRODE UNIT FOR ELECTROTHERMAL DISINFECTION OF FEED MIXTURES**

Ключевые слова: электроконтактный нагрев, обеззараживание кормов, многоэлектродная ЭК-установка, бивариантная система управления, объемный нагрев, групповое питание электродов.

Представлена разработка системы управления электропитанием многоэлектродной установки электротермического обеззараживания кормовых смесей, применяемых в животноводстве. Обсуждается влияние характера распределения источников внутреннего тепловыделения в рабочей зоне камеры установки на степень деконтаминации патогенных микроорганизмов. Проведен анализ методики устранения объемной тепловой неоднородности за счет циклического переключения между двумя альтернативными схемами питания. Представлены изображения типовых вариантов размещения массива электродов в камерах круглого и квадратного сечений, описан способ их разделения на группы. Рассмотрен алгоритм подвода питающего напряжения к отдельным группам игольчатых электродов. Проанализированы варианты построения системы управления на базе микросхем жесткой логики и микроконтроллера. Приведены структурная и принципиальная схемы разработанного устройства с описанием функциональных блоков, а также механизма их взаимодействия. Рассмотрена работа системы управления в целом и ее отдельных узлов: широтно-импульсного модулятора, генератора тактовых импульсов, устройства переключения и выходного устройства. Представлена электрическая принципиальная схема силового модуля, состоящая из двух двухтактных эмиттерных повторителей и мощных силовых ключей. Изложены особенности ее поведения при поступлении управляющих сигналов с устройства управления. Приведены временные диаграммы работы компонентов системы управления и силового модуля. Отмечена возможность интеграции спроектированной системы со стандартными, широко используемыми типами пропорционально-интегральных и пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов или алгоритмами нечеткой логики. Рассмотрен потенциал системы в ас-

пекте ее масштабирования на большее количество групп электродов, а также возможности ее использования с разными конфигурациями рабочих камер.

Keywords: electrocontact heating, feed disinfection, multi-electrode electrocontact unit, bivariate control system, volumetric heating, electrode group power supply.

The development of the power supply control system of a multi-electrode unit for electrothermal disinfection of feed mixtures used in animal farming is discussed. The influence of the distribution of internal heat sources in the working chamber of the unit on the degree of decontamination of pathogenic microorganisms is discussed. The technique of eliminating thermal inhomogeneity in the volume by cyclic switching between two alternative power supply schemes is analyzed. Illustrations of typical variants of electrode cluster placement in chambers of circular and square cross-section are presented, and the method of their division into groups is described. The algorithm of supplying voltage to separate groups of needle electrodes is considered. The variants of creating a control system based on hard logic chips and microcontroller are analyzed. Structural and schematic diagrams of the developed device with the description of functional blocks as well as the mechanism of their interaction are given. The work of the control system as a whole and its separate blocks: pulse-width modulator, clock pulse generator, switching device and output device are discussed. The electrical circuit diagram of the power module consisting of two two-cycle emitter repeaters and powerful power switches is presented. The peculiarities of its behavior when control signals are received from the control device are described. Time diagrams of operation of control system components and power module are discussed. The possibility of integration of the designed system with standard, widely-used types of proportional-integral and proportional-integral-derivative controllers or fuzzy logic algorithms is pointed out. The potential of the system for scaling up to a larger number of electrode groups and its use with different configurations of working chambers is considered.

Дорожкин Максим Владимирович, зав. лабораторией, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: maxmusicd@mail.ru.

Dorozhkin Maksim Vladimirovich, head of laboratory, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: maxmusicd@mail.ru.

Халина Татьяна Михайловна, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: temf@yandex.ru.

Асташин Дмитрий Игоревич, студент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ast-2001@mail.ru.

Khalina Tatyana Mikhaylovna, Dr. Tech. Sci., Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: temf@yandex.ru.

Astashin Dmitriy Igorevich, student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ast-2001@mail.ru.

Введение

Организация температурного режима для установок электроконтактного (ЭК) нагрева, предполагающего обеспечение равномерного распределения потенциала тепловой энергии по всему объему исходного сырья, – задача далеко не тривиальная [1-4].

Это особенно заметно, когда речь идет о многоэлектродных системах, использующих тепло как средство для достижения другой цели, например, стерилизации пищевой продукции или кормов, применяемых в животноводстве, где от эффективности реализации данного параметра будет напрямую зависеть и степень деконтаминации патогенных микроорганизмов [2-5]. При этом результирующим фактором, влияющим на равномерность нагрева кормосмеси, будет являться характер распределения энергии в межэлектродном пространстве, а именно источников внутреннего тепловыделения, образующихся за счет токов проводимости [3-5].

Добиться однородного температурного поля в рабочей зоне установки сложной конфигурации, имеющей к тому же ограниченное количество игольчатых электродов, практически невозможно. Тем более при традиционном энергоподводе, когда на протяжении всего цикла обработки на одни и те же электроды подается определенный электрический потенциал. В такой ситуации в объеме камеры неизбежно возникнут зоны с недопустимо низкой плотностью тока, что с большой вероятностью приведет к недостаточному термоэлектрохимическому воздействию на микрофлору сырья, следовательно, к ее фрагментарной деактивации [3-5].

Логичным решением данной проблемы представляется метод, описанный в статьях [3, 4], где на основе имеющейся конструкции камеры предлагается организовать такую схему подачи питающего напряжения на электроды, которая бы позволила за счет перераспределения энергии в межэлектродном пространстве скорректировать в конкретных зонах камеры уровень тепловыделения.

Целью работы является разработка системы управления электропитанием многоэлектродной ЭК-установки на основе предложенного метода.

Материалы и методы

Базовая концепция представленного в работах [3, 4] подхода к нивелированию температурных перепадов в объеме камеры предполагает использование для энергоподвода минимум двух альтернативных схем питания, которые, посредством коммутационных устройств, будут попеременно подключаться к электродам установки.

В целях обеспечения возможности независимого группового питания все электроды разделены по определенному принципу на 4 автономные группы. Для различных конфигураций камер состав групп, а также количество электродов, входящих в конкретную группу, могут отличаться.

Типовые варианты схем компоновки электродов ЭК-установки (рис. 1) в зависимости от формы поперечного сечения рабочей камеры предполагают следующее деление на группы [3, 4]:

- для сечения круглой формы и кольцевого расположения электродов: 1-я группа – электроды с номерами 1, 3, 5; 2-я группа – 2, 4, 6, 13; 3-я группа – 7, 9, 11; 4-я группа – 8, 10, 12;

- для квадратного сечения при шахматном расположении электродов: 1-я группа – 1, 5, 10, 12; 2-я группа – 3, 7, 9, 11; 3-я группа – 4, 8, 13; 4-я группа – 2, 6.

Предлагаемый алгоритм бивариантного подвода питающего напряжения к массиву электродов можно условно разбить на два равных по продолжительности этапа. Во время первой фазы цикла работы положительный потенциал с источника питания подается на электроды 1-й и 4-й групп, в то время как на 2-й и 3-й группы – отрицательный. Во второй фазе цикла распределение потенциалов осуществляется по другой схеме: на электроды 1-й и 3-й группы – положительный, на 2-й и 4-й группы – отрицательный [3, 4].

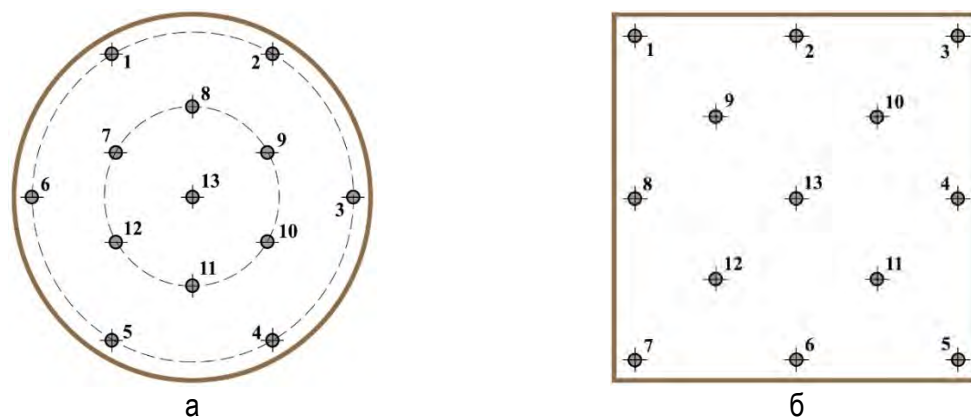


Рис. 1. Схема расположения электродов в камере установки с разной формой сечения:
а – круглого; б – квадратного

Согласно результатам исследований [3, 4], комбинация указанных схем электропитания установки, для каждого из вариантов пространственного расположения электродов с их уникальным распределением по группам, приводит к схожему термокорректирующему эффекту, что позволяет использовать единую систему управления для аналогичных конструкций ЭК-установок.

В соответствии с условиями технологического процесса обеззараживания кормосмесей электротермическим методом, а также с учетом специфики эксплуатации электродов, кроме основного алгоритма работы, обеспечивающего своевременное переключение питания между группами электродов, необходимо реализовать ряд дополнительных функций [3, 4, 6, 7].

Во-первых, проектируемая система должна быть работоспособной как в стационарном режиме нагрева, гарантируя получение нужного температурного профиля, так и в режиме удержания заданного уровня температуры [7]. Для этого требуется предусмотреть возможность включения в ее состав устройств автоматического регулирования, например, ПИД-регулятора, либо модуля ручного управления температурой нагрева [8].

Во-вторых, в рамках отдельной фазы цикла питания следует обеспечить периодическую инверсию направления тока между электродами, что в перспективе позволило бы снизить скорость их деградации, вызванной негативным воздействием электрохимических процессов, протекающих на поверхности электродов [1, 6].

Использование микропроцессорных средств для решения упомянутых задач представляется не совсем оправданным выбором, так как для реализации целевой функции базовой версии

системы управления не требуется сложных математических вычислений. В связи с чем в качестве основы для проектирования управляющих блоков были выбраны интегральные микросхемы ТТЛ и КМОП-логики, а в силовых цепях – полупроводниковые ключи на базе мощных транзисторов [9].

Результаты и их обсуждение

Структурная схема устройства представлена на рисунке 2 и включает в себя такие функциональные блоки, как: блок управления переключениями (БУП), выходное устройство (ВУ), а также четыре идентичных блока силовых модулей (СМ).

Каждый отдельно взятый силовой модуль соединяется с выделенной под него группой электродов, установленных в рабочей камере ЭК-установки, и состоит из драйвера силовых ключей (ДСК), построенного на биполярных транзисторах разного типа проводимости, и силовых ключей (СК), роль которых выполняют МОП-транзисторы.

Блок управления переключениями состоит из генератора ШИМ-сигнала (ШИМ), тактового генератора прямоугольных импульсов (ГИ), а также устройства переключения (УП), реализующего основной алгоритм группового подключения электродов к электропитанию.

Выходное устройство содержит в себе четыре модуля коммутации (УК), обеспечивающих независимую передачу ШИМ-сигнала на вход драйвера силового модуля, с активацией верхнего или нижнего силовых ключей.

Работает система по следующему принципу. Прямоугольные импульсы с тактового генератора ГИ подаются на устройство переключения УП, которое, исходя из порядкового номера им-

пульса, поступившего на его вход, формирует на выводах некоторую комбинацию логических уровней. Полученный таким образом парал-

лельный сигнал, согласно схеме подключения УП к модулям УК, направляется на адресные входы всех устройств коммутации УК1 – УК4.

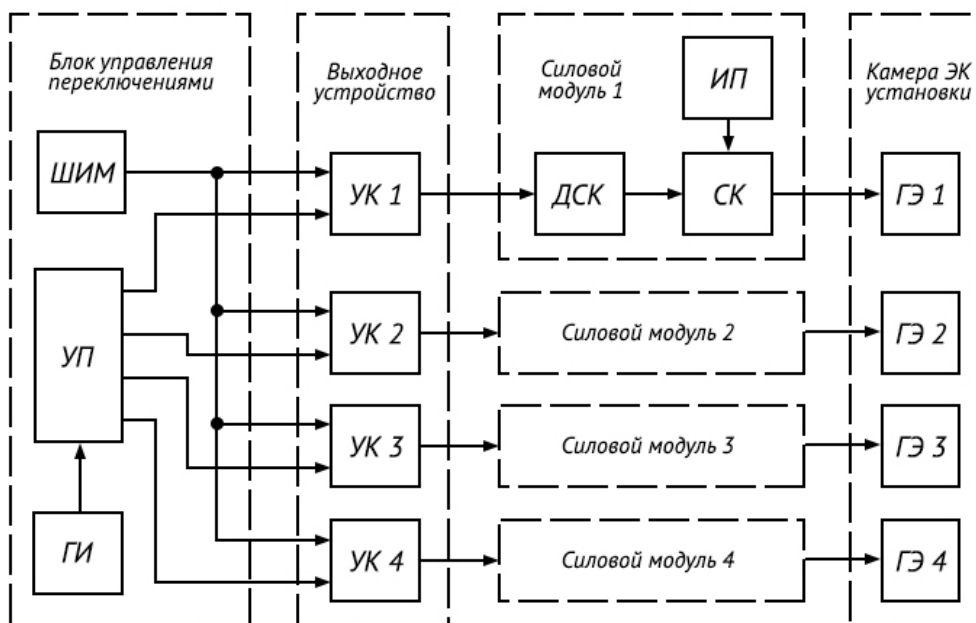


Рис. 2. Структурная схема системы управления подачей питающего напряжения на группы электродов

В зависимости от состояния управляющего сигнала каждое УК ретранслирует модулированный сигнал, идущий с ШИМ-генератора, на вход драйвера силовых ключей ДСК. Далее, ШИМ-сигнал с выхода ДСК подается на затвор одного из двух соединенных с ним МОП-транзисторов СК, включенных по полумостовой схеме. Драйвер ключей ДСК в данном случае выполняет роль усилителя сигнала по току, обеспечивая надежное управление как верхним, так и нижним силовыми ключами [9].

В результате, управляемый драйвером ДСК транзистор СК, работая в ключевом режиме, позволяет установить на подключенной к нему группе электродов ГЭ либо высокий уровень питающего напряжения, либо низкий, реализуя таким образом и смену полярности между электродами и межгрупповую коммутацию.

На основании представленной блок-схемы была спроектирована принципиальная схема устройства (рис. 3).

Генератор ШИМ-сигнала реализован на трех последовательно соединенных функциональных блоках: источнике прямоугольных импульсов, выполненном по схеме мультивибратора на двух логических элементах «И-НЕ» (DD1.1, DD1.2) с двумя времязадающими RC-цепочками (R1, C1 и R2, C2); интегрирующем звене, по-

строенном на базе операционного усилителя (DA1) с элементами, задающими постоянную интегрирования (R3, R4, C3); аналоговом компараторе (DA2).

Данный узел работает следующим образом. Импульсы прямоугольной формы с генератора через резистор R3 поступают на инвертирующий вход интегратора. За счет наличия в цепи отрицательной обратной связи конденсатора C3, задающего скорость протекания переходных процессов, на выходе интегратора формируется линейно возрастающее напряжение по типу пилы, которое передается на инвертирующий вход аналогового компаратора. В результате сравнения пилообразного сигнала с уровнем задающего напряжения U_z прямого входа компаратор генерирует прямоугольный сигнал, коэффициент заполнения которого напрямую зависит от изменения задающего напряжения [9].

Модуль устройства переключения УП содержит в составе: четырехкаскадный делитель частоты, выполненный на D-триггерах (DD2, DD3, DD4, DD5) и обеспечивающий уменьшение частоты входных импульсов в 16 раз, два цифровых мультиплексора (DD7, DD8), а также счетный T-триггер (DD6), построенный на основе D-триггера.

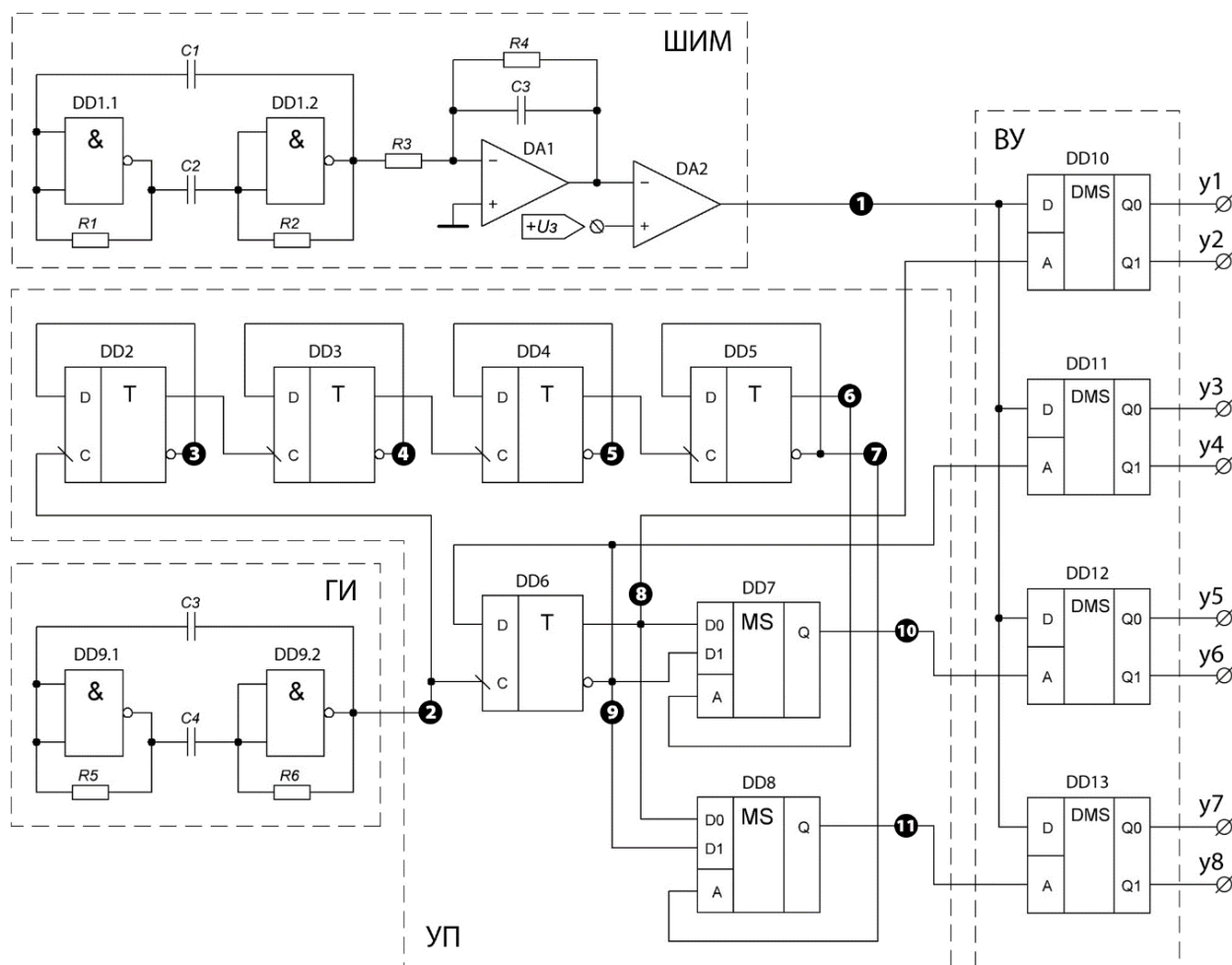


Рис. 3. Принципиальная схема устройства управления переключением

Из генератора импульсов ГУ, собранного на элементах (DD9.1, DD9.2, R5, C3, R6, C4) по схеме, аналогичной тактовому генератору модуля ШИМ, импульсный сигнал одновременно поступает на входы синхронизации (С) делителя частоты и счетного Т-триггера. При этом инверсия логического состояния дискретных выходов для каждого из устройств происходит через установленный для них временной интервал: для счетного триггера – при каждом новом такте, для делителя частоты – раз в 8 тактов.

С прямого (Q) и инверсного (Q') выходов делителя частоты сигналы независимо друг от друга подаются на адресные входы (А) двух мультиплексов. Логический уровень на входе адреса определяет, с какого информационного входа мультиплекса (D0 или D1) сигнал перейдет на его выход (Q).

Далее, с выводов (Q) каждого мультиплекса и Т-триггера (Q и Q'), сформированная комбинация управляющих сигналов передается на выходное устройство ВУ, представляющее собой систему из четырех демультиплексов

(DD10, DD11, DD12, DD13). На информационный вход (D) каждого демультиплекса с ШИМ-генератора в режиме параллельного приема подается модулированный сигнал, который, в зависимости от логического состояния адресного входа (А), перенаправляется на один из выходов (Q0 или Q1), после чего поступает на связанный с ним силовой модуль.

Силовой модуль (рис. 4) состоит из полумостового драйвера, функцию которого выполняют два двухтактные эмиттерные повторителя, выполненные на комплементарных парах биполярных транзисторов разного типа проводимости (VT1, VT2 и VT4, VT5), и двух МОП-транзисторов с индуцированным каналом n-типа (VT3, VT6) [9]. Выход каждого силового модуля (СМ1 – СМ4) подключается к конкретной группе электродов (выводы 1, 2, 3, 4), обеспечивая таким образом их независимое питание.

Тактовые диаграммы работы блоков схемы управления и силового модуля представлены на рисунках 5 и 6. В целях упрощения подачи визуальной информации было принято допущение,

что изменение логического состояния на выходе всех устройств происходит с нулевой задержкой и максимальной крутизной нарастания фронтов. На диаграмме можно видеть, что функции инверсии полярности напряжения и межгруппо-

вого переключения электродов реализуются за счет чередования двух разных паттернов поступления модулированного сигнала на отдельные выводы (у1 – у8) демультиплексоров ВУ.

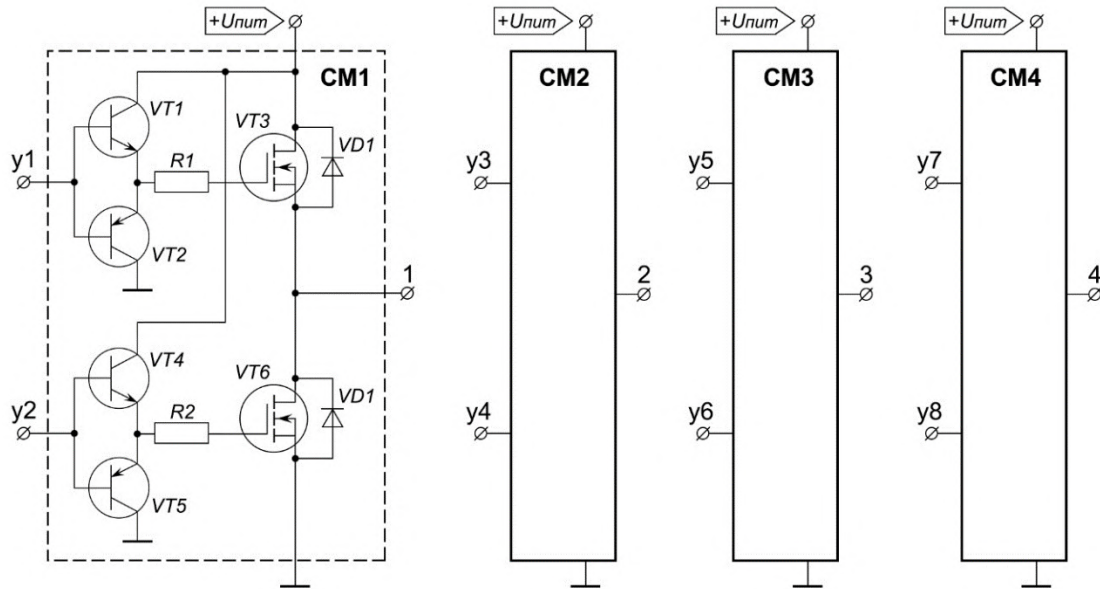


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема силового модуля

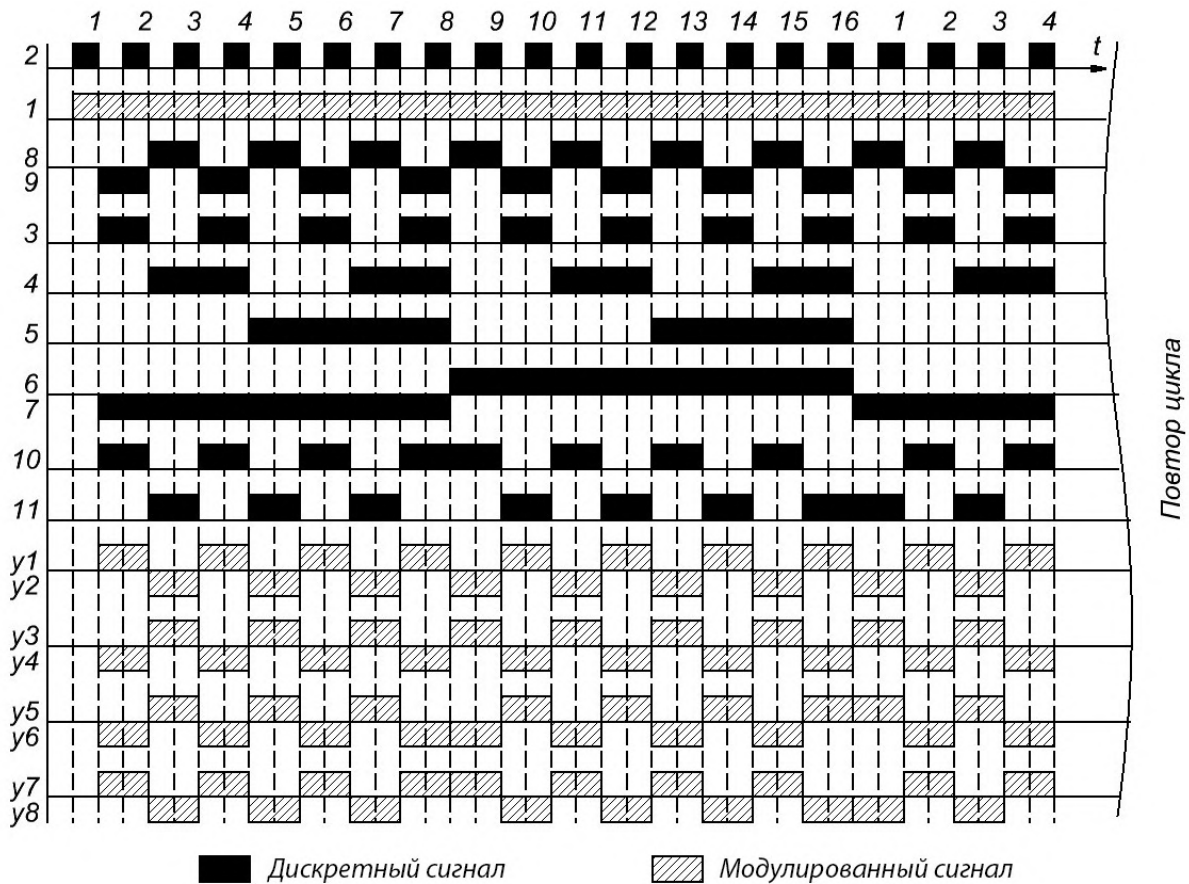


Рис. 5. Тактовая диаграмма работы блоков схемы управления

На рисунке 6 представлена временная диаграмма, иллюстрирующая работу типового си-

лового модуля (СМ1), с выводами у1, у2 (входы) и 1(выход). При появлении управляющего ШИМ

– сигнала на входе (y_1) ДСК силовой транзистор VT3, выполняя в ключевом режиме роль быстродействующего цифрового коммутатора, соединяет выходной разъем (1) СМ с плюсом ис-

точника питания. При подаче сигнала на вход (y_2) активным становится транзистор VT6, осуществляя коммутацию разъема (1) с минусом того же источника питания.

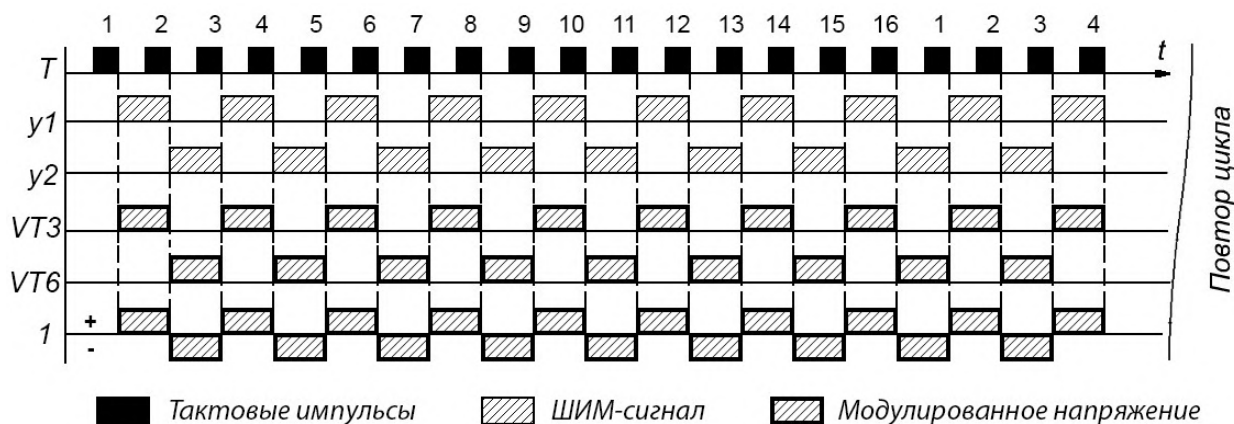


Рис. 6. Тактовая диаграмма работы силового модуля

Необходимо отметить, что задержка переключения силовых ключей выходного каскада СМ, не показанная на рисунке 6, вследствие примитивизации диаграммы в разработанной схеме управления формируется за счет времени срабатывания демультиплексоров ВУ, обеспечивая таким образом защиту источника питания от короткого замыкания [9].

Заклучение

Разработанная система бивариантного подвода питающего напряжения к электродам многоэлектродной ЭК-установки в полной мере соответствует задачам, поставленным в рамках проектирования. Она представляет собой эффективное и надежное в работе решение, позволяющее значительно повысить в объеме рабочей камеры равномерность распределения источников внутреннего тепловыделения.

В силу особенностей предложенного схемотехнического решения систему управления за счет добавления практически любого количества дубликатов цифровых коммутирующих устройств и силовых модулей можно легко масштабировать на большее число групп электродов. Данное обстоятельство делает ее универсальной и при условии соблюдения всех необходимых для обеспечения коррекции тепловыделения требований допускает использование с другими конструкциями многоэлектродных камер.

Благодаря использованию технологии ШИМ, позволяющей путем подстройки в ШИМ-генераторе уровня задающего напряжения на

неинвертирующем входе компаратора, изменять интенсивность тепловыделения, система может быть сопряжена с различными типами регуляторов, реализующих не только стандартные ПИ и ПИД законы управления или алгоритмы нечеткой логики, но и способы регулирования, построенные на базе искусственного интеллекта.

Нельзя обойти стороной и тот факт, что вся система управления переключающими устройствами может быть полностью выполнена средствами микроконтроллера. Однако при нынешней рыночной стоимости его использование оправдано в тех случаях, когда требуется по определенным причинам получить устройство миниатюрных размеров, или возникает необходимость вместе с главным алгоритмом управления реализовать на микроконтроллере и алгоритм системы автоматического регулирования температуры, либо использовать его вычислительные возможности для обеспечения каких-то дополнительных функций.

Библиографический список

1. Сторчевой, В. Ф. Электротехнологии и электрический нагрев / В. Ф. Сторчевой, Н. Е. Кабдин, Я. С. Чистова. – Москва: ООО «ИКЦ Колос-с», 2021. – 280 с. – Текст: непосредственный.
2. Попов, А. М. Исследование технологических процессов для концентрирования и стерилизации соков методом прямого нагрева / А. М. Попов, Н. В. Тихонов, И. Н. Тихонова. – Текст: непосредственный // Техника и техноло-

гия пищевых производств. – 2013. – № 1 (28). – С. 81-87.

3. Дорожкин, М. В. Определение электрических параметров многоэлектродной установки электроконтактного обеззараживания кормовых смесей с камерой прямоугольного сечения / М. В. Дорожкин. – Текст: непосредственный // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XX Международной научно-практической конференции, Орёл, 14-16 ноября 2022 года. – Орел: Изд-во ОГУ им. И. С. Тургенева, 2022. – С. 119-124.

4. Халина, Т. М. Исследование электрических параметров многоэлектродной установки электротермического обеззараживания кормов с камерой круглого сечения / Т. М. Халина, М. В. Халин, М. В. Дорожкин. – DOI 10.24412/2227-9407-2024-3-51-65. – Текст: непосредственный // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 3 (154). – С. 51-65.

5. Халина, Т. М. Обеззараживание комбинированных кормов электроконтактным способом / Т. М. Халина, М. В. Халин, М. В. Дорожкин. – Текст: непосредственный // Энерго-и ресурсосбережение – XXI век: материалы XVII Международной научно-практической конференции, Орёл, 02-04 декабря 2019 года. – Орел: Изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. – С. 170-174.

6. Евстигнеев, В. В. Параметрические первичные измерительные преобразователи: монография / В. В. Евстигнеев, М. М. Горбов, О. И. Хомутов. – Москва: Высшая школа, 1997. – 181 с.: ил. – Текст: непосредственный.

7. Khalina, T., Khalin, M., Dorozhkin, M. (2022). Study of the Thermal Processes Dynamics in the Feedstuff Disinfection by Electric Contact Heating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1211. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/1211/1/012019.

8. Горбунов, Р. В. Основные принципы автоматического регулирования современных терморегуляторов / Р. В. Горбунов, Г. А. Палкин, Е. А. Гончаров. – Текст: непосредственный // Инновационная наука. – 2015. – № 5-2. – С. 58-61.

9. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Т. II / У. Титце, К. Шенк. – Саратов: Профобразование, 2019. – 940 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Storchevoi V.F. Elektrotehnologii i elektricheskii nagrev / V.F. Storchevoi, N.E. Kabdin, Ia.S. Chistova. Moskva: OOO «IKTs Kolos-s», 2021. 280 s.

2. Popov A.M., Tikhonov N.V., Tikhonova I.N. Issledovanie tekhnologicheskikh protsessov dlia kontsentrirrovaniia i sterilizatsii sokov metodom priamogo nagreva // Tekhnika i tekhnologiiia pishchevykh proizvodstv. 2013. No. 1 (28). S. 81-87.

3. Dorozhkin, M.V. Opredelenie elektricheskikh parametrov mnogoelektrodnoi ustanovki elektrokontaktnogo obezzarazhivaniia kormovykh smesei s kameroi priamougolnogo secheniia / M.V. Dorozhkin // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek: materialy XX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orel, 14–16 noiabria 2022 goda. – Orel, OGU im. I.S. Turgeneva, 2022. – S. 119-124.

4. Khalina T.M., Khalin M.V., Dorozhkin M.V. Issledovanie elektricheskikh parametrov mnogoelektrodnoi ustanovki elektrotermicheskogo obezzarazhivaniia kormov s kameroi kruglogo secheniia // Vestnik NGIEI. 2024. No. 3 (154). S. 51–65. DOI: 10.24412/2227-9407-2024-3-51-65.

5. Khalina, T.M. Obezzarazhivanie kombinirovannykh kormov elektrokontaktnym sposobom / T.M. Khalina, M.V. Khalin, M.V. Dorozhkin // Energo- i resursosberezhenie – XXI vek: Materialy XVII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orel, 02–04 dekabria 2019 goda. – Orel: OGU imeni I.S. Turgeneva, 2019. – S. 170-174.

6. Evstigneev V.V. Parametricheskie pervichnye izmeritelnye preobrazovateli: monografiia / V.V. Evstigneev, M.M. Gorbov, O.I. Khomutov. Moskva: Vyssh. shk., 1997. 181 s.: il.

7. Khalina, T., Khalin, M., Dorozhkin, M. (2022). Study of the Thermal Processes Dynamics in the Feedstuff Disinfection by Electric Contact Heating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1211. 012019. DOI: 10.1088/1757-899X/1211/1/012019.

8. Gorbunov R.V., Palkin G.A., Goncharov E.A. Osnovnye printsipy avtomaticheskogo regulirovaniia sovremennykh termoregulyatorov // Innovatsionnaia nauka. 2015. No. 5-2. S. 58-61.

9. Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaia skhemotekhnika. T. II / Ulrikh Tittse, Kristof Shenk. Saratov: Profobrazovanie. 2019. 940 s.

