

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 62-551.3
doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКЕ

С. В. Фролов¹, К. С. Савинова²,
Г. П. Ильин³, А. Н. Ветров⁴

^{1, 2, 3, 4} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
¹ sergej.frolov@gmail.com, ² savinova.k94@mail.ru, ³ gregilyn@mail.ru, ⁴ avetrov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В работе рассматривается применение многопозиционного регулирования в медицинской технике. Показано, что многопозиционное регулирование может использоваться в системах стерилизации для обработки медицинских инструментов. *Материалы и методы.* Для исследования процессов многопозиционного регулирования была разработана лабораторная установка на основе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer. В среде разработки ISaGRAF 3.32 на языке функциональных блок-диаграмм FBD (Function Block Diagram) была создана программа, реализующая четырехпозиционную систему регулирования температуры в камере лабораторной установки. В программной среде Matlab (Simulink) реализован процесс регулирования температуры в камере установки. *Результаты.* В результате рассмотренных методов исследования было доказано, что во время нагрева камеры и действия возмущений работают все три ступени подачи энергии. В период стерилизации, когда необходимо только поддержание заданной температуры и требуется небольшое количество энергии, работает только последняя ступень малой мощности. *Выводы.* Показано преимущество многопозиционных систем регулирования по сравнению с двухпозиционным методом управления.

Ключевые слова: двухпозиционное регулирование, многопозиционное регулирование, имитационное моделирование, суховоздушные стерилизаторы, контроллер, ISaGRAF

Для цитирования: Фролов С. В., Савинова К. С., Ильин Г. П., Ветров А. Н. Реализация систем позиционного регулирования в медицинской технике // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2023. № 1. С. 100–110. doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

© Фролов С. В., Савинова К. С., Ильин Г. П., Ветров А. Н., 2023. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

THE USE OF EFFECTIVE ON-OFF CONTROL SYSTEMS FOR MEDICAL EQUIPMENT TASKS

S.V. Frolov¹, K.S. Savinova², G.P. Ilyin³, A.N. Vetrov⁴

^{1, 2, 3, 4} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹sergej.frolov@gmail.com, ²savinova.k94@mail.ru, ³gregilyn@mail.ru, ⁴avetrov@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper considers the use of multi-position regulation in medical technology. It is shown that multi-position regulation is used in sterilization systems for processing medical instruments. *Materials and methods.* To study the processes of multi-position regulation, a laboratory setup was developed based on the Smart Base profi PEP Modular Computer controller. In the ISaGRAF 3.32 development environment, in the language of functional block diagrams FBD (Function Block Diagram), a program was created that implements a four-position temperature control system in the chamber of a laboratory setup. In the Matlab (Simulink) software environment, the process of temperature control in the installation chamber is implemented. *Results.* As a result of the considered research methods, it was proved that during the heating of the chamber and the action of disturbances, all 3 stages of energy supply work. During the sterilization period, when temperature maintenance is necessary and a small amount of energy is required, only the last low power stage operates. *Conclusions.* The advantage of multi-position control systems in comparison with the two-position control method is shown.

Keywords: on-off control systems, multi-position regulation, simulation modeling, dry-air sterilizers, controller, ISaGRAF

For citation: Frolov S.V., Savinova K.S., Ilyin G.P., Vetrov A.N. The use of effective on-off control systems for medical equipment tasks. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2023;(1):100–110. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2023-1-6

Введение

В первой части исследования [1] отмечалось, что позиционное регулирование (англ. on-off control, Bang-bang control) широко применяется в медицинской технике, где исполнительный механизм имеет два положения: «открыть» (ON) и «закрыть» (OFF). В медицинских изделиях наиболее распространены системы позиционного регулирования температуры, например в суховоздушных стерилизаторах. Одним из показателей эффективности работы подобных медицинских изделий является время выхода на рабочий режим. Для улучшения этого показателя целесообразно использовать не двухпозиционные [1, 2], а многопозиционные системы регулирования [3, 4]. Многопозиционные системы применяют для улучшения показателей качества управления: уменьшения времени и повышения точности регулирования. При многопозиционном регулировании энергия может передаваться объекту управления частями, которые принято называть ступенями. При этом мощность притока энергии для каждой ступени может иметь разные значения в зависимости от целей управления.

Применение многопозиционного регулирования в системах стерилизации

Медицинские изделия, такие как стерилизационное оборудование, необходимы для медицинских учреждений, где многоразовые инструменты,

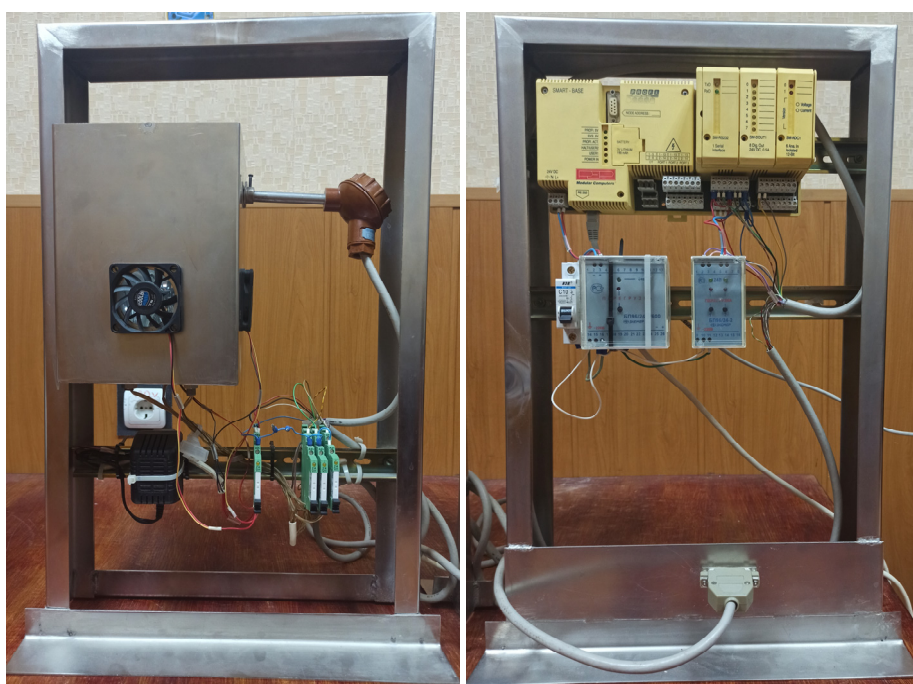
посуду следует подвергать высокотемпературной стерилизации [5, 6]. Для поддержания температурных режимов используются электрические нагреватели (ТЭНы). Камера для стерилизации с подобным ТЭНом при нагревании имеет значительную инерционность.

Для повышения производительности стерилизационного оборудования и точного поддержания температурных режимов целесообразно применять системы многопозиционного регулирования [3, 4].

Многопозиционные системы регулирования в общем случае могут иметь любое количество ступеней. Чем больше ступеней притока энергии в системе, тем меньше амплитуда колебаний регулируемой величины [3, 4].

Для стерилизационного оборудования важной характеристикой является время выхода на рабочий режим. В этом случае в многопозиционном регуляторе ступени притока энергии могут иметь разный уровень мощности. Первая ступень должна обеспечивать максимальный уровень мощности по сравнению с другими ступенями.

Для достижения эффективности работы теплового стерилизатора необходимо добиться максимальной скорости возрастания температуры до заданного значения, определяемого режимом стерилизации, а также стабильности поддержания температуры за счет использования системы многопозиционного регулирования. Для исследования процессов многопозиционного регулирования была разработана лабораторная установка на основе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer [7] (рис. 1), состоящая из теплового объекта (рис. 1,а) и блока управления (рис. 1,б).



а)

б)

Рис. 1. Лабораторная установка для исследования многопозиционных систем регулирования на базе контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer:
а – тепловой объект; б – блок управления

Основой теплового объекта является металлическая камера, выполненная из нержавеющей стали. Внутри камеры, в ее нижней части, расположены три нагревателя (электролампы мощностью соответственно 60 Вт, 95 Вт и 150 Вт). На боковых поверхностях металлической камеры установлены три вентилятора. В качестве датчика температуры используется термометр сопротивления ТСПУ-205. В нижней части стенда закреплена DIN-рейка, где размещен блок питания, а также блок реле для коммутации нагревательных элементов и вентиляторов. Изменение режима работы и поддержание заданной температуры объекта происходит посредством включения/выключения нагревателей.

Тепловой объект позволяет имитировать температурные режимы, аналогичные режимам, протекающим при стерилизации медицинских изделий.

В состав блока управления на базе контроллера Smart Base profi PER Modular Computer входят: металлический каркас, выполненный из нержавеющей стали, с установленными на нем DIN-рейками; контроллер, включающий в себя платы: SM-ADC1 (6-аналоговых входов) и SM-DOUT1 (8-дискретных выходов); сетевой выключатель типа ВА47-29; блоки питания БП-96 НПП «Элемер». Управляющие воздействия формируются согласно сигналам, поступающим с блока объекта управления. Связь с компьютером осуществляется по интерфейсу RS-232.

На рис. 2 представлена схема подключения теплового объекта и блока управления лабораторной установки. Установка включает в себя блок управления 1, блоки питания 2, реле 3, температурный датчик 4, лампы накаливания различной мощности 5 и вентиляторы 6, модель камеры стерилизатора 7. Три реле используются для управления включением нагревателей, четвертое реле управляет системой включения вентиляторов. Для связи с внешним устройством используются модули SM_DOUT1 для управления включением реле и SM_ADC1 для подключения аналоговых входов (датчик температуры).

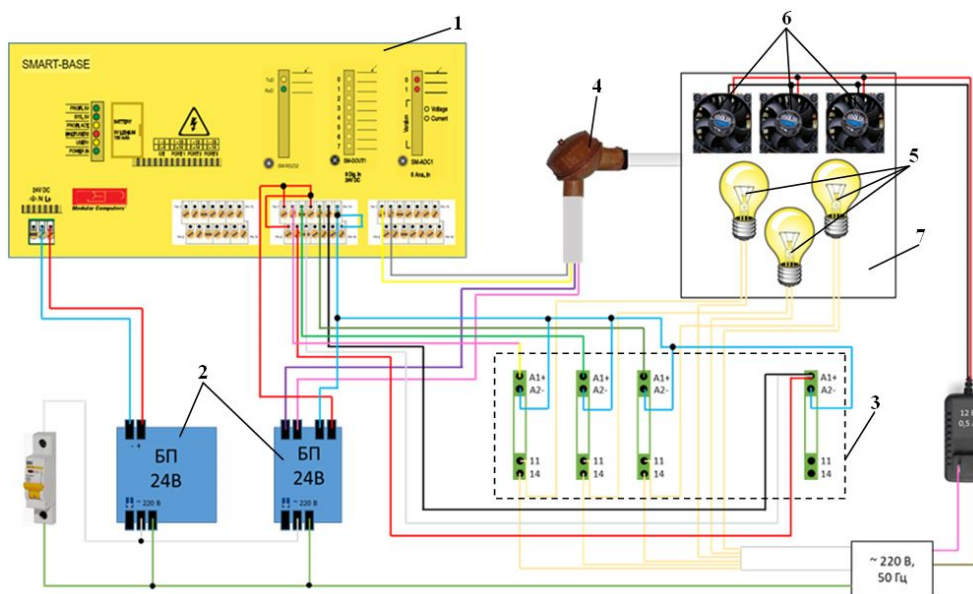


Рис. 2. Схема подключения теплового объекта и блока управления

Таким образом, в установке реализуется работа четырехпозиционной системы регулирования за счет включения/выключения трех нагревателей, различающихся по мощности. Управляющие воздействия формируются согласно алгоритму, реализованному в среде разработки ISaGRAF 3.32 [8] и загруженному в память контроллера.

На рис. 3 приведена программа, реализующая четырехпозиционную систему регулирования температуры в камере лабораторной установки на языке функциональных блоковых диаграмм FBD (Function Block Diagram) программной среды ISaGRAF 3.32 [9].

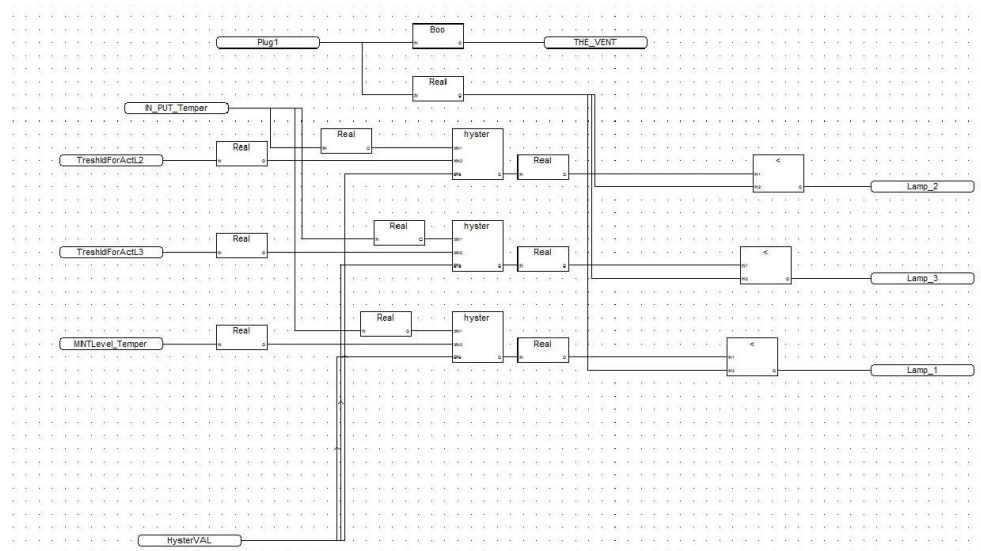


Рис. 3. Программа на языке FBD управления теплового объекта

Для работы системы регулирования используется несколько программных переменных. Переменная IN_PUT_Temper соответствует значению температуры в камере в условных единицах.

Переменные Lamp_1, Lamp_2 и Lamp_3 и THE_VENT представляют собой булевы переменные, управляющие выходными устройствами (нагревательными элементами и вентиляторами соответственно). MNTLevel_Temp является переменной, с помощью которой задается необходимая для поддержания температура, через переменные TreshldForActL2, TreshldForActL3 задаются фиксированные границы для включения/выключения нагревательных элементов 150 и 95 Вт. Нагревательный элемент, обладающий наименьшей мощностью 60 Вт, определяет заданную температуру в камере – переменная MNTLevel_Temp. Переменная HysterVAL определяет зону возврата работы реле. Остальные переменные являются вспомогательными.

В период нагревания камеры при температуре ниже минимального порога (значение TreshldForActL3) работают все три ступени, как только же сигнал превысит первый порог, звено максимальной мощности отключится (Lamp3=FALSE). По достижении заданной температуры внутри камеры активной остается последняя ступень, которая будет поддерживать заданный уровень с минимальным отклонением. В экспериментальной установке также

используется система охлаждения, представляющая собой три вентилятора, которые активны постоянно для предотвращения перегрева.

Для реализации системы многопозиционного регулирования в программе используется блок булева гистерезиса *hyster* (рис. 4). Переменной *HysterVAL* задается величина зоны возврата реле $\Delta = 2EPS$. Для работы с сигналами используется блок *Real*, который переводит данные в необходимый формат.

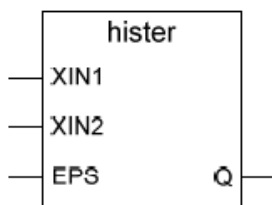


Рис. 4. Блок *hyster*

На вход *EPS* подается значение с переменной *HysterVAL*. На вход *XIN1* подается сигнал с датчика (например, переменная *IN_PUT_Temper*), на вход *XIN2* – граница включения/выключения нагревательного элемента (например, *TreshldForActL3*). При таком подключении выходной сигнал *Q* будет иметь значение *TRUE*, если *XIN1* перешел через $XIN2 + EPS$, но еще не ниже $XIN2 - EPS$ (рис. 5).

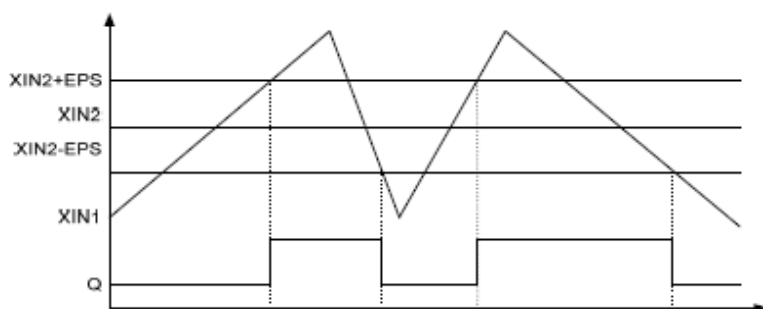


Рис. 5. Временная диаграмма блока *hyster*

В таком случае выходной сигнал будет иметь значение *TRUE* до пересечения $XIN2 + EPS$ и *FALSE* в интервале от $XIN2 + EPS$ до $XIN2 - EPS$. Для функционирования системы регулирования выходной сигнал инвертируется (инверторы реализованы на элементах сравнения). Инвертированный сигнал подается на блоки переменных, и в зависимости от его значения нагревательные элементы либо включаются, либо выключаются.

Алгоритм многопозиционных регуляторов определяется статической характеристикой – зависимостью выходных сигналов от входного.

На рис. 6 представлена статическая характеристика многопозиционной системы регулирования (см. рис. 3) с фиксированными уровнями «0», «1», «2» и «3», которые соответствуют мощностям нагревателей 0 Вт, 60 Вт, 95 Вт и 150 Вт.

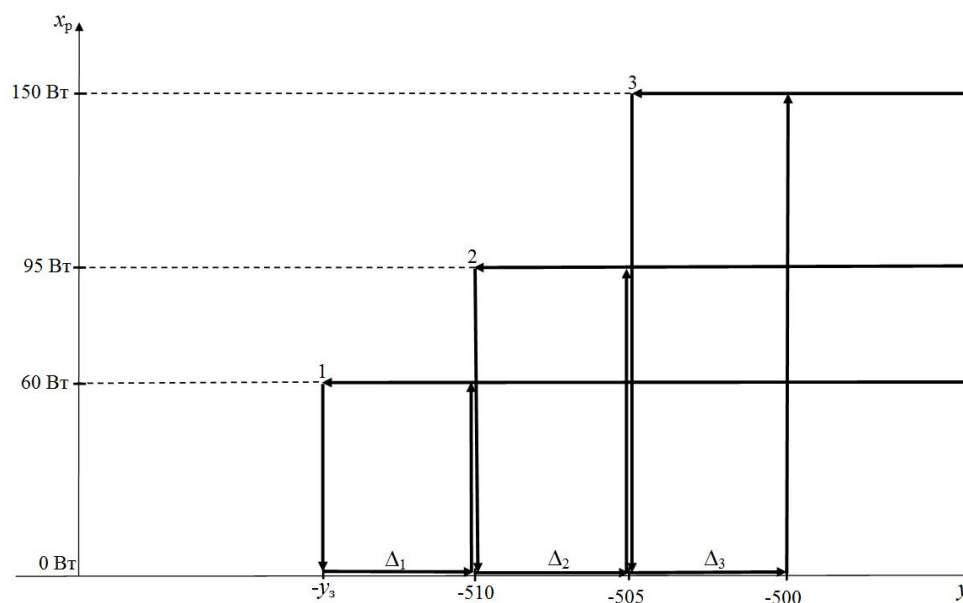


Рис. 6. Четырехпозиционная система управления

Сигнал по температуре y (рис. 6) инвертирован для возможности реализации системы многопозиционного регулирования в программной среде Matlab (Simulink) (рис. 7).

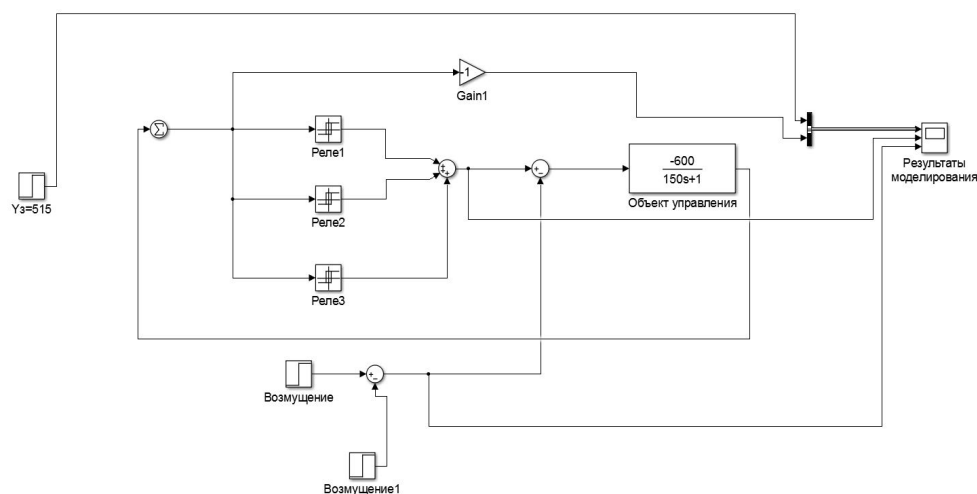


Рис. 7. Программная реализация четырехпозиционной системы регулирования в Simulink

На рис. 8 представлены результаты моделирования процесса регулирования температуры y в камере установки (см. рис. 1). На рис. 8,а показано изменение температуры в условных единицах, используемых для среды программирования контроллера Smart Base profi PEP Modular Computer, где y_3 – заданное значение температуры в камере. На рис. 8,б продемонстрирован процесс работы ступеней подачи энергии x_p в камеру, на рис. 8,в – влияние

возмущающего воздействия x_b (имитация открытия камеры и загрузки изделий для стерилизации).

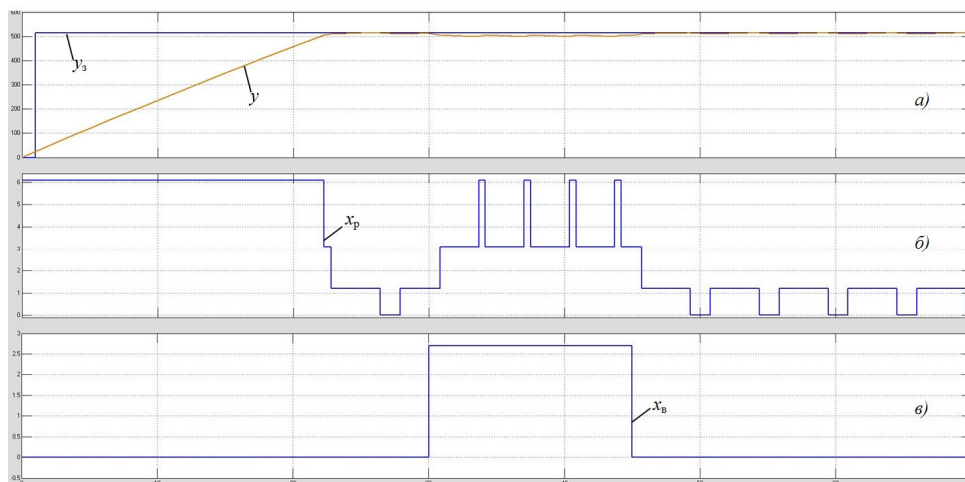


Рис. 8. Результаты моделирования четырехпозиционной системы регулирования

Как видно из графиков, в период нагрева камеры и в период действия возмущений работают все три ступени подачи энергии. В период стерилизации, когда необходимо поддержание температуры и требуется небольшое количество энергии, работает только последняя ступень низкой мощности.

Техническая реализация фиксации заданного уровня напряжения

Подача напряжения на нагревательные элементы в лабораторной установке осуществляется за счет электромеханического реле. Исполнительный узел также может быть реализован по бесконтактному принципу, например на электронных ключах на базе комплементарных МОП транзисторов, как это показано на рис. 9. Здесь управляющее напряжение в виде логических сигналов 1 и 0 подается на вход инвертора, выходное напряжение которого реализует открытие или запираание транзистора VT1. Коммутация транзистора VT2 реализуется непосредственно входным сигналом $U_{упр}$. Однако применение таких схем коммутации возможно только в случае сравнительно небольших рабочих мощностей – до 150–200 Вт. Более того, здесь может быть необходимым принудительное охлаждение транзисторов.

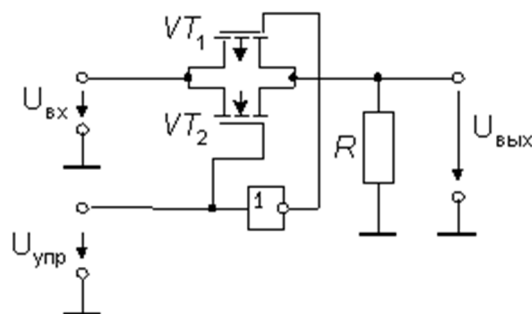


Рис. 9. Электронный ключ на базе МОП транзисторов

В лабораторной установке потребляемая максимальная мощность нагревателей составляет 150 Вт. Таким образом, здесь могут быть применены элементарные транзисторы типа КП781А (n -канал) и КП785А (p -канал) [10].

Заключение

Анализ результатов моделирования многопозиционной системы регулирования показал ее преимущество по сравнению с двухпозиционным методом управления. За счет быстрой и удобной настройки системы регулирования удастся повысить производительность работы медицинского оборудования, а также добиться поддержания минимального отклонения от заданной величины. Наличие нескольких ступеней включения нагревателей обеспечивает улучшение качества регулирования, экономию энергии и повышение времени безотказной работы оборудования.

Список литературы

1. Фролов С. В., Савинова К. С., Куликов А. Ю., Суконкин И. А. Использование эффективных систем позиционного регулирования для задач медицинской техники // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 2. С. 50–62. doi:10.21685/2227-8486-2022-2-4
2. Ключев А. С. Двухпозиционные автоматические регуляторы и их настройка. М. : Энергия, 1967. 104 с.
3. Новожилов Б. М., Козлов В. В. Обеспечение температурного режима воздушных компрессорных станций // Инженерный вестник. 2014. № 10. С. 590–599.
4. Новожилов Б. М. Многопозиционное регулирование в технологическом оборудовании // Аэрокосмический научный журнал. 2015. № 04. С. 25–36. doi:10.7463/aersp.0415.0812243
5. ГОСТ Р ИСО 20857-2016 Стерилизация медицинской продукции. Горячий воздух. Требования к разработке, валидации и текущему контролю процесса стерилизации медицинских изделий. М. : Стандартинформ, 2016. 46 с.
6. ГОСТ 31598-2012 Стерилизаторы паровые большие. Общие технические требования и методы испытаний. М. : Стандартинформ, 2013. 103 с.
7. Андреев Е. Б., Попадько В. Е. Технические средства систем управления технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. М. : Нефть и газ, 2005. 272 с.
8. Колтунцев А. В., Золотарев С. В. ISAGRAF 5 – Основа для создания распределенных приложений в среде программируемых контроллеров на базе стандарта IEC61499 // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 12. С. 40–43.
9. Деменков Н. П. Языки программирования промышленных контроллеров : учеб. пособие / под ред. К. А. Пупкова. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 172 с.
10. Петухов В. М. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности. М. : РадиоСофт, 2004. Т. 3. 672 с.

References

1. Frolov S.V., Savinova K.S., Kulikov A.Yu., Sukonkin I.A. The use of effective positional control systems for medical equipment tasks. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(2):50–62. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-2-4
2. Klyuev A.S. *Dvukhpozitsionnye avtomaticheskie regulatory i ikh nastroyka* = *Two-position automatic regulators and their adjustment*. Moscow: Energiya, 1967:104. (In Russ.)

3. Novozhilov B.M., Kozlov V.V. Ensuring the temperature regime of air compressor stations. *Inzhenernyy vestnik = Engineering Bulletin*. 2014;(10):590–599. (In Russ.)
4. Novozhilov B.M. Multi-position regulation in technological equipment. *Aerokosmicheskiiy nauchnyy zhurnal = Aerospace scientific journal*. 2015;(04):25–36. (In Russ.). doi:10.7463/aersp.0415.0812243
5. GOST R ISO 20857-2016 *Sterilizatsiya meditsinskoy produktsii. Goryachiy vozdukh. Trebovaniya k razrabotke, validatsii i tekushchemu kontrolyu protsessa sterilizatsii meditsinskikh izdeliy = GOST R ISO 20857-2016 Sterilization of medical products. Hot air. Requirements for the development, validation and ongoing control of the sterilization process of medical devices*. Moscow: Standartinform, 2016:46. (In Russ.)
6. GOST 31598-2012 *Sterilizatory parovye bol'shie. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy = GOST 31598-2012 Large steam sterilizers. General technical requirements and test methods*. Moscow: Standartinform, 2013:103. (In Russ.)
7. Andreev E.B., Popad'ko V.E. *Tekhnicheskie sredstva sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v neftyanoy i gazovoy promyshlennosti = Technical means of control systems for technological processes in the oil and gas industry*. Moscow: Neft' i gaz, 2005:272. (In Russ.)
8. Koltuntsev A.V., Zolotarev S.V. ISAGRAF 5 – The basis for creating distributed applications in the environment of programmable controllers based on the standard IEC61499. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery = Industrial automated control systems and controllers*. 2008;(12):40–43. (In Russ.)
9. Demenkov N.P. *Yazyki programmirovaniya promyshlennykh kontrollerov: ucheb. posobie = Programming languages of industrial controllers : textbook*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2004:172.
10. Petukhov V.M. *Tranzistory i ikh zarubezhnye analogi. Polevyye i vysokochastotnye bipolyarnyye tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti = Transistors and their foreign analogues. Field and high-frequency bipolar transistors of medium and high power*. Moscow: RadioSoft, 2004;3:672. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Владимирович Фролов

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой биомедицинской
техники,
Тамбовский государственный технический
университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: sergej.frolov@gmail.com

Sergei V. Frolov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department
of biomedical engineering,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Кристина Сергеевна Савинова

аспирант,
Тамбовский государственный технический
университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: savinova.k94@mail.ru

Kristina S. Savinova

Postgraduate student,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Григорий Павлович Ильин

студент,
Тамбовский государственный технический
университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: gregilyn@mail.ru

Gregory P. Ilyin

Student,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Александр Николаевич Ветров

кандидат технических наук, доцент
кафедры биомедицинской техники,
Тамбовский государственный технический
университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: avetrov@yandex.ru

Aleksandr N. Vetrov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of biomedical engineering,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 19.01.2023

Поступила после рецензирования/Revised 22.02.2023

Принята к публикации/Accepted 13.03.2023