УДК 681.526.

К.И. Хан, В.Д. Семенов, Д.О. Пахмурин, А.В. Кобзев

Калибровочный модуль для комплекса локальной гипертермии «Феникс-2»

Задача калибровочного модуля в комплексе локальной гипертермии заключается в нагревании игольчатых нагревателей с целью их калибровки до заданной температуры и стабилизации температуры с точностью не менее $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результат достигается за счет использования высокоточных датчиков и системы автоматического регулирования с использованием пропорционального интегрально-дифференцирующего регулятора. По результатам испытаний определено, что точность стабилизации, которая определяется точностью датчика, составляет $\pm 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: стабилизация температуры, температура, система автоматического управления.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-4-125-128

Комплекс локальной гипертермии «Феникс-2» (далее КЛГ, Комплекс) предназначен для лечения онкологических и других заболеваний путем создания и поддержания на заданном уровне высокой температуры в объеме живой ткани, ограниченном с помощью специальных нагревателей. Комплекс «Феникс-2» позволяет осуществлять тепловое воздействие как на поверхностные, так и на глубоко расположенные опухоли. В основе функционирования Комплекса лежит использование постоянного тока для нагрева специальных нагревателей, что не дает никаких негативных воздействий на организм пациента или медицинского персонала. КЛГ «Феникс-2» воздействует на ткани температурой, стабилизированной на уровне $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поддержание температуры на заданном уровне осуществляется без использования дополнительных термодатчиков за счет особой конструкции нагревателей, обеспечивающих контроль температуры [1].

Однако существует серьезная проблема – обеспечение необходимой точности калибровки. Для калибровки игольчатых нагревателей на оперативную температуру в комплексе локальной гипертермии используется калибровочный модуль. Заявленная точность стабилизации температуры игольчатых нагревателей составляет $\pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Тогда точность калибратора должна быть как минимум на порядок выше и составлять $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Обеспечить такую высокую точность крайне сложно, особенно, если учитывать, что диапазон температур калибровки достаточно широкий и составляет от 45 до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, заявленная точность калибровки должна сохраняться в течение длительного времени (до 8 ч) [2, 3].

Несколько упрощает задачу то, что не требуется осуществлять калибровку при температуре ниже температуры окружающей среды. Диапазон температур калибровки всегда выше температуры эксплуатации Комплекса, поэтому охлаждающий элемент для модуля не нужен, а его охлаждение будет происходить за счет отдачи тепловой энергии окружающей среде.

Еще одним важным моментом является жесткое ограничение по габаритам калибровочного модуля.

Он должен помещаться в стандартное посадочное место $200 \times 60 \times 40\text{ мм}$.

Техническое решение, удовлетворяющее всем перечисленным выше требованиям, не обнаружено, хотя и существуют калибраторы, которые достаточно близки по требуемым параметрам. Так, в качестве аналога, обеспечивающего калибровку нагревателей, рассматривался жидкостный термостат. Недостатками такого технического решения являются его большие габариты и использование жидкости (дезинфицирующего раствора) в процессе калибровки. К его недостаткам можно отнести наличие дополнительного источника питания, шум в звуковом диапазоне, а также недостаточную точность калибровки [4].

Также аналогом, который был использован как прототип при разработке модуля, является калибровочный модуль с термостатом, камера которого выполнена из меди. В предлагаемом калибровочном модуле, в отличие от жидкостного термостата, температура стабилизируется не в жидкости, а в твердом теле, из которого выполнена камера. Это позволяет отказаться от использования дополнительного внешнего оборудования при работе комплекса, что уменьшает его размеры, но ставит задачу обеспечения хорошего теплового контакта калибруемого нагревателя со стенками камеры.

В ходе подготовки КЛГ к клиническим испытаниям была поставлена задача повысить точность стабилизации температуры калибровки до $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ с поддержанием указанной точности в течение 8 ч и возможностью задания оперативной температуры калибровочного модуля с цифровой индикацией текущей температуры калибровки.

Техническое решение

Для решения поставленной задачи разработана структурная схема системы автоматического управления (САУ) температурой калибровочного модуля, представленная на рис. 1.

Задающий сигнал (ЗС) оперативной температуры калибровки в цифровом виде поступает от пульта управления (ПУ) на сумматор S, где сравнивается с сигналом обратной связи ОС, поступающим от цифрового датчика температуры (ЦДТ). Сумматор S,

ПИД-регулятор и широтно-импульсный модулятор (ШИМ) реализованы на микроконтроллере МК. Силовой регулирующий (исполнительный) РО-орган, обеспечивающий нагрев термостата, реализован на транзисторе (VT) и нагревателе RT. Тепловой поток мощностью P поступает на термостат T , который в данной САУ является объектом управления ОУ, и нагревает его до заданной температуры. Температура окружающей среды (T_{oc}) выступает в роли возмущающего воздействия. Реальная температура в камере термостата (T), измеренная с помощью цифрового датчика температуры ЦДТ, отображается на модуле отображения температуры (МОТ).

ЦДТ – цифровой датчик температуры
МОТ – модуль отображения температуры
RT – резистивный нагреватель термостата
ПУ – пульт управления
 T_{oc} – температура окружающей среды
 T – термостат

Рис. 1. Структурная схема системы автоматического управления

Камера термостата

Камера термостата выполнена в виде массивного корпуса из меди, в котором имеются каналы для введения калибруемых игольчатых нагревателей. На корпус камеры намотан медный провод, выполняющий роль резистивного нагревателя РН. Тепловое сопротивление между нагревателем и корпусом камеры термостата пренебрежимо мало за счет плотного прилегания и использования термопасты. Камера с нагревателем помещена в теплоизолирующую оболочку из «термофлекса», теплопроводность которого очень мала и составляет $0,032 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$. В первом приближении камеру T можно считать интегратором теплового потока P в системе автоматического управления.

Цифровой датчик температуры

Измерение температуры производится установленным на нагревателе термостата цифровым датчиком ЦДТ температуры ADT7420 от производителя Analog Devices. Датчик имеет возможность работы при напряжении 5 и 3,3 В. При напряжении питания 5 В в рабочем диапазоне проявляется систематическая погрешность $+0,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2), что недопустимо в данном применении. При использовании напряжения питания 3,3 В эта погрешность исключается (рис. 3) [5]. Датчик содержит 16-разрядный сигма-дельта АЦП, обладает высокой скоростью преобразования (6 мс). Для связи датчика с микроконтроллером используется интерфейс I2C.

Рис. 2. Погрешность датчика температуры при напряжении питания 5 В

Рис. 3. Погрешность датчика температуры при напряжении питания 3,3 В

Микроконтроллер

Микроконтроллер используется для выполнения функций ПИД-регулятора в системе автоматического управления нагревателем. В качестве микроконтроллера был выбран 8-разрядный MCU STM8S105C в корпусе LQFP44. В микроконтроллере на уровне периферии присутствует модуль I2C. МК, установленный в модуле, является ведущим на шине I2C. Передача данных по шине осуществляется с частотой 400 кГц. К шине подключены цифровой

датчик температуры и модуль вывода информации. Выход управления таймера используется для генерации ШИМ-сигнала, с помощью которого осуществляется управление нагревателем. На плате предусмотрены разъемы для подключения передней панели и панели задания температуры.

Моделирование

Для выбора коэффициентов ПИД-регулятора было проведено моделирование системы автоматического управления в среде Simulink Matlab. Задающее значение температуры выбрано 45 °С. Камера термостата в модели была представлена интегратором. Переходная характеристика замкнутой системы приведена на рис. 4.

Рис. 4. Переходная характеристика модели замкнутой системы по задающему воздействию и результаты измерений температуры датчика и иглы в процессе нагрева термостата

Из характеристики видно, что температура достигла заданного значения примерно за 17 мин, что удовлетворяет условиям технического задания. В установившемся режиме выходной сигнал САУ представлен на рис. 5.

Рис. 5. Выходной сигнал САУ в установившемся режиме

Из рис. 5 видно, что отклонение выходного сигнала от заданной оперативной температуры составляет 0,01 °С, что является вполне допустимым. Из графика видно, что случайная погрешность температуры (ее переменная составляющая) много мень-

ше систематической. Выбранные коэффициенты дискретного ПИД-регулятора были использованы при разработке программы для микроконтроллера модуля.

Результаты экспериментальных исследований

Для получения показателей качества регулирования экспериментального образца был использован отладочный режим микроконтроллера, в котором возможен доступ ко всем данным ПИД-регулятора в режиме реального времени. Данные температуры были получены как от цифрового датчика температуры, расположенного на термостате, так и от поверенного игольчатого измерителя температуры, помещенного в термостат. Результаты измерений представлены на графике в сравнении с результатами моделирования (см. рис. 4).

В результате проведения измерений была определена статическая разница температур с датчика и поверенного игольчатого измерителя в установившемся режиме, которая составила 0,04 °С. Измеренная температура корректируется программой микроконтроллера на указанную величину и отображается на модуле отображения температуры МОТ. Случайное отклонение от оперативного значения измеренной температуры по показаниям цифрового датчика (рис. 6) составляет $\pm 0,039$ °С.

Рис. 6. Показания цифрового датчика в установившемся режиме

Таким образом, исследования, проведенные авторами, продемонстрировали решение поставленной задачи – был разработан калибровочный модуль, полностью соответствующий поставленным требованиям. Данный модуль обеспечивает точность калибровки $\pm 0,1$ °С в диапазоне от 45 до 85 °С в течение нескольких часов, имеет возможность задания оперативной температуры и цифровую индикацию текущей температуры калибровки, а также укладывается в требуемые габаритные размеры.

Литература

1. Кобзев А.В. Управление электронными игольчатыми нагревателями при реализации метода локальной гипертермии и его экспериментальная проверка / А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, Д.О. Пахмурин и др. // Доклады ТУСУРа. – 2010, № 2 (22). Ч. 2 – С. 301–303. – <http://www.tu-sur.ru/filearchive/reports-magazine/2010-2-2/300.pdf>
2. Ганцев Ш.Х. Онкология: учеб. для студентов медицинских вузов. – М.: ООО «Медицинское информационное агентство», 2006. – 488 с.

3. Пат. 2 527 363 РФ, МПК А61В 18/12. Способ реализации термоабляции опухоли костей / Кобзев А.В., Семенов В.Д., Пахмурин Д.О. и др. (РФ). – № 2 013 127 554 / 14; заявл. 17.06.2013; опубл. 27.08.2014. Бюл. №16. – 12 с.

4. Жидкостный термостат ВТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://termexlab.ru/katalog/universalnoe-oborudovanie/termostat/vt/>, свободный (дата обращения: 16.11.2016).

5. Analog Devices ADT7420 Datasheet датчик температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADT7420.pdf>, свободный (дата обращения: 17.11.2016).

Хан Кирилл Иннокентьевич

Студент 4-го курса ТУСУРа

Тел.: +7-983-349-26-58

Эл. почта: kazmorebig@ya.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. ПрЭ

Тел.: 8-913-879-21-73

Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Пахмурин Денис Олегович

Канд. техн. наук, доцент каф. ПрЭ

Тел.: +7-903-913-46-38

Эл. почта: pdo@ie.tusur.ru

Кобзев Анатолий Васильевич

Д-р техн. наук, профессор каф. ПрЭ

Тел.: 8-913-829-70-01

Эл. почта: kav@ie.tusur.ru

Khan K.I., Semenov V.D., Pakhmurin D.O., Kobzev A.V.

Calibrating module for local hyperthermia complex «Phoenix-2»

The objective of calibrating module is to heat needle heater and maintain its temperature on certain level with maximum deviation ± 0.1 °C. The purpose is achieved using precision temperature sensor and proportional-integral-derivative controller in automatic control system. According the test results, the static error does not exceed 0.04 °C

Keywords: temperature stabilization, temperature, automatic control system.