

УДК 621.317.7

**В. А. Куликов**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**К. А. Никитин**, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**С. Г. Селетков**, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

**В. Н. Сяктерев**, кандидат технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

## РАЗРАБОТКА ТЕРМОСТАТА ЛАБОРАТОРНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

*Представлены схемы и принцип работы термостата, результаты совместного моделирования электрической схемы термостата и тепловой схемы лабораторного источника теплового потока, результаты экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** источник теплового потока, термостат, стабильность поддержания температуры.

Лабораторный источник теплового потока (ИТП) предназначен для градуировки градиентных датчиков теплового потока погружаемого типа [1], предназначенных для исследования тепловых процессов в грунте. Конструктивно ИТП представляет собой сосуд Дьюара, в который помещены нагревательный элемент, питаемый от стабилизированного источника напряжения, грунт, например песок, и выполненный в виде пластины стабилизатор температуры [2]. Для снижения теплопотерь через стенки сосуда Дьюара он окружен вторым стабилизатором температуры, выполненным в виде цилиндра.

Как показали исследования, для обеспечения высокой стабильности теплового потока, создаваемого в пространстве грунта между нагревательным элементом и пластинчатым стабилизатором температуры необходимо с высокой точностью, например, на

уровне сотых долей градуса, обеспечивать постоянство температуры стабилизатора. При этом его верхняя грань, через которую отводится тепло в окружающую среду, подвергается переменным во времени воздействиям температуры окружающей среды. Причем может изменяться как сама температура среды, так и коэффициент теплоотдачи от пластины стабилизатора в среду.

Принято решение в схеме управления стабилизатором температуры (далее в схеме термостата) использовать совмещенные датчик температуры и нагреватель (ДН), выполненные в виде плоского термопреобразователя сопротивления (ТПС). Это позволяет поместить ДН в минимальный объем и распределить его равномерно в плоскости пластины стабилизатора.

Рассматривались две схемы термостата.

Первая схема является импульсной и представлена на рис. 1 [3].

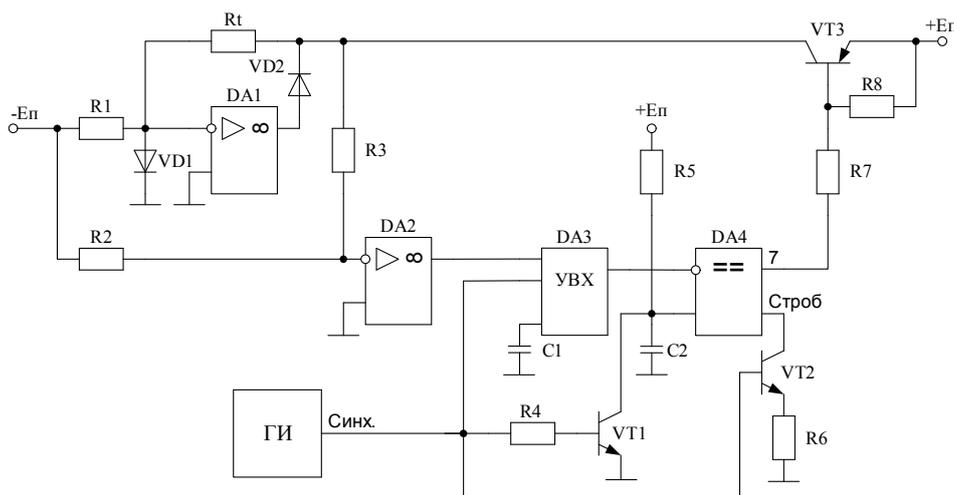


Рис. 1. Термостат импульсного регулирования

В схеме имеются измерительный мост, образованный ДН  $R_t$ , резисторами  $R_1 - R_3$  и операционным усилителем (ОУ)  $DA_1$ , усилитель сравнения на

ОУ  $DA_2$ , устройство выборки и хранения (УВХ)  $DA_3$ , стробируемый компаратор, построенный на основе интегрального компаратора  $DA_4$ , с открытым

коллектором на выходе и генератора тока на транзисторе  $VT_2$ , ключи на транзисторах  $VT_1$  и  $VT_3$ . Синхронизация схемы осуществляется генератором прямоугольных импульсов ГИ. Схема поочередно находится в режимах измерения температуры и нагревания.

Режим измерения температуры соответствует высокому уровню напряжения на выходе ГИ. В этом случае сигнал разбаланса измерительного моста, в который включен ДН, поступает на вход усилителя сравнения  $DA_2$  и после усиления записывается в УВХ, находящееся в режиме выборки. Выход компаратора благодаря высокому уровню напряжения строга находится в состоянии высокого импеданса, ключ на транзисторе  $VT_3$  закрыт и не оказывает влияния на работу моста.

При появлении на выходе ГИ низкого уровня схема переходит в режим нагревания. УВХ  $DA_3$  переключается в состояние хранения, транзистор  $VT_3$  переходит в режим отсечки. Конденсатор  $C_2$  в первый момент разряжен и начинает заряжаться через резистор  $R_3$ . Если при этом напряжение на выходе УВХ превышает напряжение на конденсаторе, компаратор переключается в состояние низкого импеданса на выходе и переводит транзистор  $VT_3$  в насыщение. От источника  $+E_n$  начинает поступать ток через ДН  $R_l$  и диод  $VD_1$ , разогревая ДН. При этом выход ОУ  $DA_1$  за счет диода  $VD_2$  отключается от ДН и коллектора транзистора  $VT_3$ , что обеспечивает защиту ОУ от перегрузок.

Когда напряжение на конденсаторе  $C_2$  достигает напряжения на выходе УВХ, компаратор переключается в состояние высокого импеданса, транзистор  $VT_3$  переходит в режим отсечки, ток нагрева ДН прерывается, и процесс нагревания заканчивается. Длительность интервала, в течение которого происходит нагревание ДН, определяется значением напряжения, записанного в УВХ в режиме измерения, и, следовательно, значением температуры ДН.

Таким образом, схема управления обеспечивает импульсный подогрев ДН, при этом температура ДН регулируется изменением длительности импульсов тока при постоянной частоте их следования.

Высокая точность поддержания температуры ДН и стабилизатора и компенсация погрешности, вносимой УВХ и компаратором, обеспечиваются за счет работы усилителя сравнения  $DA_2$  без отрицательной обратной связи. Оценка погрешности поддержания температуры ДН может быть выполнена на основе учета неидеальности усилителя по коэффициенту усиления:

$$\Delta T = \frac{U_{\text{вых}}(DA_2)}{K(DA_2)} \frac{R_2 + R_3}{R_2} \frac{R_1}{E_n} \frac{1}{\gamma} \approx \frac{R_1}{K(DA_2)\gamma}, \quad (1)$$

где  $K(DA_2)$  – коэффициент усиления ОУ  $DA_2$ ;  $\gamma$  – чувствительность ДН к температуре, Ом/К.

При  $R_1 = 3$  кОм,  $K(DA_2) = 10^6$ ,  $\gamma = 0,2$  Ом/К расчет по формуле (1) дает погрешность  $\Delta T = 0,015$  К.

Поскольку в режиме регулирования температуры в схеме автоматически поддерживается баланс измерительного моста, установка температуры ДН может производиться путем подбора сопротивления одного из его резисторов. При использовании  $R_3$  для расчета сопротивления по заданной температуре  $T$  может использоваться формула

$$R_3 = (R_{10} + \gamma T)R_2 / R_1. \quad (2)$$

Для проверки работоспособности импульсного термостата в среде MicroCap производилось совместное моделирование его электрической схемы и тепловой схемы ИТП, построенной на основе электротепловой аналогии [4]. В качестве грунта в ИТП использовался песок с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,326$  Вт/(м·К) и начальной температурой  $25$  °С. Температура окружающей среды задана на уровне  $20$  °С. Схема настроена на поддержание температуры  $25,225$  °С.

Временные диаграммы работы схемы в режиме поддержания температуры приведены на рис. 2. Здесь на верхней диаграмме показаны импульсы ГИ –  $v(\text{ImpGen})$ , напряжение на выходе УВХ –  $v(UVH)$  и на конденсаторе  $C_2$  –  $v(C_2)$ , на средней диаграмме показаны импульсы тока нагрева ДН –  $I(R_l)$ , на нижней – напряжение, численно соответствующее средней по объему температуре ДН.

Как видно, длительность нагрева уменьшается при приближении температуры ДН к заданной. Начиная с определенного момента времени, длительность нагрева фиксируется на некотором уровне. Далее стабильность поддержания температуры составляет  $0,002$  К.

При макетировании схемы было установлено, что реальная погрешность поддержания температуры в 3...4 раза превышает расчетное значение, что, в частности, является следствием влияния паразитных индуктивностей и емкостей в системе конструктива стабилизатора температуры и ДН.

Разработана аналоговая схема термостата, представленная на рис. 3.

Схема состоит из пассивного измерительного моста, собранного на резисторах  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , ДН  $R_l$  и ОУ  $DA_1$ , который работает как устройство сравнения и управляет током через ДН. Сопротивление резисторов выбирается из условия  $R_1 = R_2$ , при этом обеспечивается наибольшая чувствительность измерительного моста.

В процессе поддержания температуры через  $R_3$  и ДН протекает ток, разогревающий ДН до температуры, при которой его сопротивление становится равным сопротивлению  $R_3$ . Следовательно, изменяя  $R_3$ , можно изменять уставку температуры стабилизатора.

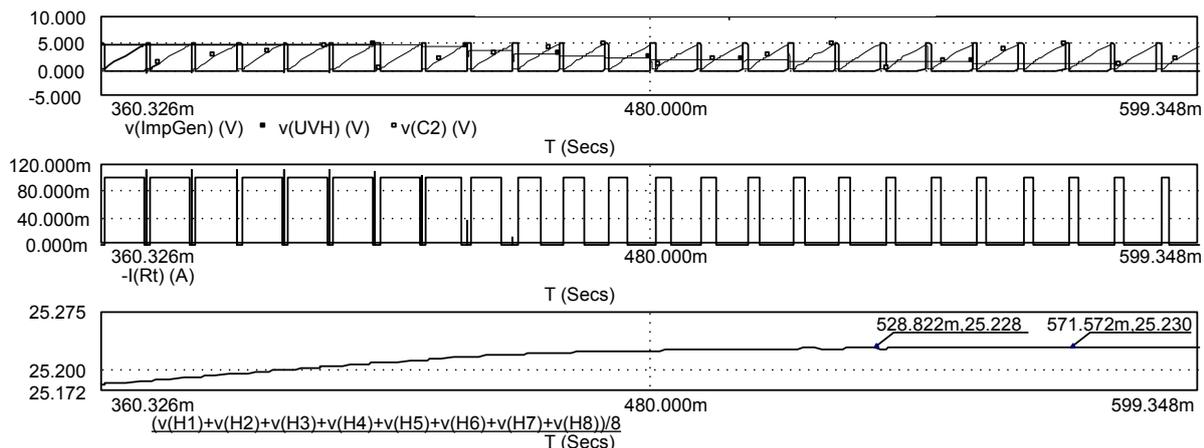


Рис. 2. Временные диаграммы термостата импульсного регулирования в режиме поддержания температуры

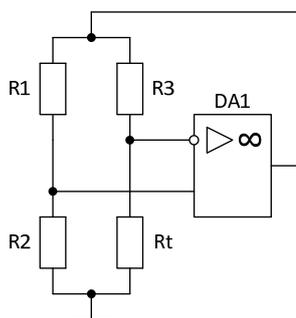


Рис. 3. Компенсационный термостат непрерывного регулирования

На точность поддержания температуры в режиме регулирования оказывает влияние зависимость сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  от температуры окружающей среды. Для снижения этого влияния необходимо выбирать резисторы  $R_1$  и  $R_2$  с одинаковым ТКС, а резистор  $R_3$  выполнить с ТКС равным нулю.

Результаты совместного моделирования электрической схемы термостата непрерывного регулирования и тепловой схемы лабораторного источника теплового потока приведены на рис. 4. Температура ок-

ружающей среды задана на уровне  $23\text{ }^\circ\text{C}$ , амплитуда суточных изменений составляет  $3\text{ K}$ . Термостат настроен на поддержание температуры  $31\text{ }^\circ\text{C}$ . На верхней диаграмме показано напряжение, численно соответствующее средней по объему температуре на ДН, на средней диаграмме  $v(\text{Temperature\_Environment})$  – напряжение, соответствующее температуре окружающей среды, на нижней представлен ток нагрева ДН  $I(R_t)$ .

Как видно из диаграмм, термостат непрерывно отслеживает температуру на ДН и при ее увеличении уменьшает ток его нагрева, а при уменьшении температуры – увеличивает ток.

Результаты экспериментальных исследований компенсационного термостата непрерывного регулирования приведены на рис. 5. Длительность эксперимента составляла 5 дней, в течение которых непрерывно прецизионным термометром с разрешающей способностью  $0,004\text{ K}$  [5] снималась термограмма в центре грунта между нагревателем и пластинчатым стабилизатором. Средняя температура в помещении составляла  $23\text{ }^\circ\text{C}$ , среднесуточное колебание температуры  $4\text{ K}$ . Термостат настроен на поддержание температуры на уровне  $32\text{ }^\circ\text{C}$ .

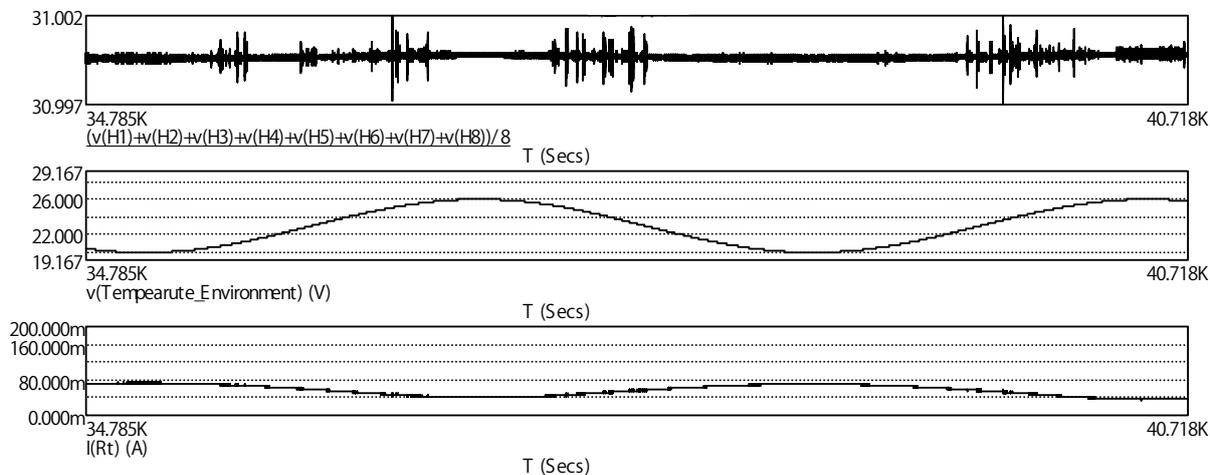


Рис. 4. Временные диаграммы работы термостата непрерывного регулирования в режиме поддержания температуры

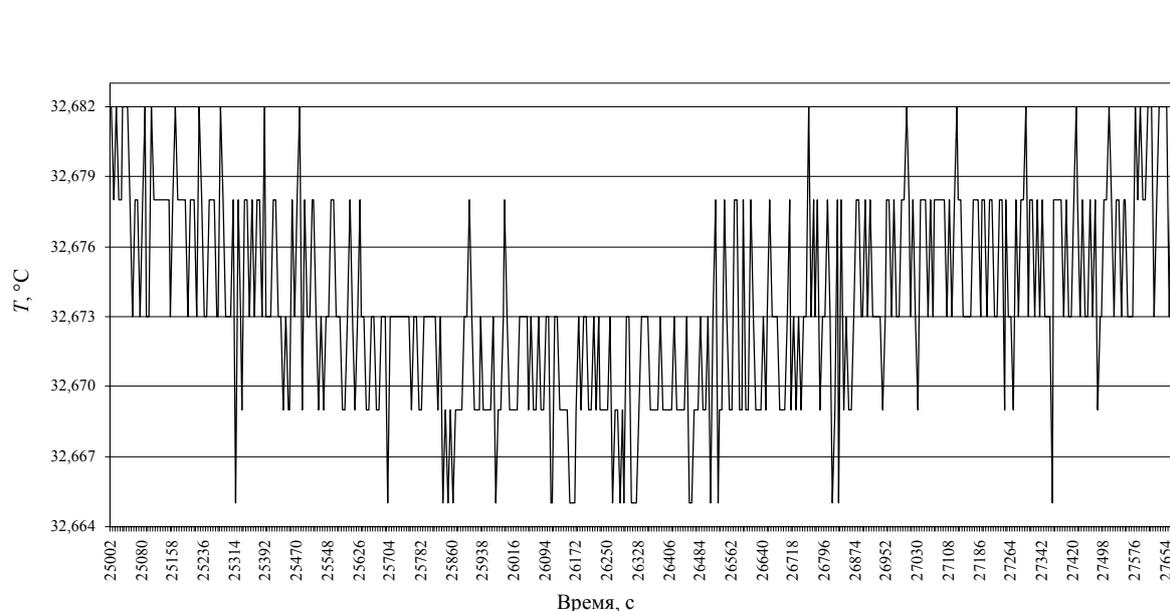


Рис. 5. Термограмма в рабочей зоне лабораторного источника теплового потока в режиме поддержания температуры

На термограмме видно, что средняя температура в рабочей зоне источника составляет  $32,673\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Колебания температуры в рабочей зоне не превышают  $\pm 0,004\text{ K}$ , что позволяет сделать вывод о высокой стабильности поддержания температуры компенсационным термостатом.

Таким образом, из двух предложенных схем термостатов наилучшими характеристиками обладает компенсационный термостат непрерывного регулирования, что подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями. Следовательно, компенсационный термостат может быть рекомендован к использованию в лабораторном ИТП. Полученные в процессе разработки теоретические и экспериментальные данные могут быть использованы при дальнейшей модификации схемы термостата.

#### Библиографические ссылки

1. Куликов В. А., Никитин К. А. Исследование градиентного датчика малых тепловых потоков в грунте // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 186–192.
2. Nikitin K. A. Investigations of laboratory heat-flux source // Third forum of young researchers. In the framework of International Forum “Education Quality – 2012” – Izhevsk : ISTU, 2012. – P. 176–180.
3. Куликов В. А. Микротермостат с совмещенным нагревателем и датчиком температуры // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 3. – С. 135–136.
4. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М. : Энергия, 1974. – 416 с.
5. Куликов В. А., Коновалов Е. А., Власов В. Г. Разработка канала измерения температуры термометра высокого разрешения // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. науч.-техн. конф. факультета «Информатика и вычислительная техника». – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 179–188.

V. A. Kulikov, DSc, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 K. A. Nikitin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 S. G. Seletkov, DSc, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University  
 V. N. Syakterev, PhD, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Development of Thermostat for Laboratory Heat-Flux Source

Schemes and principle of thermostat operation, results of co-simulation of the thermostat electrical scheme and heat scheme of the laboratory heat-flux source and results of experimental studies are presented in this paper.

**Keywords:** heat-flux source, thermostat, maintenance stability of temperature.