

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

УДК 621.365.832:681.536

И. В. Дубень¹, кандидат технических наук, доцент, **С. М. Нерода²**,
Д. А. Ционенко³, кандидат физико-математических наук, доцент,
А. К. Борисюк⁴

^{1, 2}Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Парковая, 62,
225401 Барановичи, Республики Беларусь, ¹duben_i_v@mail.ru, ²nerodastanislav@mail.ru

³Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, tsionenko70@mail.ru

⁴Общество с дополнительной ответственностью «Евролиния», пер. Козлова, 7А, 220037 Минск,
Республика Беларусь, qsun@eurolinia.by

СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ОБОГРЕВА ПОМЕЩЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

Для обогрева производственных помещений и оборудования на машиностроительных предприятиях в ряде случаев целесообразно использовать системы инфракрасного обогрева. Размещение обогревателей обусловлено размерами и особенностями помещения, требованиями технологии производства и санитарных норм. Обогреватели могут быть закреплены на высоте 2...7 м на стенах или потолке помещения. Автоматическое регулирование в системах обогрева зданий и сооружений способно обеспечить значительную экономию энергии, поэтому актуальной является разработка системы дистанционного управления инфракрасными нагревательными устройствами.

Разработана и испытана система дистанционного регулирования мощности инфракрасных нагревателей для обеспечения требуемого режима обогрева. Система состоит из модулей датчика температуры, регулятора мощности и модуля сервера с микроконтроллерами ESP, передача данных между которыми производится с помощью беспроводного интерфейса ESP NOW. Программное обеспечение включает также веб-сервер для управления системой по Wi-Fi со смартфона или ноутбука. Доступно ручное управление мощностью нагревателей и автоматическое регулирование температуры на основе двухпозиционного релейного регулятора или регулятора на основе нечеткой логики.

Выполнен анализ работы релейного и нечеткого регуляторов в переходном и установившемся режимах, определены условия применения системы в производственных условиях и перспективы ее использования для автоматизации процессов в машиностроительном производстве.

Ключевые слова: нагреватель; инфракрасный нагрев; регулирование температуры; нечеткое регулирование; релейное регулирование; автоматизация; дистанционное управление; датчик температуры.

Рис. 7. Табл. 2. Библиогр.: 11 назв.

I. V. Duben¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, **S. M. Neroda²**,
D. A. Tsionenko³, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,
A. K. Borisjuk⁴

^{1, 2}Institution of Education "Baranavichy State University", 62 Parkovaya Str, 225401 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ¹duben_i_v@mail.ru, ²nerodastanislav@mail.ru

³Institution of Education "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", 6 P. Brovki Str.,
220013 Minsk, the Republic of Belarus, tsionenko70@mail.ru

⁴ALC "Eurolinia", 7A Kozlova Lane, 220037 Minsk, the Republic of Belarus, qsun@eurolinia.by

REMOTE TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR INFRARED HEATING OF PREMISES AND EQUIPMENT

For heating production facilities and equipment at engineering enterprises, it is advisable to use infrared (IR) heating systems in some cases. The size and specific features of the premises, production technology requirements, and sanitary standards determine the placement of heaters. Heaters can be mounted at a height of 2...7 m on walls or the

ceiling of the premises. Automatic control in building and structure heating systems can provide significant energy savings; therefore, the remote control system development for infrared heating devices is highly relevant.

A system for remote regulation of IR heater power to ensure the required heating mode has been developed and tested. The system consists of temperature sensor modules, a power regulator, and a server module with ESP microcontrollers; data exchange between them is carried out via the wireless ESP NOW interface. The software also includes a web server for system control via Wi-Fi from a smartphone or laptop. Both manual control of heater power and automatic temperature regulation based on a two-position relay controller or a fuzzy logic controller are available.

An analysis of the relay operation and fuzzy controllers in transient and steady-state modes has been performed. The conditions for system application in industrial environments and the prospects for its use in automating processes in machine-building production have been determined.

Key words: heater; infrared heating; temperature control; fuzzy control; relay control; automation; remote control; temperature sensor.

Fig. 7. Table 2. Ref.: 11 titles.

Введение. Системы инфракрасного (далее — ИК) обогрева производственных и бытовых помещений, в отличие от водяных, воздушных и других систем, характеризуются прямой передачей энергии нагреваемой поверхности в облучаемой зоне. При установленном режиме работы распределение температур в помещении (нагреваемых поверхностей и окружающего воздуха) определяется процессами молекулярного теплообмена, естественной и принудительной конвекции. Инфракрасные обогреватели подходят для помещений с высокими потолками, так как тепловое излучение позволяет нагревать поверхности в облучаемой зоне, минимизируя аккумуляцию тепловой энергии под потолком. Системы ИК-обогрева рекомендуется использовать для локального обогрева рабочих мест, оборудования и производственных зон в полуоткрытых и открытых помещениях, а также на открытом воздухе, где применение других видов обогрева невозможно или малоэффективно [1].

Инфракрасный обогрев в производственных цехах машиностроительных производств, в отличие от бытовых помещений, характеризуется:

- относительно большой единичной мощностью ИК-обогревателей, которая составляет 6 кВт у подвесных обогревателей Vallu VİN-T-6.0 [2] и 9 кВт у обогревательных панелей модели ЭИП-С133 [3];

- значительными размерами помещений и, как следствие, большим расстоянием между обогревателями и объектами нагрева;

- необходимостью выполнения норм СанПиН по ИК-облученности тела человека в производственных условиях: интенсивность теплового облучения головы — не более 15...60 Вт / м², туловища человека — не более 25...150 Вт / м² в зависимости от температуры воздуха в помещении [4; 5].

В общем случае система ИК-обогрева состоит из одного или нескольких обогревателей, представляющих собой конструкцию из ИК-нагревателей или ТЭНов и отражателей, обеспечивающих заданное распределение мощности излучения в пространстве. Обогреватели соединены силовыми проводами со щитом управления и могут размещаться на высоте 3...7 м (и более) от поверхности пола [2; 3], что требует большой длины силовых кабелей. На практике управление нагревателями может производиться:

- 1) непосредственно вручную с помощью автоматических выключателей или тиристорных регуляторов типа ТРМ-3М [6] и др.;

- 2) дистанционно с помощью широко распространенных радиореле на частоте 433 МГц или аналогичных в сочетании с электромагнитным или симисторным реле (пускателем);

- 3) автоматически с помощью датчиков температуры и терморегуляторов, которые управляют симисторным реле или пускателем.

Следует учитывать, что автоматическое регулирование в системах обогрева зданий и сооружений способно обеспечить 5...15 % экономии энергии, в том числе за счет своевременного отключения нагревателей при достижении предельных температур [7].

При наличии датчиков температуры они размещаются в зоне ИК-нагрева и соединяются сигнальными слаботочными проводами с блоком регулирования, что при значительных размерах помещений требует большой длины проводки. При этом напряжение питания дат-

чиков, как правило, не превышает 5 В, сила тока аналоговых или цифровых сигналов — до 50 мА. Однако для обеспечения помехозащищенности передача аналоговых сигналов от датчика температуры к терморегулятору по проводам возможна на расстояние не более 1 м при их обязательном экранировании, поэтому предпочтительна передача цифрового сигнала по проводам или радиоканалу.

Материалы и методы исследования. Для обеспечения вышеприведенных требований разработана система дистанционного регулирования установкой ИК-обогрева, использующая беспроводное (ручное или автоматическое) управление мощностью ИК-нагревателей на основе беспроводной технологии обмена данными ESP NOW по радиоканалу на частоте 2,4 ГГц.

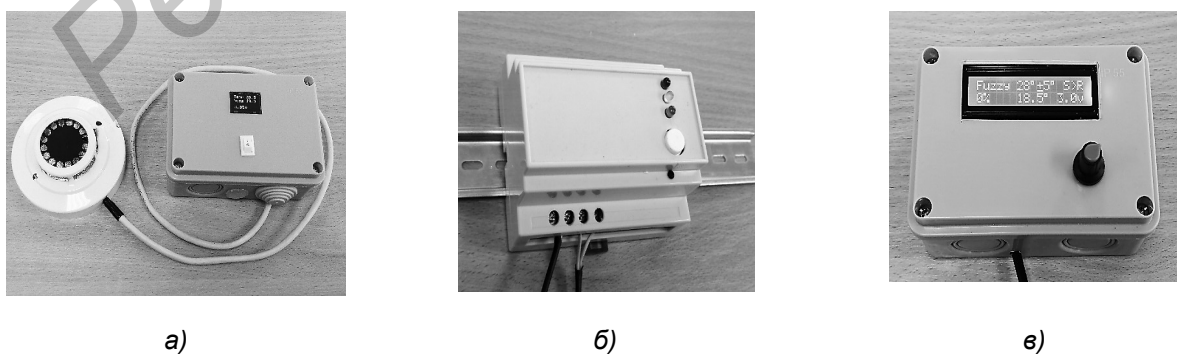
Конструктивно система дистанционного регулирования температуры включает три модуля (рисунок 1):

- 1) модуль датчика температуры, размещаемый непосредственно в контролируемой зоне помещения;
- 2) модуль регулятора, управляющий включением и отключением ИК-нагревателей в течение заданного времени цикла работы;
- 3) модуль сервера, располагаемый на расстоянии до 12...15 м от модулей регулятора и датчика в зоне доступа ответственного персонала, обеспечивающий беспроводную связь и настройку режимов работы.

Модуль датчика температуры функционально размещен в двух корпусах — непосредственно датчика и микроконтроллера, при этом в зоне нагрева помещения размещается только корпус с датчиком. Датчик может быть выполнен на основе термопары типа К с преобразователем MAX6675 или MAX31855, на основе термисторного датчика типа DS18B20 или ИК-датчика типа MLX90614 (рисунок 2). Во всех случаях на микроконтроллер от датчика передается цифровой сигнал, что обеспечивает помехоустойчивость при длине провода более 1 м (см. рисунок 1, а).

В корпусе с микроконтроллером находится аккумулятор типа 18650, который обеспечивает до 12 ч непрерывной работы модуля. Зарядка аккумулятора производится от обычного подзарядного устройства с напряжением 5 В через разъем micro-USB.

Датчик температуры (см. рисунок 1, а) представляет собой термопару типа К (хромель-алюмель), наклеенную на тонкую мембрану черного цвета, по периметру которой выполнена перфорация для уменьшения молекулярной теплопередачи на корпус датчика. Термопара имеет укороченные до 80 мм провода, по которым аналоговый сигнал передается на плату с преобразователем MAX6675, реализующим аналого-цифровое преобразование сигнала для дальнейшей передачи на микроконтроллер по интерфейсу SPI. В качестве измерительного преобразователя температуры можно также использовать преобразователь MAX31855 с термопарами разных типов, цифровой термисторный датчик DS18B20 в корпусе TO-92 или оптический ИК-датчик типа MLX90614 (таблица 1).



а — модуль датчика температуры; б — модуль регулятора нагрева; в — модуль сервера

Рисунок 1. — Общий вид системы дистанционного регулирования ИК-нагревом

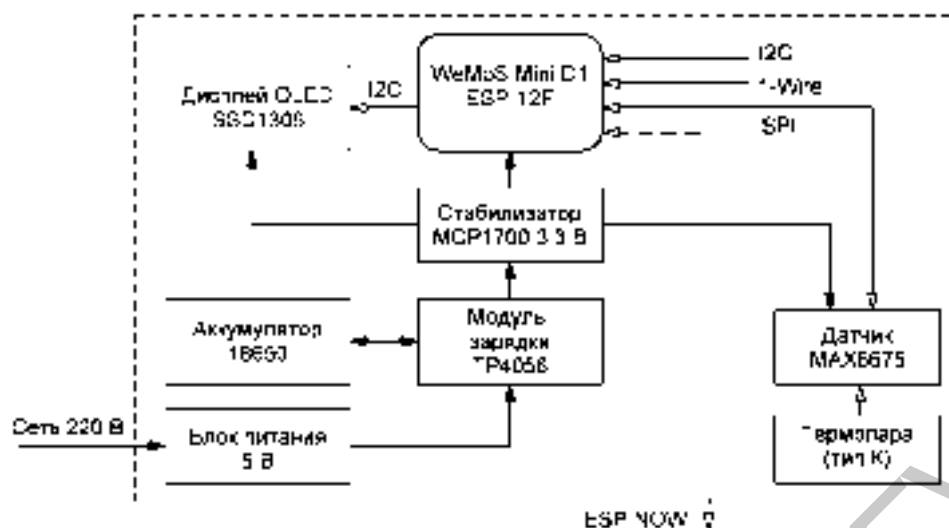


Рисунок 2. — Структурная схема модуля датчика температуры с преобразователем MAX6675

Т а б л и ц а 1. — Характеристики измерительных преобразователей температуры

Показатель	MAX6675	MAX31855	DS18B20	MLX90614
Тип измерительного преобразователя	Термопара (тип К)	Термопара (тип К, J, N, T, S, R или E)	Термистор	Оптический
Диапазон измерения температуры, °С	0...+600	-200...+1 300	-55...+125	-70...+380
Разрядность аналого-цифрового преобразователя, бит	12	14	12	17
Погрешность, °С	± 1,5	± 2	± 0,5...2,0	± 0,5...1,0
Интерфейс	SPI	SPI	1-Wire	I2C
Напряжение питания, В	3,0...5,5	3,0...3,6	3,0...5,5	2,4...5,5

Подключение различных типов датчиков позволяет использовать рассматриваемую систему регулирования не только для поддержания температуры в помещении в заданных пределах, но и для регулирования температуры в самых разных технологических процессах.

Микроконтроллер ESP8266 на плате Wemos D1 Mini обеспечивает передачу текущих значений температуры объекта нагрева и напряжения питания модуля на встроенный OLED-дисплей и на модуль сервера, применяя беспроводную технологию ESP NOW.

При использовании любого из вышеперечисленных типов датчиков передача цифрового сигнала между корпусами датчика и микроконтроллера обеспечивает необходимую помехозащищенность, при этом длина провода ограничена только конструктивными соображениями. Определение типа подключенного датчика и интерфейса (SPI, I2C или 1-Wire) в рассматриваемой системе выполняется автоматически.

Модуль регулятора нагрева (см. рисунок 1, б) построен на плате WeMos D1 Mini с микроконтроллером ESP-12F, который принимает по радиоканалу пакеты информации от модуля сервера и в зависимости от режима работы обеспечивает ручное или автоматическое управление нагревателем. Исполнительным органом служит симисторное реле типа FOTEK SSR-40DA (рисунок 3), однако могут быть использованы аналогичные однофазные или трехфазные аппараты с постоянным напряжением входного сигнала 3...5 В и током не менее 10 мА, например, трехфазный типа FOTEK TSR [8] или аналогичные.

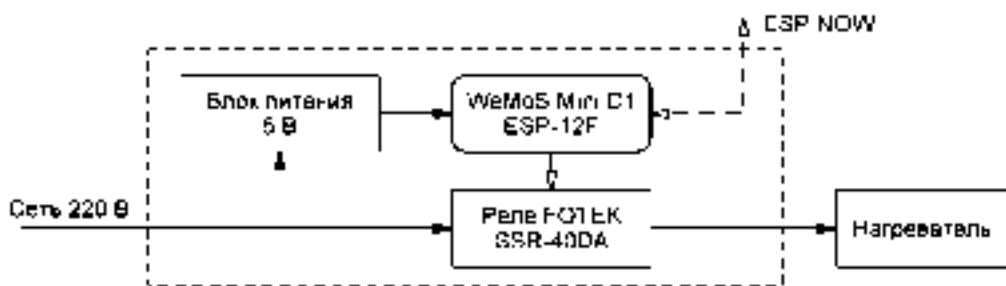


Рисунок 3. — Структурная схема модуля регулятора нагрева

На лицевой панели модуля регулятора, собранного в корпусе для монтажа на DIN-рейку, имеются три светодиода: желтый — питание включено; синий — наличие канала связи с сервером; красный — нагрев включен. Для коммутации и защиты предполагается установка на эту же DIN-рейку одно- или трехфазных автоматического выключателя и устройства защитного отключения.

Модуль сервера (рисунок 4) на микроконтроллере ESP32 выполняет:

- 1) прием и передачу по технологии ESP-NOW пакетов информации на модули датчика и регулятора мощности;
- 2) выбор режима работы, настройку параметров с помощью инкрементального энкодера;
- 3) отображение на двухстрочном индикаторе типа LCD1602 текущих значений температуры, относительной мощности p (%), текущих настроек и функционирования каналов связи модуля сервера с модулями датчика и регулятора;
- 4) функционирование асинхронного веб-сервера и формирование веб-страницы для передачи на смартфон или ноутбук по протоколу Wi-Fi (802.11 b/g/n).

Используемая для связи между модулями технология ESP-NOW представляет собой упрощенный протокол связи Wi-Fi на частоте 2,4 ГГц с передачей коротких пакетов между парами сопряженных устройств, разработанный фирмой Espressif для микроконтроллеров ESP8266 и ESP32 [9]. Технология ESP-NOW поддерживает следующие функции:

- 1) шифрование между сопряженными парами устройств;
- 2) идентификацию сопрягаемых устройств на основе их уникальных MAC-адресов;
- 3) передачу пакетов, содержащих до 250 байт полезной информации;
- 4) обратный вызов для информирования о статусе передачи пакетов;
- 5) дальность связи до 200 м при прямой видимости между сопрягаемыми устройствами и подключении внешних антенн.

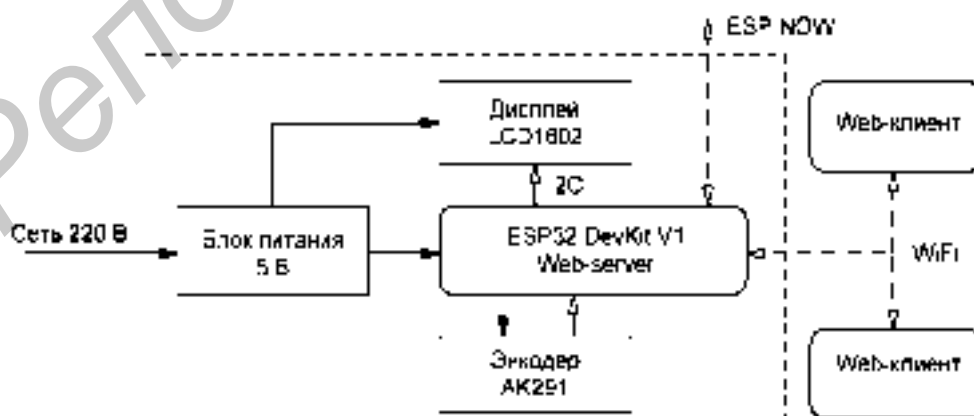


Рисунок 4. — Структурная схема модуля сервера

При использовании печатных антенн на платах типа WeMos D1 Mini с чипом ESP-12F и наличии препятствий проверенная дальность связи составляет 12...15 м. Веб-сервер, установленный на микроконтроллере модуля сервера, позволяет управлять параметрами регулирования температуры дистанционно с любого смартфона или компьютера в режиме реального времени. В результате управление системой ИК-обогрева может производиться как непосредственно с модуля сервера, так и с подключенного по Wi-Fi смартфона, ноутбука или компьютера.

Регулирование мощности нагревателя в предлагаемой системе осуществляется путем его периодического включения в сеть на заданные промежутки времени, которые могут составлять от 0,5 до 10,0 с и более. Относительная мощность нагревателя p (%) задается в процентах от номинальной мощности нагревательных элементов $P_{\text{ном}}$ (Вт), которая соответствует номинальному напряжению питания. Такой подход дает возможность объединять в систему несколько нагревателей, в том числе с различной номинальной мощностью.

В системе реализованы три способа регулирования мощности.

1. Ручное регулирование в диапазоне $p = 0...100$ % путем изменения продолжительности включения $t_{\text{в}}$ (с) в течение каждого цикла работы $t_{\text{ц}}$:

$$P = P_{\text{ном}} t_{\text{в}} / t_{\text{ц}} = p P_{\text{ном}} / 100.$$

Фактически это низкочастотное широтно-импульсное регулирование мощности аналогично пакетному способу управления, реализованному в тиристорных регуляторах ТРМ-3М [6], в которых тиристор открывается с заданной задержкой включения и удерживается открытым в течение числа периодов пропорционально заданной мощности.

Время цикла работы может быть задано в интервале $t_{\text{ц}} = 0,5...20,0$ с в зависимости от тепловой инерции нагревателя:

– $t_{\text{ц}} = 5...20$ с и более — для керамических нагревателей типа ИКН-101 и ИКН-201 [10], которые характеризуются относительно большим значением постоянной времени нагрева $T_0 = 2...4$ мин;

– $t_{\text{ц}} = 0,5...2,0$ с — для нагревателей с открытой спиралью и кварцевых нагревателей типа ИКН-400 [10] с постоянной времени нагрева $T_0 = 0,8...3,2$ мин.

2. Релейное двухпозиционное регулирование, основным параметром которого является гистерезис $t_{\text{гист}}$ — разность температур при выключении и включении источника напряжения:

– $p = 100$ %, если измеренная температура t (°С) объекта нагрева возрастает и превышает верхний порог $t_2 = t_{\text{зад}} + t_{\text{гист}} / 2$;

– $p = 0$ %, если температура объекта нагрева снижается и становится меньше нижнего порогового значения $t_1 = t_{\text{зад}} - t_{\text{гист}} / 2$.

3. Нечеткое регулирование, при котором среднее значение мощности P (Вт) поддерживается путем изменения продолжительности включения $t_{\text{в}}$ в течение цикла $t_{\text{ц}}$, которое в данном случае определяется с учетом отклонения температуры от заданной и скорости изменения температуры [11].

В программном обеспечении дополнительно реализованы функции самодиагностики. Система в реальном времени контролирует напряжение питания модуля датчика, проверяет наличие связи с исполнительными устройствами и отслеживает выход температурных показателей за установленные пределы. При возникновении критических ошибок работа нагревателя блокируется с выводом уведомлений в веб-интерфейс.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследование работы системы дистанционного регулирования температуры проводилось в лабораторных условиях при температуре воздуха в помещении +18...20 °С. В качестве источника ИК-излучения использовался керамический нагреватель ИКН-101 номинальной мощностью 800 Вт без кожуха-отражателя [10]. Расстояние от рабочей поверхности нагревателя до мембраны датчика температуры — 0,4 м.

В результате установлено, что технология ESP-NOW обеспечивает устойчивое соединение и беспроводную передачу параметров настройки и индикации при расстоянии между модулями датчика, сервера и регулятора 12...14 м при наличии преград в виде стен и металлических конструкций. Связь по Wi-Fi между модулем сервера и смартфоном надежно работает при расстоянии между ними до 15 м.

Нечеткий способ регулирования обеспечивает более точное поддержание температуры, чем релейный двухпозиционный регулятор (таблица 2, рисунки 5, 6). Если при релейном регулировании (заданный гистерезис — $\pm 1^\circ\text{C}$) реальный размах колебания температуры в стационарном режиме работы составляет около 5°C при коэффициенте вариации 2,5 %, то нечеткий регулятор обеспечивает коэффициент вариации не более 1 %.

Т а б л и ц а 2. — Характеристики работы нагревателя ИКН-101 при релейном и нечетком способах регулирования в течение 20 мин

Показатель	Способ регулирования	
	релейный	нечеткий
Среднее значение температуры, $^\circ\text{C}$	39,4	40,2
Интервал варьирования температуры, $^\circ\text{C}$	37,4...41,3	39,3...41,2
Коэффициент вариации температуры, %	2,55	0,72
Средняя продолжительность цикла работы, с	155,8	2
Средняя продолжительность включения нагревателя, с	107,1	1,15

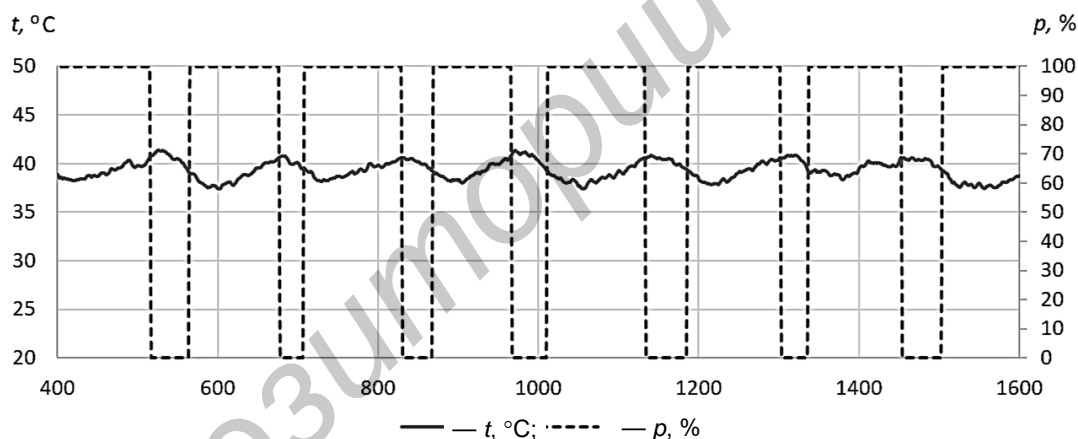


Рисунок 5. — Изменение относительной мощности p нагревателя и температуры t в стационарном режиме при релейном способе регулирования при заданном гистерезисе температуры $\pm 1^\circ\text{C}$

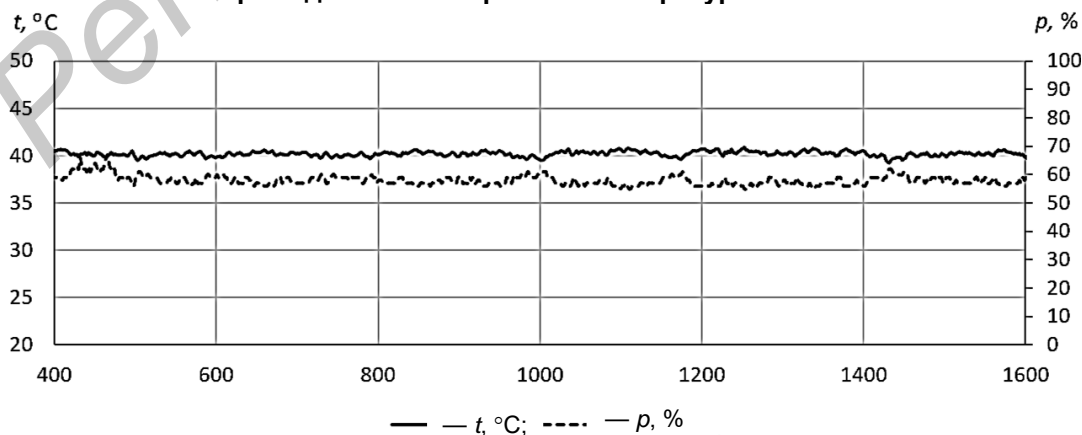


Рисунок 6. — Изменение относительной мощности p нагревателя и температуры t в стационарном режиме при нечетком регулировании при заданной ширине зоны регулирования $\pm 5^\circ\text{C}$

Количество включений нагревателя при релейном регулировании составило 12 за 30-минутный период работы (см. рисунки 5, 6), средняя продолжительность цикла работы — 2,6 мин, среднее время нагрева — 1,78 мин. При нечетком регулировании продолжительность цикла работы была задана равной 2 с, ширина зоны регулирования — 5 °С, при этом среднее время включения составило 1,15 с, что соответствует средней относительной мощности $p = 57,6\%$. Это означает, что повышение точности поддержания температуры достигается в том числе за счет более частых включений нагревателя, что в ряде случаев может оказаться избыточным или неприемлемым.

При использовании обоих типов регулятора наблюдалась одинаковая скорость нагрева с начальной температуры 20 °С до заданной 40 °С — в среднем 0,07 °С/с (рисунок 7). Применение нечеткого алгоритма регулирования позволяет избежать эффекта «перерегулирования» температуры, характерного для релейных регуляторов в целом при наличии значительной тепловой инерции системы «нагреватель — объект нагрева — датчик температуры».

Вычислительных возможностей у микроконтроллера серии ESP8266, установленного в модуле регулятора, достаточно для реализации других алгоритмов автоматического регулирования нагревателями (ПИ-, ПИД-, импульсно-фазовый и т. п.), а также защитных блокировок. Также возможна реализация других функций: суточного или недельного программирования — при подключении к модулю сервера модуля часов реального времени, ограничения скорости нагрева и контроля их температуры, например, при подключении к модулю термодатчика термопары типа ТХА (К), которая встраивается в корпус нагревателей серии ИКН исполнения 2 [10].

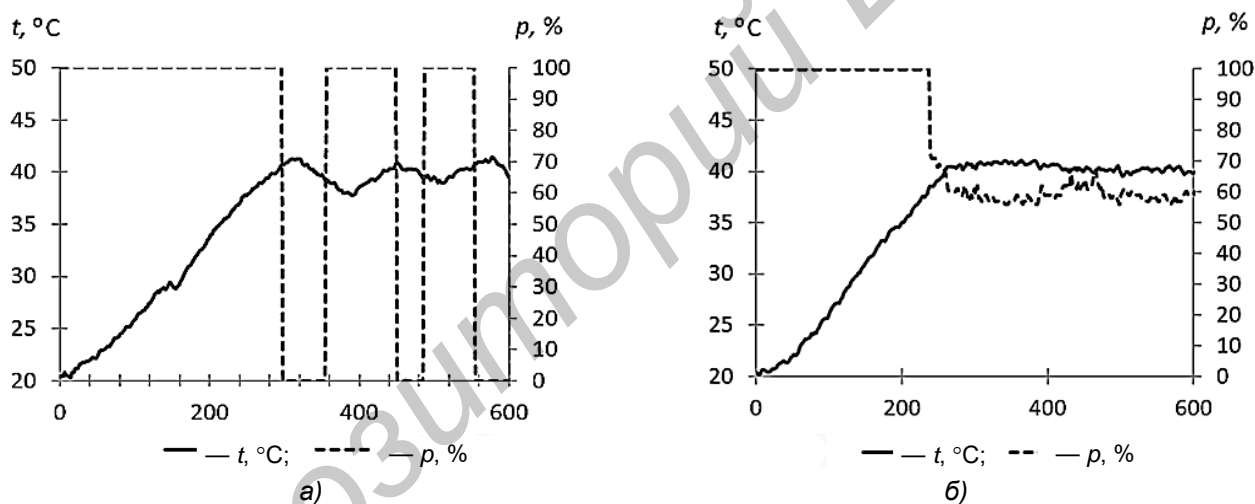


Рисунок 7. — Изменение относительной мощности p нагревателя и температуры t в процессе нагрева от 20 °С в течение 10 мин: а — при релейном регулировании; б — при нечетком регулировании

Заключение. Испытания в лабораторных условиях показали надежную работу системы дистанционного регулирования в ручном и автоматических режимах при расстоянии между модулями 12...15 м, что достаточно для условий промышленных предприятий. Разработанное программное обеспечение предусматривает автоматическое определение типа подключенного датчика и может быть адаптировано для управления процессом поддержания температуры для различных производственных процессов. В свою очередь, в программном обеспечении модуля регулятора могут быть реализованы различные алгоритмы управления температурой с учетом различных факторов и ограничений.

Определение мощности нагревательного устройства в относительных единицах относительно номинальной и модульный принцип комплектования пускозащитной аппаратуры дают возможность объединять в систему несколько нагревателей, в том числе с различной номинальной мощностью, для использования в больших производственных помещениях или нагревательных устройствах технологического назначения.

Список цитируемых источников

1. Применение обогревателей различных типов в системах инфракрасного обогрева: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: [https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/primenenie-obogrevatelej-razlichnyh-tipov-v-sistemah-infrakrasnogo-obogreva/](https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchатели-i-nagrevатели/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/primenenie-obogrevatelej-razlichnyh-tipov-v-sistemah-infrakrasnogo-obogreva/) (дата обращения: 15.02.2026).
2. Инфракрасные обогреватели: Промышленный концерн Ballu [сайт]. — URL: https://www.ballu.ru/catalog/tekhnika_dlya_doma_i_ofisa/obogrevately/ (дата обращения: 15.02.2026).
3. Отопление промышленных помещений. Локальный обогрев рабочих зон: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: <https://irh.by/production/obogrev-pomeshhenij-i-rabochih-mest/> (дата обращения: 15.02.2026).
4. Инфракрасный обогрев тела человека — нормативы и обеспечение микроклимата производственных помещений: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния». — URL: <https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/-otoplenie-proizvodstvennyh-i-bytovyh-pomeshhenij/> (дата обращения: 15.02.2026).
5. Требования к микроклимату рабочих мест в производственных и офисных помещениях : санитар. нормы и правила : утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 30 апр. 2013 г. № 33 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. — URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21327576p> (дата обращения: 26.02.2026).
6. Трёхфазный тиристорный регулятор ТРМ-3М (30-720А). ТУ 3428-006-31928807-2014. Описание и руководство по эксплуатации: ЗАО «Меандр» [сайт]. — URL: <https://www.meandr.ru/trm-3> (дата обращения: 10.02.2026).
7. *Виноградов, А. Н.* Сбережение тепловой энергии на объектах ЖКХ с применением технологии «Интернет вещей» и Wi-Fi-датчиков температуры / А. Н. Виноградов, В. П. Чипулис // Энергосбережение. — 2017. — № 7. — URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6775, <https://www.elec.ru/publications/peredacha-raspredelenie-i-nakoplenie-elektroenergi/1388/> (дата обращения: 15.02.2026).
8. Твердотельные реле FOTEK TSR: Компания «ЭЛЭРИС» [сайт]. — URL: <https://eleris.ru/-trehfaznye-ts.html> (дата обращения: 15.02.2026).
9. ESP-IDF Programming Guide: ESP-NOW [сайт]. — URL: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/network/esp_now.html (дата обращения: 15.02.2026).
10. Инфракрасные излучатели и нагреватели: ОДО «Номакон» и ОДО «Евролиния» [сайт]. — URL: <https://nomacon.by/ru/production/infrakrasnye-izluchately-i-nagrevately/> (дата обращения: 25.02.2026).
11. *Singhala, P.* Temperature Control using Fuzzy Logic / P. Singhala, D. N. Shah, B. Patel // International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS). — 2014. — Vol. 4. — No.1, January (DOI : 10.5121/ijics.2014.4101). — URL: https://www.researchgate.net/publication/260232896_Temperature_Control_using_Fuzzy_Logic (дата обращения: 25.02.2026).

Поступила в редакцию 08.04.2026.