



УДК 62-503.51:62-533.65
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-59-67>

Оригинальная статья
Original Paper

Автоматическое регулирование температуры воздуха в теплице с учетом данных прогноза погоды

А. Г. Сеньков

*Белорусский государственный аграрный
технический университет,
пр. Независимости, 99, Минск, 220023, Беларусь
E-mail: sencov_1981@tut.by*

Аннотация. Рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности и улучшения качества автоматического регулирования температуры воздуха в промышленных теплицах. Предлагается метод управления температурой воздуха в промышленной теплице на основе принципа компенсации возмущения с использованием данных прогноза погоды. Динамические свойства объекта управления приближенно описываются линейным апериодическим звеном первого порядка с запаздыванием. Для решения проблемы наличия транспортного запаздывания в объекте управления при выработке управляющего сигнала в цепи компенсации возмущения помимо сигнала датчика наружной температуры учитываются также данные прогноза изменения наружной температуры на определенный предстоящий интервал времени, что позволяет заблаговременно осуществлять соответствующее компенсирующее управляющее воздействие. Приводятся структурная схема системы автоматического регулирования температуры в помещении, теоретические математические выражения для синтеза регулятора и анализа качества регулирования, а также результаты численного моделирования процесса регулирования температуры. Предлагаемый метод управления может быть использован при регулировании температуры воздуха в зданиях и сооружениях с повышенными требованиями к параметрам микроклимата.

Ключевые слова: микроклимат, теплица, автоматическое регулирование, принцип компенсации возмущения, предиктивное управление

Для цитирования. Сеньков, А. Г. Автоматическое регулирование температуры воздуха в теплице с учетом данных прогноза погоды / А. Г. Сеньков // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 3. – С. 59–67. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-59-67>

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 18.06.2021
Подписана в печать | Accepted 22.07.2021
Опубликована | Published 29.09.2021

Automatic control of air temperature in the greenhouse considering the weather forecast data

Andrey G. Senkov

Belarusian State Agrarian Technical University,
av. Nezavisimosti, 99, Minsk, 220023, Belarus
E-mail: sencov_1981@tut.by

Abstract. The paper concerns the problem of improving energy efficiency and the quality of air temperature automatic control in industrial greenhouses. The article proposes a method based on the principle of disturbance compensation using weather forecast data. The plant dynamic model structure is described by the linear 1st order aperiodic link with delay both for the control circuit and for the disturbance circuit. To solve the problem of time delays in the plant mathematical model it is suggested along with the use of outside temperature sensor signal to take into account the weather forecast data for the outdoor temperature changes over the specific forthcoming interval of time. It allows the controller to generate appropriate compensation control signal in advance. The block diagram of the automatic control system of the greenhouse temperature is given. Theoretical mathematical expressions for the regulation algorithm and analysis of regulation quality are obtained and the results of numerical modeling of the temperature control process are presented. The proposed automatic control method can be used to regulate the air temperature in buildings with high requirements for microclimate parameters.

Keywords: microclimate, greenhouse, automatic control, disturbance compensation control, predictive control

For citation. Senkov A. G. Automatic control of air temperature in the greenhouse considering the weather forecast data. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 59–67 (In Russ.).
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-3-59-67>

Conflict of interest. The author declare of no conflict of interest.

Введение. Поддержание оптимальных параметров микроклимата внутри зданий и сооружений является одной из основных задач систем автоматизации современных тепличных комплексов. Комфортные условия для растений должны обеспечиваться даже при резких колебаниях температуры наружного воздуха в ночное и дневное время холодного периода года. При этом большое значение имеет энергоэффективность систем отопления. Сокращение тепловых энергетических затрат на обогрев промышленных теплиц особенно актуально для местностей и регионов с умеренным и прохладным климатом.

Целью проводимых исследований является улучшение энергоэффективности систем надпочвенного обогрева промышленных теплиц путем совершенствования известных линейных методов автоматического регулирования по отклонению и возмущению за счет дополнительного использования данных краткосрочного метеорологического прогноза по предстоящему изменению наружной температуры воздуха.

Исходная математическая модель автоматической системы трубного надпочвенного обогрева теплицы. В настоящее время одним из лучших по энергоэффективности считается комбинированное управление, сочетающее в себе принцип регулирования по отклонению температуры внутри сооружения от заданного оптимального значения и принцип компенсации основного возмущения – изменений наружной температуры воздуха [1]. Структура комбинированной односвязной системы автоматического регулирования (САР) температуры воздуха в помещении показана на рис. 1. Вследствие достаточно медленных по времени процессов изменения температуры воздуха внутри и снаружи сооружения можно пренебречь инерционностью соответствующих датчиков температуры по сравнению с тепловой инерцией самой теплицы.

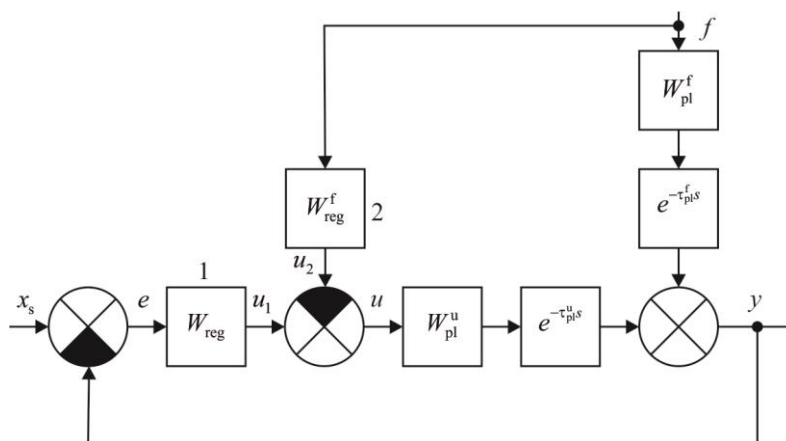


Рис. 1. Структурная схема комбинированной односвязной системы автоматического регулирования температуры воздуха в помещении [2]:
 x_s – задающее воздействие (требуемая температура воздуха) внутри сооружения; $e = x_s - y$ – ошибка регулирования

Fig. 1. Block diagram of combined single-connected system for automatic control of indoor air temperature in the industrial greenhouse [2]:

x_s – preset reference signal (required value of indoor air temperature); $e = x_s - y$ – control error

Сначала выполняется синтез передаточной функции $W_{\text{reg}}(s)$ регулятора в цепи управления по отклонению на один из типовых переходных процессов с использованием известных методов настройки, обеспечивающих требуемые значения запасов устойчивости¹. Затем синтезируется передаточная функция компенсатора возмущения $W_{\text{reg}}^f(s)$. Передаточная функция объекта управления (ОУ) по возмущающему воздействию определяется выражением [2]

$$W^f(s) = \frac{y(s)}{f(s)} = \frac{W_{\text{pl}}^f(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^f s} - W_{\text{pl}}^u(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}W_{\text{reg}}^f(s)}{1 + W_{\text{pl}}^u(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}W_{\text{reg}}(s)}, \quad (1)$$

где y – действительное значение температуры воздуха внутри сооружения (управляемая величина); f – изменение наружной температуры воздуха (возмущающее воздействие); s – комплексная переменная; $W_{\text{pl}}^f = W_{\text{pl}}^f(s)$ и $e^{-\tau_{\text{pl}}^f s}$ – передаточная функция и транспортное запаздывание ОУ по возмущающему воздействию; $W_{\text{pl}}^u = W_{\text{pl}}^u(s)$ и $e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}$ – передаточная функция и транспортное запаздывание ОУ по управляющему воздействию.

Из равенства (1) следует известное условие инвариантности рассматриваемой САП к изменениям возмущающего воздействия¹, заключающееся в данном случае в необходимости синтеза компенсатора возмущения в соответствии с формулой [2]:

$$W_{\text{reg}}^f(s) = \frac{W_{\text{pl}}^f(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^f s}}{W_{\text{pl}}^u(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}}. \quad (2)$$

Синтез компенсатора возмущения $W_{\text{reg}}^f(s)$ по формуле (2) может существенно уменьшить влияние основного внешнего возмущения на процесс управления. Так, например, при отсут-

¹Ротач, В. Я. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / В. Я. Ротач. – М. : Изд. дом МЭИ, 2008. – 396 с.

ствии транспортного запаздывания в математической модели ОУ и аппроксимации динамики ОУ типовыми аperiodическими звеньями первого порядка

$$W_{pl}^u(s) = \frac{K_{pl}^u}{T_{pl}^u s + 1}, \quad W_{pl}^f(s) = \frac{K_{pl}^f}{T_{pl}^f s + 1} \quad (3)$$

можно добиться пятикратного уменьшения перерегулирования переходной характеристики САР по возмущающему воздействию по сравнению с САР только по отклонению, т. е. без контура компенсации возмущения [2]. Полная инвариантность не достигается вследствие накладываемых дополнительных ограничений по типу «насыщение» на выходные сигналы используемых в схеме реальных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов).

В то же время при математическом описании переходных тепловых процессов в промышленных теплицах больших размеров нельзя пренебрегать транспортным запаздыванием в цепи управления, физически обусловленным большой протяженностью подающих и обратных трубопроводов в системе трубного надпочвенного обогрева. Поэтому в качестве математической модели промышленной теплицы следует использовать известную модель «серого ящика» с передаточными функциями по управляющему и возмущающему воздействиям в виде типового аperiodического звена первого порядка с транспортным запаздыванием [3–5]:

$$W_{pl}^u(s) = \frac{K_{pl}^u}{T_{pl}^u s + 1} e^{-\tau_{pl}^u s}, \quad W_{pl}^f(s) = \frac{K_{pl}^f}{T_{pl}^f s + 1} e^{-\tau_{pl}^f s}. \quad (4)$$

При синтезе компенсирующего регулятора в цепи возмущения $W_{reg}^f(s)$ по формуле (2) можно столкнуться с невозможностью его физической реализации¹ при $\tau_{pl}^u > \tau_{pl}^f$, так как в этом случае

$$W_{reg}^f(s) = \frac{K_{pl}^f}{(T_{pl}^f s + 1)} \frac{(T_{pl}^u s + 1)}{K_{pl}^u} e^{\Delta\tau s},$$

где $\Delta\tau = \tau_{pl}^u - \tau_{pl}^f > 0$.

Кроме того, наличие значительного транспортного запаздывания в цепи управления объектом, как известно, значительно ухудшает качество регулирования по отклонению и устойчивость САР при использовании ПИД-регулятора¹. Для решения проблемы транспортного запаздывания в цепи управления существуют методы управления и структурные схемы САР с использованием предиктора Смита². Применение же компенсации возмущения для объекта с транспортным запаздыванием затруднено, так как оно связано с отмеченной проблемой физической реализуемости регулятора $W_{reg}^f(s)$.

Для преодоления указанной проблемы предлагается использовать данные краткосрочного почасового прогноза погоды, позволяющие с достаточно большой точностью прогнозировать изменения наружной температуры воздуха на сутки вперед. Современные серверы погоды предоставляют в распоряжение пользователей программный интерфейс³ (англ. application programming interface, API), с помощью которого подключенный к сети Интернет пользователь (микропроцессорное устройство управления САР) может сформировать программный запрос

²Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. пособие / Ю. Ю. Громов [и др.]. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 76 с.

³Работа с погодой в PHP с помощью OpenWeatherMap API [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://prognose.ru/web-dev/beck-end/working-with-weather-in-php-using-the-openweathermap-api/>. – Дата доступа: 12.04.2021.

к серверу погоды и получить от него подробный прогноз (данные о температуре, влажности, скорости ветра, облачности, осадках) на ближайшие сутки⁴.

Предлагаемая в настоящей статье идея состоит в том, чтобы в комбинированной САР температуры в теплице в цепи компенсации возмущения в качестве входного сигнала для регулятора 2 (см. рис. 1) использовать помимо датчика наружной температуры и данные прогноза изменения наружной температуры на определенный предстоящий интервал времени τ^* для заблаговременной выработки соответствующего компенсирующего управляющего воздействия на ОУ. В итоге это позволит улучшить качество компенсации изменений наружной температуры воздуха и уменьшить энергозатраты на систему электрокалориферного надпочвенного обогрева, используемую обычно дополнительно с системой трубного надпочвенного обогрева для быстрой компенсации резких по времени изменений наружной температуры воздуха.

Математическая модель автоматической системы обогрева с учетом метеорологического прогноза по наружной температуре. Для реализации указанной идеи исходная структурная схема САР на рис. 1 должна быть преобразована к схеме, представленной на рис. 2. Непосредственно на ОУ возмущающим воздействием служит изменение текущего действительного значения наружной температуры воздуха $f(t)$, тогда как на регулятор 2 (рис. 2) в цепи компенсации подается изменение наружной температуры $f^*(t)$, прогнозируемое на некоторое ближайшее время τ^* вперед.

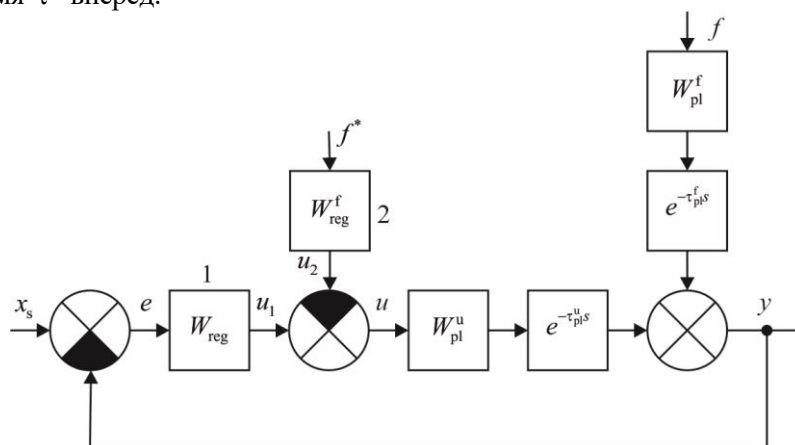


Рис. 2. Структурная схема САР с компенсацией изменения наружной температуры воздуха с учетом данных метеопрогноза

Fig. 2. Block diagram of automatic control system with compensation of outdoor air temperature changes taking into account weather forecast data

Соответствующее изменение управляемой величины $y(s)$ вместо выражения (1) приобретает вид

$$y(s)\Big|_{x_s=0} = \frac{W_{pl}^f(s)e^{-\tau_{pl}^f s} f(s) - W_{pl}^u(s)e^{-\tau_{pl}^u s} W_{reg}^f(s) f^*(s)}{1 + W_{pl}^u(s)e^{-\tau_{pl}^u s} W_{reg}^f(s)}, \quad (5)$$

а условие инвариантности рассматриваемой САР к изменениям возмущающего воздействия вместо (2) преобразуется в выражение

$$W_{reg}^f(s) = \frac{W_{pl}^f(s)e^{-\tau_{pl}^f s}}{W_{pl}^u(s)e^{-\tau_{pl}^u s}} \cdot \frac{f(s)}{f^*(s)}. \quad (6)$$

⁴OpenWeatherMap – как энтузиасты делают погоду [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/164045/>. – Дата доступа: 12.04.2021.

Таким образом, если прогноз изменения температуры воздуха абсолютно точен, по крайней мере на время τ^* вперед, т. е. изображение по Лапласу $f^*(s)$ «опережает» изображение $f(s)$ на время τ^* :

$$f(s) = f^*(s)e^{-\tau^*s}, \quad (7)$$

то выражение (6) для передаточной функции регулятора 2 в цепи компенсации принимает вид

$$W_{\text{reg}}^f(s) = \frac{W_{\text{pl}}^f(s)}{W_{\text{pl}}^u(s)} e^{-(\tau_{\text{pl}}^f + \tau_{\text{pl}}^u - \tau^*)s}. \quad (8)$$

Следовательно, при точно известных значениях τ_{pl}^u , τ_{pl}^f времени транспортного запаздывания ОУ и при соответствующем значении времени τ^* метеорологического прогноза, удовлетворяющем соотношению

$$\tau_{\text{pl}}^f + \tau_{\text{pl}}^u - \tau^* \geq 0, \quad (9)$$

положительно решается проблема физической реализуемости регулятора $W_{\text{reg}}^f(s)$ компенсации возмущения и теоретически достигается инвариантность рассматриваемой САР к изменениям возмущающего воздействия.

В ходе практической реализации рассматриваемого подхода неизбежно следует учитывать наличие погрешности данных краткосрочного метеопрогноза

$$f^*(t - \tau^*) = f(t) + \Delta f(t),$$

которую по аналогии с «опережением» (7) можно записать следующим образом:

$$f^*(s)e^{-\tau^*s} = f(s) + \Delta f(s), \quad (10)$$

где $\Delta f(s)$ – изображение по Лапласу температурной погрешности метеопрогноза.

С учетом равенства (10) выражение (5) можно преобразовать к виду

$$y(s)\Big|_{x_s=0} = \frac{\left(W_{\text{pl}}^f(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^f s} - W_{\text{pl}}^u(s)e^{-(\tau_{\text{pl}}^u - \tau^*)s}W_{\text{reg}}^f(s)\right)}{1 + W_{\text{pl}}^u(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}W_{\text{reg}}(s)} f(s) - \frac{W_{\text{pl}}^u(s)e^{-(\tau_{\text{pl}}^u - \tau^*)s}W_{\text{reg}}^f(s)}{1 + W_{\text{pl}}^u(s)e^{-\tau_{\text{pl}}^u s}W_{\text{reg}}(s)} \Delta f(s). \quad (11)$$

Рассматривая температурную погрешность краткосрочного метеопрогноза $\Delta f(t)$ в качестве случайной величины и не имея при этом достоверных данных о плотности вероятности ее распределения⁵, как и в случае использования предиктора Смита [6], для уменьшения влияния погрешности $\Delta f(t)$ можно предложить модификацию структурной схемы на рис. 2 (рис. 3). На рис. 3 видно, что регулятор 2, будучи по-прежнему синтезированным в соответствии с выражением (8), обеспечивает равенство нулю числителя первой из дробей в выражении (11):

⁵Хабутдинов, Ю. Г. Краткосрочные метеорологические прогнозы : материалы по курсам «Синоптическая метеорология» и «Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства» / Ю. Г. Хабутдинов, К. М. Шанталинский. – Казань : КГУ, 2008. – 52 с.

$W_{pl}^f(s)e^{-\tau_{pl}^f s} - W_{pl}^u(s)e^{-(\tau_{pl}^u - \tau^*)s}W_{reg}^f(s) = 0$. В то же время значение ошибки метеопрогноза $\Delta f(t)$ оценивается сравнивающим устройством 3 в соответствии с выражением (10) и сигнал рассогласования $\Delta f(t)$ также вводится в основной контур регулирования по отклонению, где его подавление выполняется с помощью регулятора 1.

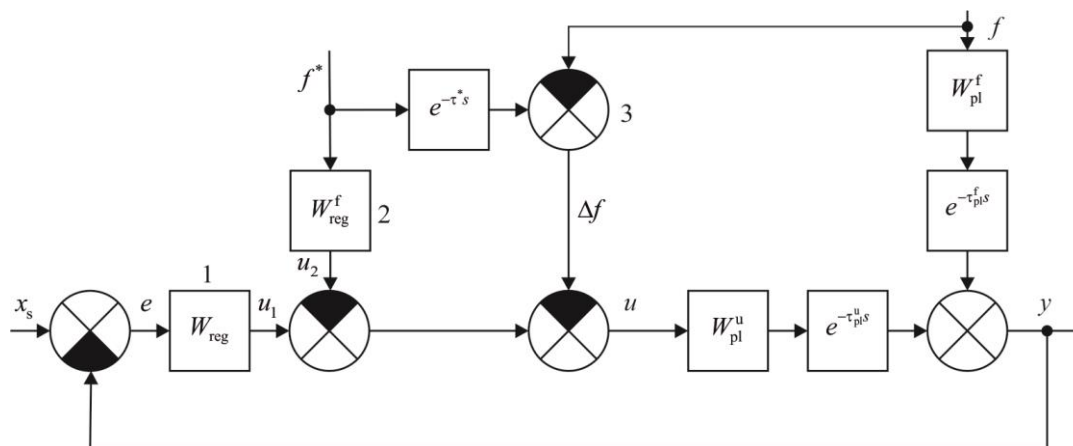


Рис. 3. Структурная схема АСР с компенсацией изменения наружной температуры воздуха с учетом возможных погрешностей данных метеопрогноза

Fig. 3. Block diagram of automatic control system with compensation of outdoor air temperature changes taking into account weather forecast data errors

Проверка реализуемости предложенной схемы АСР, а также оценка качества регулирования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием программного пакета динамического моделирования Simulink [7]. В качестве ОУ рассматривается блочная теплица, в которой для регулирования температуры воздуха в надпочвенной зоне имеется контур трубного водяного обогрева⁶. Управляющим воздействием на ОУ является изменение температуры теплоносителя путем изменения степени открытия трехходового смесительного клапана, установленного в контуре водяного обогрева. Для параметров динамической модели (4) ОУ приняты следующие числовые значения⁶: $T_{pl}^u = 35$ мин, $\tau_{pl}^u = 30$ мин, $K_{pl}^u = 1$ °С, $T_{pl}^f = 10$ мин, $\tau_{pl}^f = 0$ мин, $K_{pl}^f = 1$. Погрешность данных метеопрогноза моделировалась постоянным значением $\Delta f(t) = 0,25$ °С. Полученный график переходной функции АСР по возмущающему воздействию изображен на рис. 4. Как видно из рис. 4, а, значение перерегулирования при использовании предлагаемого комбинированного метода регулирования с учетом метеопрогноза (кривая 1) может быть уменьшено в четыре раза по сравнению с базовым вариантом схемы с пропорционально-интегральным регулированием по отклонению (кривая 2).

На рис. 4, б показан график соответствующего изменения во времени управляющего сигнала $u(t)$ блока регуляторов. В рассматриваемой комбинированной схеме изменение управляющего сигнала $u_{(1)}$ (кривая 1) вследствие учета данных метеопрогноза начинается заблаговременно, т. е. еще до момента времени $t = 0$ наступления ступенчатого возмущения. В то же время при использовании пропорционально-интегрального регулирования только по отклонению реакция АСР $u_{(2)}$ (кривая 2) на внешнее возмущение начинается после его наступления. Таким образом, помимо улучшения качества переходного процесса в системе за счет предусмотрительного снижения температуры теплоносителя при повышении наружной темпе-

⁶Ерков, А. А. Система управления микроклиматом в отделении блочных теплиц : автореф. дис. ... кан. тех. наук / А. А. Ерков. – М., 1995. – 20 с.

ратуры достигается также экономия тепловой энергии, пропорциональная величине

$$\Delta Q = \int_{-\tau}^{+\infty} (u_{(2)} - u_{(1)}) dt.$$

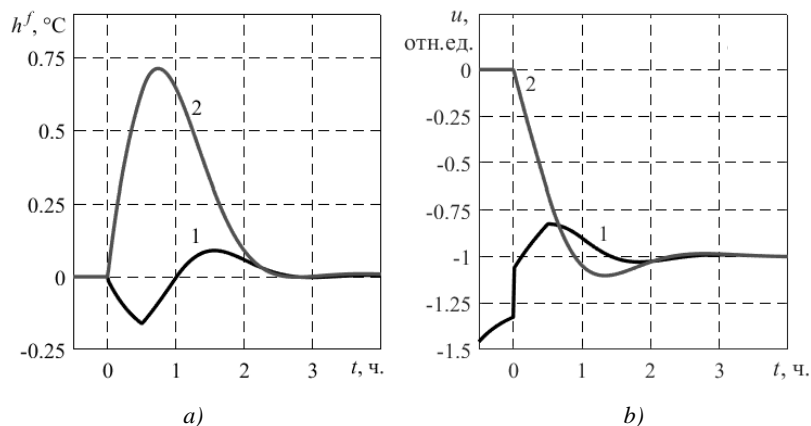


Рис. 4. Реакция САР на ступенчатое возмущающее воздействие – увеличение наружной температуры воздуха на 1°C: а) переходная функция САР по возмущающему воздействию; б) изменение управляющего сигнала регулятора;

1 – при наличии контура компенсации возмущения с учетом данных прогноза погоды; 2 – при регулировании по отклонению и отсутствии контура компенсации

Fig. 4. Automatic control system response to step increase of outdoor air temperature by 1°C: a) automatic control system time response – indoor air temperature change at time; b) controller output signal change over time;

1 – a considered system with main disturbance compensation circuit taking into account weather forecast data; 2 – a basic automatic control system with main feedback circuit and without weather forecast data

Заключение. Использование комбинированного управления позволяет улучшить качество регулирования системы при изменении возмущающего воздействия, но при этом возникает дополнительная задача синтеза параметров регулятора в цепи компенсации основного внешнего возмущения. Предложенные в настоящей работе способ компенсации изменений наружной температуры воздуха и структурная схема САР, основанные на дополнительном применении данных метеопрогноза по ожидающимся изменениям наружной температуры, решают проблему практического использования линейных регуляторов, например пропорционально-интегрального и пропорционального регуляторов, в цепи компенсации внешнего возмущения при наличии значительного транспортного запаздывания в математической динамической модели ОУ, которым в данном случае является блочная теплица с контуром водяного надпочвенного обогрева. В случае настройки регулятора в цепи компенсации возмущения исходя из критерия инвариантности САР к изменениям возмущающего воздействия, как показало численное моделирование, может быть достигнуто значительное улучшение показателей качества регулирования, например четырехкратное снижение значения перерегулирования переходного процесса по сравнению с базовым вариантом САР по отклонению.

Предложенный подход может быть применим также при разработке интеллектуальных систем отопления производственных, жилых и сельскохозяйственных помещений, характеризующихся значительной тепловой инерцией.

Список использованных источников

1. Панферов, В. И. Адаптация погодного графика регулирования отопления / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – С. 257–261.
2. Шейх Эль Нажжарин, М. Х. Синтез компенсатора возмущения в комбинированной системе автоматического управления с ПИД-регулятором в цепи основного канала / М. Х. Шейх Эль Нажжарин, А. Г. Сеньков, Н. Н. Гурский // Доклады БГУИР. – 2015. – № 4(90). – С. 98–102.

3. Панферов, В. И. Динамическая модель отопительных приборов и систем / В. И. Панферов, С. В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 75–82.
4. Сотников, А. Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции / А. Г. Сотников. – Л. : Машиностроение, 1984. – 240 с.
5. Сканави, А. Н. Переходные тепловые процессы в отопительных приборах / А. Н. Сканави, Л. М. Махов, В. Э. Сварич // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1986. – № 4. – С. 86–88.
6. Бобиков, А. И. Настройка параметров предиктора Смита с фильтром с помощью Simulink Response Optimization / А. И. Бобиков, Т. С. Бубнова // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 61. – С. 96–104.
7. Ощепков, А. Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB / А. Ю. Ощепков. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.

References

1. Panferov V. I., Panferov S. V. *Adaptation of the weather heating control schedule*. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta [Moscow State University of Civil Engineering Bulletin], 2011, no. 7, pp. 257–261 (In Russ.).
2. Cheikh El Najjarine M. H., Senkov A. G., Hurski N. N. *Synthesis of feedforward compensator in the combined system of automatic control with PID-regulator on the main channel circuit*. Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2015, no. 4(90), pp. 98–102 (In Russ.).
3. Panferov V. I., Panferov S. V. *Dynamic model of heating devices and systems*. Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija "Komp'yuternye tehnologii, upravlenie, radioelektronika" [Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer technology, Control, Electronics"], 2015, vol. 15, no. 2, pp. 75–82 (In Russ.).
4. Sotnikov A. G. *Avtomatizacija sistem kondicionirovanija vozduha i ventiljacii. Automation of Air Conditioning and Ventilation Systems*. Leningrad, Mashinostroenie, 1984, 240 p. (In Russ.).
5. Skanavi A. N., Mahov L. M., Svaritch V. E. *Transient thermal processes in heating devices*. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura [Proceedings of Universities. Construction and Architecture], 1986, no. 4, pp. 86–88 (In Russ.).
6. Bobikov A. I., Bubnova T. S. *Tuning filtered Smith predictor parameters with Simulink Response optimization*. Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2017, no. 61, pp. 96–104 (In Russ.).
7. Oshhepkov, A. Ju. *Sistemy avtomaticheskogo upravlenija: teorija, primenenie, modelirovanie v MATLAB. Automatic Control Systems: Theory, Application, Modeling in MATLAB*. Saint Petersburg, Lan', 2013, 208 p. (In Russ.).

Информация об авторе

Сеньков Андрей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления производством, Белорусский государственный аграрный технический университет.

Information about the author

Andrey G. Senkov, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of the Department of Automated Production Control Systems, Belarusian State Agrarian Technical University.