



Адаптивное итерационное управление температурой в теплице

**В. С. Грудинин, В. С. Хорошавин*, А. В. Зотов,
С. В. Грудинин**

*ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»
(г. Киров, Россия)*

**khoroshavin@vyatsu.ru*

Введение. Создание и развитие эффективных аграрных комплексов, обеспечивающих высокую урожайность при минимальных временных, материальных и энергетических затратах, невозможно без применения систем автоматического управления (САУ), позволяющих с высокой точностью поддерживать микроклимат теплицы. Усовершенствования САУ микроклимата направлены на нейтрализацию влияния параметрических возмущений процессов внутри и вне теплицы. На примере канала регулирования температуры в теплице с контуром отопления на основе горячего трубного водоснабжения предложен адаптивный итерационный (поисковый) алгоритм подстройки составляющих пропорционального-интегрального-дифференциального (ПИД) регулятора в контуре отопления для обеспечения требуемого качества процесса регулирования.

Материалы и методы. За основу синтеза управления принята параметрически неопределенная модель температуры в теплице, структура которой на основе принципа суперпозиции преобразована к виду с сосредоточенными на выходную координату управлением и возмущениями. Применение адаптивного ПИД-регулятора основано на анализе базы данных реального времени, содержащей тренды управляемого процесса. Используя операторы языка системы управления базами данных или SQL-запросы, оценивается качество регулирования. По оценке качества корректируются пропорциональная и дифференциальная составляющая ПИД-регулятора так, чтобы система управления работала на грани перехода в режим автоколебаний. Возникающая статическая ошибка компенсируется изменением задающего воздействия.

Результаты исследования. Проведено моделирование в программном комплексе MBTU (SimInTech) реальной структуры одноконтурной САУ температурой в теплице с включенными регулирующим, исполнительным и измерительным элементами, а также при наличии запаздывания в движении теплоносителя. Показано, что предлагаемый алгоритм адаптации, заключающийся в аддитивной подстройке коэффициентов ПИД-регулятора, удобно реализуемый в SCADA-системе, обеспечивает минимальное колебательное поддержание температуры при произвольных параметрических возмущениях и наличии запаздывания.

Обсуждение и заключение. Предлагаемый алгоритм адаптации обеспечивает компенсацию неопределенности модели и возмущений, при этом достигается требуемая точность поддержания температуры в теплице. Результаты исследования послужат материалом для разработки многоконтурной САУ микроклимата теплицы с исследованием влияния и компенсации параметрической и структурной неопределенности, инерционностей и нелинейностей реальных элементов. Результаты работы могут быть использованы во многих отраслях народного хозяйства для исследования общих и прикладных проблем цифрового адаптивного управления процессами.

© Грудинин В. С., Хорошавин В. С., Зотов А. В., Грудинин С. В., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: микроклимат, адаптивный итерационный алгоритм, ПИД-закон регулирования, пакет моделирования МВТУ

Для цитирования: Грудинин В. С., Хорошавин В. С., Зотов А. В., Грудинин С. В. Адаптивное итерационное управление температурой в теплице // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 383–395. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.383-395>

Adaptive Iterative Control of Temperature in Greenhouse

V. S. Grudinin, V. S. Khoroshavin*, A. V. Zotov,
S. V. Grudinin

Vyatka State University (Kirov, Russia)

*khoroshavin@vyatsu.ru

Introduction. Creation and development of efficient agricultural complexes providing high yields at minimal time, material, and energy costs is impossible without the use of automatic control systems (ACS), which allow for maintaining the microclimate of the greenhouse with high accuracy. Improvements of the microclimate by ASC are aimed at neutralizing the influence of parametric perturbations of processes inside and outside the greenhouse. Using the example of a temperature control channel in a greenhouse with a heating circuit based on hot piped water supply, an adaptive iterative (search) algorithm for adjusting the components of a proportional-integral-differential (PID) controller in the heating circuit is proposed to ensure the required quality of the control process.

Materials and Methods. The management is based on a parametrically uncertain model of temperature in the greenhouse, the structure of which, based on the principle of superposition, is transformed into a form with control and disturbances concentrated on an output coordinate. The use of an adaptive PID controller is based on the real-time analysis of a database containing trends of the controlled process. Using operators of Database Management System or SQL language, queries evaluate regulation quality in accord with quality assessment. Proportional and differential components of the PID controller are adjusted so that the control system works on the verge of switching to auto-oscillation mode. The resulting static error is compensated by a change in the driving force.

Results. Simulation of the real structure of a single-circuit automatic control system with temperature in the greenhouse with built-in regulating, executive and measuring elements, with a delay of a coolant movement was carried out using the software MVTU (SimIn-Tech). The proposed adaptation algorithm, consisting of the additive adjustment of the PID controller coefficients and being conveniently implemented within the SCADA system, was shown to provide the minimum oscillatory temperature maintenance for arbitrary parametric perturbations in the presence of the delay.

Discussion and Conclusion. The proposed adaptation algorithm provides for compensation for model uncertainty and disturbances, while achieving the required accuracy of maintaining the temperature in the greenhouse. Results of the study will serve as the basics for development of multi-contour ACS microclimate greenhouses with the examination of the impact and compensation of parametric and structural uncertainty, inertia and nonlinearities of real elements. Our results may be used in many sectors of the national economy to study the general and applied problems of digital adaptive process control.

Keywords: microclimate, adaptive iterative algorithm, PID control law, simulation package MVTU

For citation: Grudinin V.S., Khoroshavin V.S., Zotov A.V., Grudinin S.V. Adaptive Iterative Control of Temperature in Greenhouse. *Inzhenererennyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):383-395. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.383-395>

Введение

Процесс изменения микроклимата теплицы является многоконтурным, многопараметрическим и зависит от множества внешних и внутренних факторов [1; 2]. К внешним факторам относятся температура и влажность наружного воздуха, интенсивность солнечного излучения, направление и скорость ветра и т. п. К внутренним факторам относятся геометрические размеры теплиц, расположение элементов систем отопления и вентиляции, виды грунтов, генетические свойства и виды растений и т. п. Кроме того, в замкнутых контурах управления микроклиматом каналы управления могут значительно влиять друг на друга. Для учета этих факторов задачу управления микроклиматом целесообразно решать на основе современных методов теории автоматического управления¹.

Для иллюстрации предлагаемого адаптивного итерационного алгоритма управления стоит рассмотреть канал регулирования температуры теплицы с отоплением горячим трубным водоснабжением, которое применяется в северных регионах, где наружная температура меньше требуемой для создания микроклимата внутри теплицы. На основании закона сохранения тепловой энергии приближенная модель изменения температуры в теплице в зависимости от управляющего и основных возмущающих воздействий представляется в работах ряда исследователей [2–6] уравнением:

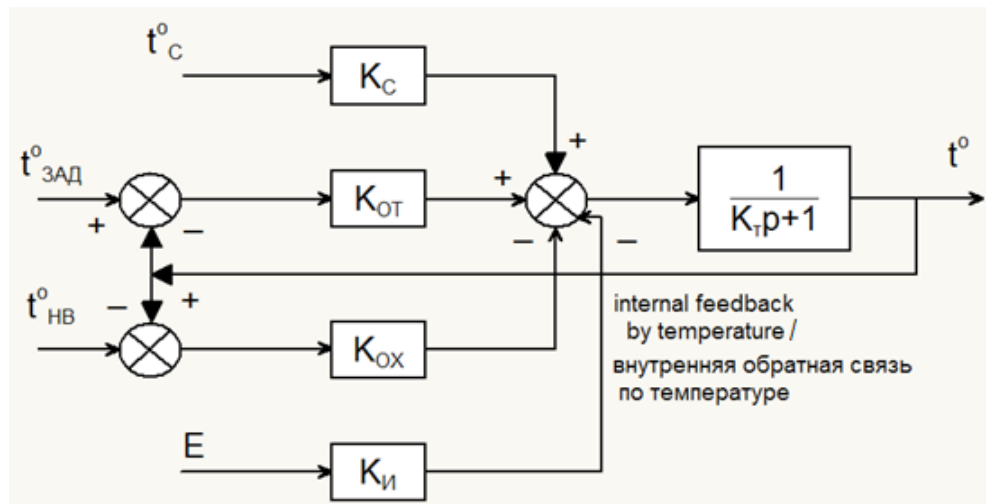
$$k_T \frac{dt^o}{dt} = k_c t_c^o + k_{OT} (t_{зад}^o - t^o) - k_{ox} (t^o - t_{не}^o) - k_u E, \quad (1)$$

где t^o – текущая температура воздуха в теплице; $t_{зад}^o$ – температура труб или воды в системе отопления; $t_{не}^o$ – температура наружного воздуха; t – время; k_T – конструктивный коэффициент теплицы в $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$, который определяется из выражения: $k_T = \rho C_p V_T / A_T$, в котором ρ – плотность воздуха в $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – удельная теплоемкость воздуха в $\text{Дж}/(\text{K}\cdot\text{кг})$; V_T – объем теплицы в м^3 ; A_T – площадь теплицы в м^2 ; k_c – коэффициент нагрева от солнца в $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$; t_c^o – температура воздействия от солнечного излучения; k_{OT} – коэффициент эффективности системы отопления в $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$, который определяется по формуле: $k_{OT} = C_h A_h / A_T$, где C_h – коэффициент преобразования тепла системы отопления $\text{Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$; A_h – площадь нагревательных элементов м^2 ; k_{ox} – коэффициент охлаждения в $\text{кг}/(\text{K}\cdot\text{с}^3)$, который определяется двумя составляющими: $k_{ox} = \rho C_p \phi_v(t) + \phi_c A_c / A_n$, где $\phi_v(t)$ – естественная вентиляция $\text{м}/\text{с}$; A_c – площадь стен и потолка теплицы м^2 ; ϕ_c – коэффициент передачи тепла в окружающую среду $\text{Вт}/(\text{K}\cdot\text{м}^2)$; $k_u E$ – коэффициент и скорость транспирации воды соответствующих размерностей.

Уравнению (1) соответствует структура объекта управления ОУ (теплицы) (рис. 1), которая является структурно определенной, но неопределенной параметрически. Эта структура имеет один канал управления и три канала возмущений, распределенно влияющих на выходную координату, а также две внутренние обратные связи, что затрудняет использование этой структуры для исследования влияния управления и возмущений.

Цель работы заключается в повышении точности поддержания темпера-

¹ Теория автоматического управления / В. Б. Яковлев [и др.]. М.: Высшая школа, 2009. 568 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/17973/> (дата обращения: 22.01.2019); **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с. URL: http://www.studmed.ru/miroshnik-iv-nikiforov-vo-fradkov-al-nelineynoe-i-adaptivnoe-upravlenie-slozhnymi-dinamicheskimi-sistemami_26c4345870b.html (дата обращения: 22.01.2019).



Р и с. 1. Исходная структура объекта управления
 F i g. 1. The initial structure of the control object

туры воздуха в теплице, для чего решаются следующие задачи:

- приведение исходной модели ОУ (1) и соответствующей структуры (рис. 1) к виду, удобному для исследования влияния неопределенности параметров модели и возмущающих воздействий;

- разработка алгоритма адаптации регулятора для структуры системы управления с учетом реальных элементов и запаздывания в передаче теплоносителя;

- проверка работоспособности реальной САУ температурой в теплице путем компьютерного моделирования.

Обзор литературы

Наиболее распространенным на практике методом регулирования температуры в теплице является введение ПИД-регулятора в контур отопления [3; 11] из-за его простоты. Однако он имеет ограничения по качеству регулирования, так как не учитывает неопре-

деленность параметров и действие возмущений. Применение искусственных нейронных сетей [8; 9] позволяет получить высокую точность регулирования, что сложно применимо на практике из-за необходимости обучения. Это касается использования достаточно сложных интеллектуальных систем [7; 10]. Применение математических моделей [11; 12] позволяет учесть некоторые нелинейности в динамике, но не учитывает неопределенность параметров. Методы адаптивного и модального управления² применены в работах ряда ученых [7; 10; 13] для синтеза одноканального регулятора и в исследовании Д. Н. Герасимова и М. В. Лызлова [2] для синтеза многоканального регулирования микроклимата теплицы, где использованы беспоисковые алгоритмы адаптации на основе идентификации неопределенных параметров и оценки их состояния. Беспоисковые алгоритмы адаптации требуют значительных

² Анализ систем автоматического управления методом модального управления / В. В. Григорьев [и др.]. СПб.: СПб ГУИТМО, 2007. 108 с. URL: <http://books.ifmo.ru/file/pdf/266.pdf> (дата обращения: 22.01.2019); Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами.

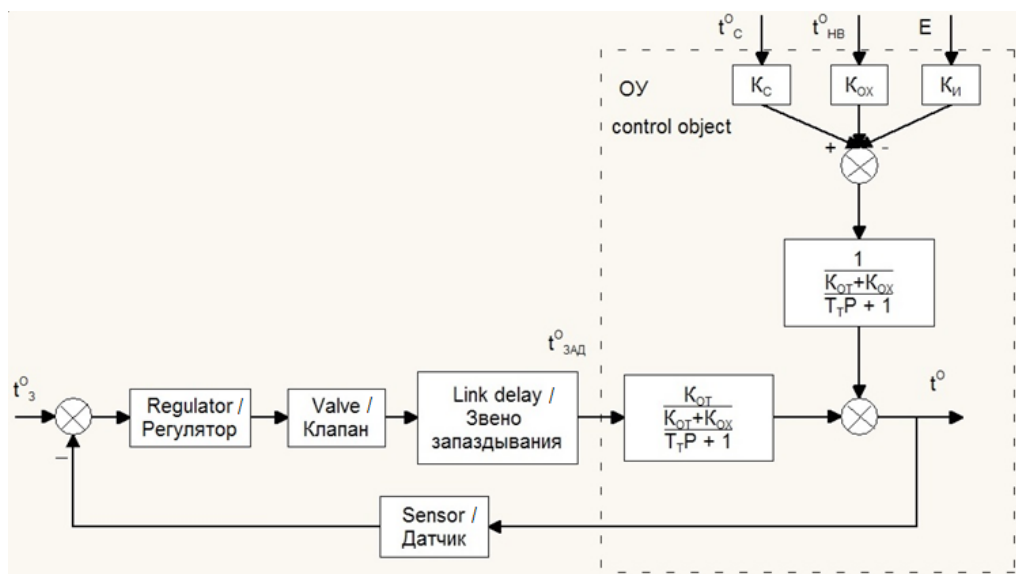
вычислительных ресурсов, так как для их реализации необходима достаточно полная информация о действующих изменениях параметров, возмущений и их принадлежности определенному классу.

В некоторых случаях для создания системы управления микроклиматом на основе общепромышленных SCADA-систем³, когда имеется возможность применения стандартного ПИД-регулятора, но или нет возможности реализации экстраполятора Смита [14] для компенсации транспортного запаздывания, или неизвестна точная структура модели объекта управления, требуется поддерживать состояние температурного режима с максимально высокими настроечными коэффициентами регулятора [15]. Некоторые SCADA-системы имеют средства для автоматической настройки ПИД-регулятора⁴,

но в системах с большими транспортными задержками их работа не приводит к нужному результату. В условиях нестационарности объекта это может привести к срыву процесса управления в автоколебательный режим, что нередко наблюдается на практике.

Материалы и методы

Приведение исходной модели температуры воздуха в теплице (1) и соответствующей структуры ОУ к виду, удобному для исследования параметрической неопределенности модели и возмущающих воздействий, проделано путем формального алгебраического преобразования уравнения теплового баланса (1) и по правилам эквивалентных преобразований структурных схем линейных САУ. В результате преобразований получена структура реальной системы управления температурой в теплице (рис. 2), в которой в более опре-



Р и с. 2. Структура реальной системы управления температурой теплицы

F i g. 2. Structure of a real greenhouse temperature control system

³ SCADA TRACE MODE. AdAstrA Research Group [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adastra.ru> (дата обращения: 22.01.2019).

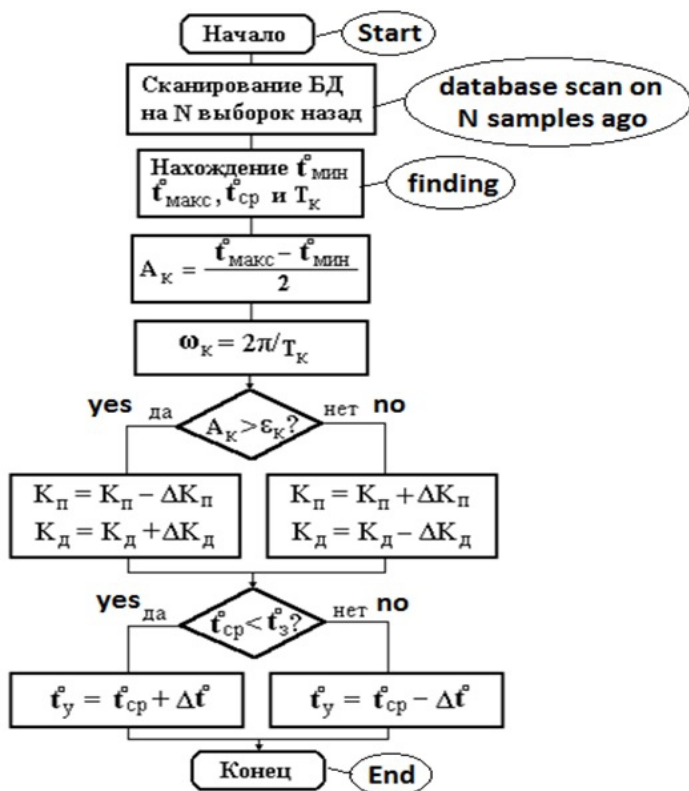
⁴ Зорин С. В. ПИД-закон регулирования. Метод нахождения ПИД-коэффициентов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).

деленной структуре ОУ сосредоточено на выходную координату через апериодические звенья с постоянной времени T_T в секундах, равной отношению $T_T = k_T / (k_{OT} + k_{OX})$, действуют управление и возмущения, исключена внутренняя обратная связь, в канал управления температурой введены регулирующий, исполнительный и измерительный элементы, а также учтено запаздывание в движении теплоносителя.

На основе проведенного анализа существующих решений по синтезу САУ температурой в теплице в работе используется ПИД-регулирование в SCADA-системе с учетом запаздывания и адаптивный итерационный (поисковый) алгоритм подстройки ПИД-регулятора для компенсации про-

извольных не заданных заранее параметрических возмущений. Применение итерационного (поискового) алгоритма адаптации обусловлено тем, что для реальных процессов как проектируемых, так и функционирующих, есть предварительная информация об управляемом процессе.

Структурная схема итерационного алгоритма определения параметров динамики процесса и подстройки коэффициентов ПИД-регулятора представлена на рисунке 3. В предположении, что в системе управления ведется база данных реального времени, которая содержит тренды управляемого процесса, можно применить адаптивный регулятор, использующий анализ этой базы данных. В его основе лежит оценка



Р и с. 3. Алгоритм определения параметров процесса и подстройки коэффициентов ПИД-регулятора
 Fig. 3. Algorithm for determining the process parameters and adjusting the coefficients of the PID controller

предыдущего состояния процесса регулирования. Если известна основная постоянная времени процесса регулирования T_o и период дискретизации T_o системы управления, то известно и количество записей в базе данных относительно текущего момента, которые могут дать информацию о ходе регулирования с числом выборок $N = T_o / T_o$. Используя или операторы языка СУБД или SQL-запросы, можно определить температуры $t_{мин}^0$, $t_{макс}^0$, $t_{ср}^0$, период T_k и амплитуду A_k колебаний процесса регулирования.

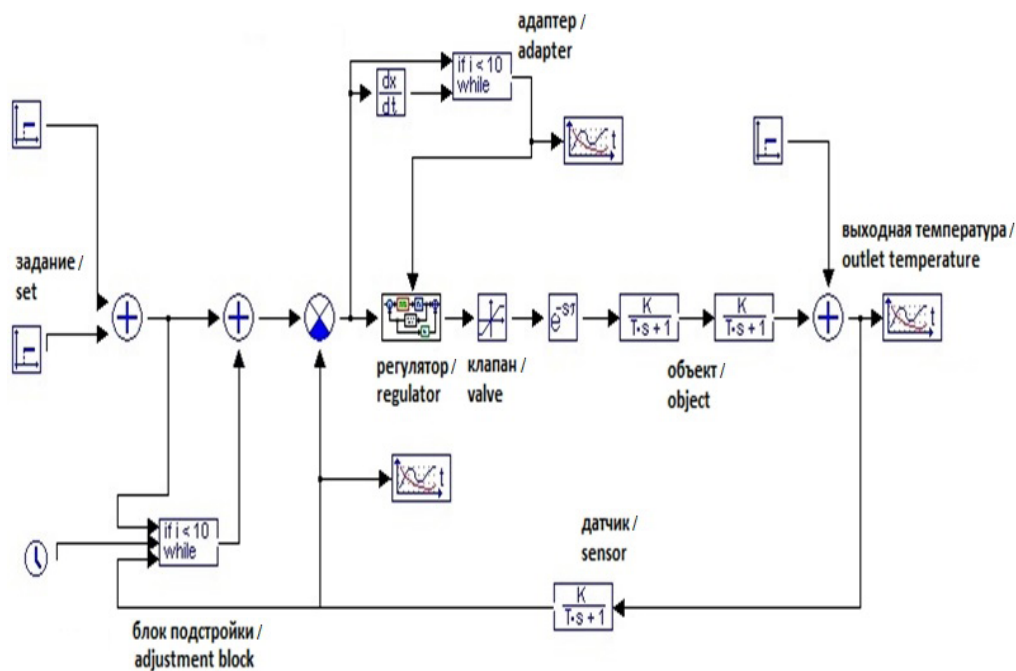
Оценка качества процесса регулирования заключается в проверке, укладывается ли амплитуда колебаний A_k в пределы допустимой амплитуды ε_k и какова величина статической ошибки регулирования $\Delta t^0 = t_z^0 - t_{ср}^0$. По полу-

ченной оценке производится коррекция коэффициентов регулятора K_n и K_o в сторону увеличения или уменьшения.

Одновременно вводится значение надбавки дополнительно к заданной температуре $t_y^0 = t_z^0 \pm \Delta t^0$, чтобы компенсировать статическую ошибку. Одновременно проверяются допустимые границы изменения коэффициентов. Ввиду большого значения транспортной задержки применение интегральной составляющей регулятора ограничено и здесь не используется.

Результаты исследования

Для проверки поведения реальной САУ со структурой, приведенной на рисунке 2, с адаптивным итерационным регулятором составлена ее модель в пакете моделирования MBTU (SimInTech)⁵ (рис. 4). На представленной



Р и с. 4. Модель адаптивной итерационной системы управления

Fig. 4. Model of adaptive iterative control system

⁵ Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» [Электронный ресурс] / О. С. Козлов [и др.]. URL: <http://model.exponenta.ru/mvtu/20050615.html> (дата обращения: 22.01.2019); Среда динамического моделирования технических систем SimInTech. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов [и др.]. М.: ДМК Пресс, 2017. 423 с. URL: <https://www.ozon.ru/context/detail/id/141205418/> (дата обращения: 22.01.2019).

модели блок адаптации БА производит поиск бесколебательной зоны управления в пределах допустимых изменений коэффициентов ПИД-регулятора.

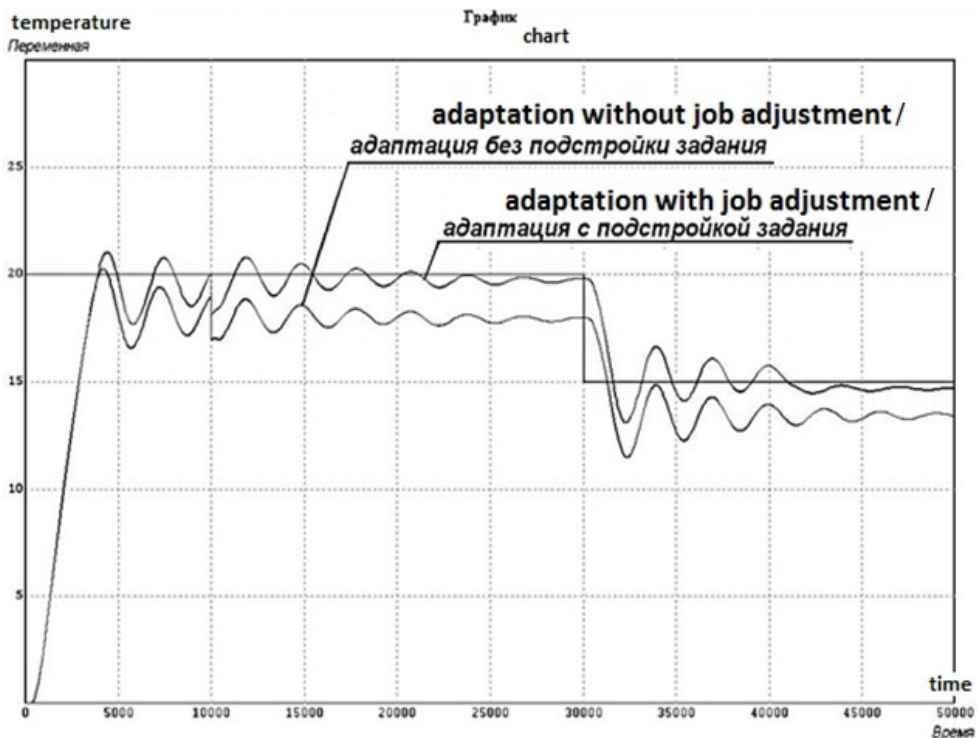
Параметры модели следующие: $t_3^0 = 20$ °С, ПИД-регулятор, регулирующий клапан, представленным в виде звена с насыщением $K_{кл} = 0,55$. Задержка, обусловленная транспортным запаздыванием теплоносителя, $\tau = 240$ с. Передаточная функция теплицы в канале управляющего воздействия представлена двумя апериодическими звеньями, первое из которых учитывает трубное отопление, а второе собственно теплицу по структуре рисунка 2. Коэффициент передачи теплицы, определенный по кривой выбега, $K_m = 0,39$, постоянная времени $T_o = 2400$ с. Коэффициент передачи цепи обратной связи $K_o = 1,0$, постоянная времени обратной связи $T_o = 9$ с.

Так как процесс вхождения в бесколебательную зону может сопровождаться снижением пропорционального коэффициента регулятора и увеличением статической ошибки, то вторая составляющая блока адаптации, в виде программного блока, производит оценку ошибки и подстройку задающего воздействия через добавку Δt^0 .

Результаты моделирования при температуре 20 °С и дальнейшем ее снижении до 15 °С представлены на рисунке 5, там же показано влияние возмущающего воздействия на 10000-ной секунде процесса.

Обсуждение и заключение

Из полученных результатов моделирования видно, что подстройка коэффициентов ПИД-регулятора приводит к снижению колебательности процесса до допустимых пределов при повышении статической ошибки. Применение



Р и с. 5. Результаты моделирования адаптивной итерационной системы управления
 F i g. 5. Results of modeling an adaptive iterative control system

блока подстройки задающего воздействия эту ошибку устраняет, заставляя систему работать на грани перехода в колебательный режим. Таким образом, применение предлагаемого алгоритма адаптации в системе управления с большими транспортными задержками позволит избежать явления колебательности процесса, снизит износ регулирующего оборудования и повысит качество управления.

Предлагаемый алгоритм адаптации, заключающийся в аддитивной подстройке коэффициентов ПИД-регулятора, удобно реализуемый в SCADA-системе, обеспечивает компенсацию неопределенности модели и возмущений, при этом достигается требуемая точность поддержания температуры

в теплице. Результаты исследования послужат материалом для разработки многоконтурной САУ микроклимата теплицы с исследованием влияния и компенсации параметрической и структурной неопределенности, инерционностей и нелинейностей реальных элементов. Выводы работы могут быть использованы во многих отраслях народного хозяйства для исследования общих и прикладных проблем цифрового адаптивного управления процессами⁶ с ПИД-регулированием координат [16], например, в системах управления интеллектуальными зданиями [17], в радиотехнике [18], в пищевой промышленности [19], в стройиндустрии [20], в производстве резинотехнических изделий [21] и т. д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Грудинин В. С.** Управление микроклиматом и средства фитомониторинга // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2007. № 10. С. 124–127. URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=96472 (дата обращения: 22.01.2019).
2. **Герасимов Д. Н., Лызлова М. В.** Адаптивное управление микроклиматом в теплицах // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2014. № 6. С. 124–135. URL: <https://clck.ru/HHiDu> (дата обращения: 22.01.2019).
3. **Токмаков Н. М., Грудинин В. С.** Математическая модель системы управления микроклиматом ангарных теплиц. Гавриш. 2008. № 3. С. 28–32. URL: <http://samodelkin.komi.ru/doc/6.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
4. **Von Zabeltitz C.** Greenhouse Structures // In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. Pp. 59–135. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5
5. **Jones P., Jones J. W., Hwang Y.** Simulation for Determining Greenhouse Temperature Set Points // *Transactions of the ASAE*. 1990. Vol. 33, no. 5. Pp. 1722–1728. URL: https://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as_sdt=0,5 (дата обращения: 22.01.2019).
6. **Van Straten G., Van Henten E. J.** Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives // *Dept. Agrotechnology and Food Science. Systems and Control*. 2010. Vol. 43, Issue 26. Pp. 18–33. URL: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/161860> (дата обращения: 22.01.2019).
7. **Zeng S., Xu H. H. L., Li G.** Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network // *Sensors*. 2012. Vol. 12. Pp. 5328–5348. DOI: <https://doi.org/10.3390/s120505328>
8. **Seginer I., Boulard T., Bailey B. J.** Neural Network Models of the Greenhouse Climate // *Agricultural Engineering Research*. 1994. Vol. 59. Pp. 203–216. URL: https://www.researchgate.net/profile/T_Boulard/publication/222347971_Neural_Network_Models_of_the_Greenhouse_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climat.pdf (дата обращения: 22.01.2019).

⁶ **Олссон Г., Пиани Д.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с. URL: http://industry.ucoz.ru/_fr/0/4405990.pdf (дата обращения: 22.01.2019).

9. **Kok R., Lacroix R., Clark G., Taillefer E.** Imitation of a Procedural Greenhouse Model with an Artificial Neural Network // Canadian Agricultural Engineering. 1994. Vol. 36, no. 2. Pp. 117–126. URL: https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as_sdt=0,5 (дата обращения: 22.01.2019).
10. **Грудинин В. С.** Адаптивная компьютерная система управления микроклиматом // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2007. № 9. С. 137–142. URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=92776 (дата обращения: 22.01.2019).
11. **Ferreira P. M., Ruano A. E.** Discrete Model Based Greenhouse Environmental Control Using the Branch & Bound Algorithm // The International Federation of Automatic Control. 2008. Pp. 2937–2943. URL: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/3461.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
12. Dynamic Modeling and Simulation of Greenhouse Environments under Several Scenarios: a Web-Based Application / Efrén Fitz-Rodríguez [et al.] // Computers and Electronics in Agriculture. 2010. Vol. 70. Pp. 105–116. URL: <http://irrecenvhort.ifas.ufl.edu/Teaching%20publications/Publications/COMPAG-2009-Greenhouse%20simulation.pdf> (дата обращения: 22.01.2019).
13. **Berenguel M., Yebra L. J., Rodriguez F.** Adaptive Control Strategies for Greenhouse Temperature Control // En viado a ECC. 2003. DOI: <https://doi.org/10.23919/ECC.2003.7086457>
14. **Мееров М. В.** Адаптивные компенсирующие регуляторы с предиктором Смита // Автоматика и телемеханика. 2000. № 10. С. 125–135. URL: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshw=paper&jrnid=at&paperid=15286&option_lang=rus (дата обращения: 22.01.2019).
15. **Денисенко В. В.** ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. № 1. С. 78–88. URL: http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principyu-postroeniya-i-modifikacii_dc7431cf063.html (дата обращения: 22.01.2019).
16. **Åström K. J., Hägglund T.** Advanced PID control. Durham: ISA, 2006. 460 p. URL: http://intranet.ceautomatca.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl_KJA.pdf (дата обращения: 22.01.2019).
17. **Карпенко А. В., Петрова И. Ю.** Модели управления микроклиматом в помещении // Фундаментальные исследования. 2016. № 7 (2). С. 224–229. URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (дата обращения: 22.01.2019).
18. **Гудкова Н. В.** Приложение принципов адаптивного моделирования к задачам управления динамическими объектами типа «черный ящик» // Современная электроника. 2012. № 8. С. 68–70. URL: http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja_ehlektronika_8_2012/2012-10-09-2397 (дата обращения: 22.01.2019).
19. Анализ управляемости и устойчивости приближенной модели теплопереноса в автоклаве / С. А. Мокрушин [и др.] // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 416–428. DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>
20. **Alonso A. A., Banga J. R., Perez-Martin R.** Modeling and Adaptive Control for Batch Sterilization // Computers & Chemical Engineering. 1998. Vol. 22, Issue 3. С. 445–458. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135497002500> (дата обращения: 22.01.2019).
21. **Киргин Д. С.** Алгоритмы управления технологическим процессом вулканизации установки автоклав // Вестник ИрГТУ. 2011. Т. 55, № 8. С. 195–199. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algorithmu-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav> (дата обращения: 22.01.2019).

Поступила 17.12.2018; принята к публикации 18.02.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

Грудинин Виктор Степанович, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, ResearcherID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, grudinin@vyatsu.ru

Хорошавин Валерий Степанович, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, khoroshavin@vyatsu.ru

Зотов Александр Викторович, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), кандидат технических наук, ResearcherID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, zotov@vyatsu.ru

Грудинин Сергей Викторович, аспирант кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Политехнический институт, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36), ResearcherID: V-9221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-6808>, sergeycith@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. С. Грудинин – постановка задачи и выбор методов решения; В. С. Хорошавин – анализ материалов по теме исследования; А. В. Зотов – моделирование системы; С. В. Грудинин – программирование и компьютерные работы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Grudin V.S. Climate Control and Phytomonitoring Tools. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2007; (10):124-127. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=96472 (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
2. Gerasimov D.N., Lyzlova M.V. Adaptive Climate Control in Greenhouses. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya* = News of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems. 2014; (6):124-135. Available at: <https://clck.ru/HHiDy> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
3. Tokmakov N.M., Grudin V.S. Mathematical Model for Microclimate's Control in Shed Greenhouses. *Gavrish*. 2008; 3:28-32. Available at: <http://samodelkin.komi.ru/doc/6.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
4. Von Zabeltitz C. Greenhouse Structures. In: *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2011. Pp. 59–135. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7_5
5. Jones P., Jones J.W., Hwang Y. Simulation for Determining Greenhouse Temperature Set Points. *Transactions of the ASAE*. 1990; 33(5):1722-1728. Available at: http://scholar.google.ru/scholar?cluster=7823325459120957027&hl=ru&as_sdt=0,5 (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
6. Van Straten G., Van Henten E.J. Optimal Greenhouse Cultivation Control: Survey and Perspectives. *IFAC Proceedings Volumes*. 2010; 43(26):18-33. Available at: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/161860> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
7. Zeng S., Xu H.H.L., Li G. Nonlinear Adaptive PID Control for Greenhouse Environment Based on RBF Network. *Sensors*. 2012; (12):5328-5348. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s120505328>
8. Seginer I., Boulard T., Bailey B.J. Neural Network Models of the Greenhouse Climate. *Agricultural Engineering Research*. 1994; 59:203-216. Available at: https://www.researchgate.net/profile/T_Boulard/publication/222347971_Neural_Network_Models_of_the_Greenhouse_Climate/links/5a0802894585157013a5e0ea/Neural-Network-Models-of-the-Greenhouse-Climate.pdf (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
9. Kok R., Lacroix R., Clark G., Taillefer E. Imitation of a Procedural Greenhouse Model with an Artificial Neural Network. *Canadian Agricultural Engineering*. 1994; 36(2):117-126. Available at: https://scholar.google.ru/scholar?cluster=2098238280172549431&hl=ru&as_sdt=0,5 (accessed 22.01.2019). (In Eng.)

10. Grudin V.S. Adaptive Computer Climate Control System. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2007; (9):137-142. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=92776 (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
11. Ferreira P.M., Ruano A.E. Discrete Model Based Greenhouse Environmental Control Using the Branch & Bound Algorithm. *The International Federation of Automatic Control*. 2008. p. 2937-2943. Available at: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/ifac2008/data/papers/3461.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
12. Fitz-Rodriguez E., Kubota C., Giacomelli G.A., et al. Dynamic Modeling and Simulation of Greenhouse Environments under Several Scenarios: a Web-Based Application. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2010; (70):105-116. Available at: <http://irrecenvhort.ifas.ufl.edu/Teaching%20publications/Publications/COMPAG-2009-Greenhouse%20simulation.pdf> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
13. Berenguel M., Yebra L.J., Rodriguez F. Adaptive Control Strategies for Greenhouse Temperature Control. *En viado a ECC*. 2003. p. 2747-2752. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23919/ECC.2003.7086457>
14. Meerov M.V. Adaptive Compensating Controllers with Smiths Predictor. *Avtomatika i telemekhanika* = Automation and Remote Control. 2000; (10):125-135. Available at: http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=15286&option_lang=rus (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
15. Denisenko V.V. PID Regulators: Principles of Construction and Modification. *Sovremennyye tekhnologii avtomatizatsii* = Modern Automation Technology. 2007; (1):78-88. Available at: http://www.studmed.ru/denisenko-vv-pid-regulyatory-principy-postroeniya-i-modifikacii_dc7431cf063.html (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
16. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. *ISA Publication*. 2006. Available at: http://intranet.ceautomatica.es/sites/default/files/upload/13/files/AdvancesInPIDControl_KJA.pdf (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
17. Karpenko A.V., Petrova I.Yu. Indoor Climate Control Models. *Fundamental Research*. 2016; (7):224-229. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=40488> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
18. Gudkova N.V. Application of the Principles of Adaptive Modeling to Control Problems of Dynamic Objects of the “Black Box” Type. *Sovremennaya elektronika* = Modern Electronics. 2012; (8):68-70. Available at: http://www.radiofiles.ru/news/sovremennaja_ehlektronika_8_2012/2012-10-09-2397 (accessed 22.01.2019). (In Russ.)
19. Mokrushin S.A., Khoroshavin V.S., Ohapkin S.I., et al. The Analysis of Controllability and Stability of an Approximate Model of Heat Transfer in an Autoclave. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):416-428. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.416-428>
20. Alonso A.A., Banga J.R., Perez-Martin R. Modeling and Adaptive Control for Batch Sterilization. *Computers & Chemical Engineering*. 1998; 22(3):445-458. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135497002500> (accessed 22.01.2019). (In Eng.)
21. Kirgin D.S. Algorithms for the Control of the Technological Process of Vulcanization of an Autoclave Installation. *Vestnik IrGTU* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2011; 55(8):195-199. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-vulkanizatsii-ustanovki-avtoklav> (accessed 22.01.2019). (In Russ.)

Received 17.12.2018; revised 18.02.2019; published online 30.09.2019

About authors:

Viktor S. Grudin, Associate Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia) Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-5550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1615-6195>, grudin@vyatsu.ru

Valeriy S. Khoroshavin, Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: G-5298-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4355-3866>, khoroshavin@vyatsu.ru

Alexander V. Zotov, Associate Professor of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-4912-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9007-9861>, zotov@vyatsu.ru

Sergey V. Grudinin, Postgraduate Student of Chair of Electric Drive and Industrial Equipment Automation, Polytechnic Institute, Vyatka State University (36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia), ResearcherID: V-9221-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1569-6808>, sergeycith@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. S. Grudinin – formulation of the problem and choice of methods; V. S. Khoroshavin – analysis of materials on the topic of the study; A. V. Zotov – modeling the system; S. V. Grudinin – programming and computer work.

All authors have read and approved the final manuscript.