

ВСТРОЕННАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В «УМНОМ ДОМЕ»

ФИЛИППЕНКО И.В., КОНДРЮКОВ С.Э.,
КУЛАК Г.К.

Предлагается метод автоматического регулирования микроклимата и снижения энергопотребления в системах «Умный дом», а также метод регулирования температуры воздуха в доме на основе ПИД регулятора. Выполняется программно-аппаратная реализация системы ПИД регулирования и расчетно-экспериментальный подбор коэффициентов для ПИД регулятора.

1. Введение

Актуальность. Исследования, представленные в этой работе, являются частью проекта студенческой исследовательской группы кафедры АПВТ ХНУРЭ. Проект предусматривает разработку автоматической системы регулирования микроклимата в помещении на основе ПИД регулятора.

Цель – разработать часть системы управления «Умный дом», связанную с регулировкой температуры воздуха. Методы исследования: анализ, синтез, измерение, эксперимент.

Задачи: исследование и обоснование выбора методов регулирования температуры и средств реализации системы регулирования; формулировка общей концепции системы «Умный дом»; разработка регулятора температуры воздуха; программно-аппаратная реализация системы регулирования;

В последние годы вопрос энергосбережения является одним из первоочередных. Это проявляется в использовании энергосберегающих технологий и приспособлений.

Под термином «Умный дом» часто подразумевают современные здания (офисы, дома, квартиры), в которые внедрены различные системы автоматизации, такие как освещение, микроклимат, коммуникационные системы, безопасность. Одной из основных задач данной системы является повышение комфорта жильцов, их безопасность, а также экономия ресурсов.

Система управления «Умным домом» состоит из облачного сервера, устройств управления (мобильных или стационарных), домашнего сервера, контроллера, а также конечных устройств (датчики, управляемые устройства) [1]. Облачный сервер предназначен для хранения данных от

различных устройств системы в базе данных. Также он выступает в качестве посредника между мобильными устройствами управления и домашним сервером. Вначале запросы/данные передаются на облачный сервер, а после – на домашний. Это позволяет мониторить состояние дома в текущий момент времени с помощью мобильных устройств из любой точки мира, при наличии подключения к интернету. Под устройствами управления подразумеваются мобильные и стационарные устройства, с помощью которых пользователь может получить доступ к текущему состоянию всей системы или передать ей определенную команду для выполнения необходимого действия. Домашний сервер - это сервер, отвечающий за мониторинг и работу всех устройств в доме. Он связан с контроллером, облачным сервером, а также с устройствами управления. Контроллер отвечает за управление устройствами и датчиками системы. Он считывает значения с датчиков, передает их данные на обработку серверу, также передает необходимые команды, полученные от сервера. Общий вид описанной выше структуры представлен на рис. 1.

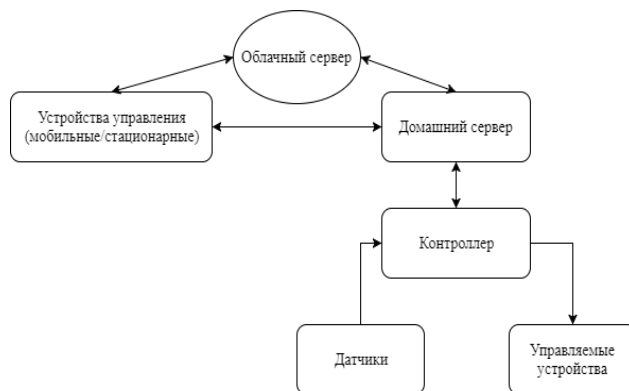


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов системы «Умный дом»

2. Методы регулирования температуры

Существует большое количество методов автоматического регулирования: размещение полюсов [2], методы, основанные на использовании логарифмических частотных характеристик [2], на базе фильтра Калмана [3] и многие другие. Все они классифицируются [4, 5] по назначению, принципу действия, конструктивным особенностям, виду используемой энергии, характеру изменения регулирующего воздействия.

По принципу действия они подразделяются на регуляторы прямого и непрямого действия. Регуляторы прямого действия не используют внешнюю энергию для процессов управления, а используют энергию самого объекта управления

(регулируемой среды). Примером таких регуляторов являются регуляторы давления. Для работы автоматических регуляторов непрямого действия требуется внешний источник энергии.

По роду действия регуляторы делятся на непрерывные и дискретные. Дискретные регуляторы, в свою очередь, подразделяются на релейные, цифровые и импульсные.

По виду используемой энергии они подразделяются на электрические (электронные), пневматические, гидравлические, механические и комбинированные. Выбор регулятора по виду используемой энергии определяется характером объекта регулирования и особенностями автоматической системы. В современных системах управления используются цифровые программные регуляторы.

По закону регулирования они делятся на однопозиционные, двухпозиционные и трехпозиционные. Типовые регуляторы: интегральные – сокращенно И, пропорциональные – сокращенно П, пропорционально-интегральные – ПИ, пропорционально-дифференциальные – ПД и пропорционально-интегрально-дифференциальные – ПИД. Двухпозиционные регуляторы широко распространены благодаря своей простоте и малой стоимости.

По назначению регуляторы подразделяются на специализированные (например: регуляторы уровня, давления, температуры) и универсальные с нормированными входными и выходными сигналами, пригодные для управления различными параметрами.

По виду выполняемых функций они подразделяются на регуляторы автоматической стабилизации, программные, корректирующие, регуляторы соотношения параметров и другие.

Несмотря на развитые современные методы проектирования сложных регуляторов, подавляющее большинство промышленных систем управления основаны на П, ПД, ПИ и ПИД регуляторах (порядка 90 – 95 %) [6]. Регуляторы этого типа очень хорошо зарекомендовали себя в практических задачах. ПИД регулятор применяется в инерционных системах с относительно малым уровнем помех измерительного канала. Достоинством ПИД регулятора является быстрый выход на режим, точное удержание заданного параметра (например, температуры) и быстрая реакция на возмущающие воздействия. ПИД регулятор

может экономить до 35% мощности исполнительного механизма.

Существуют разнообразные способы реализации ПИД регулятора на базе различных микроконтроллеров с использованием разных языков программирования. В нашем случае Arduino дает возможность сделать это проще и дешевле – используя библиотеку PID со встроенной функцией PID (), реализующей ПИД регулятор.

Одним из способов выбора коэффициентов для ПИД регулятора является эксперимент с реальным объектом. Процесс настройки ПИД регулятора по экспериментальным правилам интуитивен и попытки настроить регулятор без начального приближенного расчета коэффициентов могут оказаться безуспешными. Основываясь на обзоре существующих методик настройки [7 –9], можно заключить, что методы Циглера-Никольса и Чина, Хронса, Ресвика наиболее оправданы для эксплуатации в промышленных условиях.

После расчета коэффициентов регулятора желательно сделать его подстройку. Подстройку можно выполнить на основе правил, которые используются для ручной настройки. Эти правила получены из опыта, теоретического анализа и численных экспериментов. Они сводятся к следующему: увеличение пропорционального коэффициента повышает быстродействие и снижает запас устойчивости; с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее; уменьшение постоянной интегрирования снижает запас устойчивости; увеличение дифференциальной составляющей повышает запас устойчивости и быстродействие.

Сформулированные выше правила справедливы только в окрестности оптимальной настройки регулятора. Вдали от нее эффекты могут быть иными. При регулировке тепловых процессов настройка только по правилам может занять недопустимо много времени.

3. Регулирование температуры воздуха в помещении

Рассмотрим управление температурой воздуха в комнате. Выделяются три диапазона температур: ниже 20°C – воздух подогревается; от 20 до 24°C – действий никаких не нужно, это зона комфорта; выше 24°C – воздух охлаждается (подается сигнал на охлаждение). Например, необходимо поддерживать температуру на уровне 22°C. В данной работе рассматривается только регулирование

температуры при нагреве (рис. 2). Имеются объект регулирования (температура воздуха), цифровой датчик, измеряющий эту температуру. Датчик сообщает значение температуры микроконтроллеру, который [10] вычисляет необходимость регулирования температуры при помощи нагревания или охлаждения.



Рис. 2. Структурная схема для регуляции температуры

Таким образом, есть входные данные – текущая температура и температура, до которой необходимо нагреть объект. На выходе нужно получить значение мощности $u(t)$, которое следует передать на нагревающее устройство. Для реализации функции регулирования необходимо использовать ПИД-регулятор, закон которого представлен формулой

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (1)$$

где $u(t)$ – искомое выходное воздействие

$$P = K_p e(t). \quad (2)$$

– пропорциональная составляющая;

$$I = K_i \int_0^t e(t) dt. \quad (3)$$

– интегральная составляющая;

$$D = K_d \frac{de}{dt}. \quad (4)$$

– дифференциальная составляющая; $e(t)$ – текущая ошибка (отклонение температуры от заданного значения); K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный, дифференциальный коэффициенты соответственно.

Для дискретной реализации ПИД функции используются следующие выражения:

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t), \quad (5)$$

$$P(t) = K_p \cdot e(t), \quad (6)$$

$$I(t) = (t - 1) + K_i \cdot e(t), \quad (7)$$

$$D(t) = K_d \cdot (e(t) - (e(t - 1))). \quad (8)$$

Разница между текущей и заданной температурой $e(t)$ умножается на настраиваемый коэффициент K_p . Получается мощность, которую надо выдать в данный момент времени. Это пропор-

циональная составляющая. Она работает в момент появления рассогласования – т.е. моментально откликается на поведение объекта. Если объект начал нагреваться, мощность начинает снижаться. Если температура превышает заданный порог, нагреватель отключается. В реальных условиях эффект от воздействия проявляется с запаздыванием, так как на объект воздействует не только нагреватель, но и окружающая среда: разогретый нагреватель остывает, отдавая тепло комнате, поэтому, как только выключается мощность, он сразу начинает остывать. Использование только пропорциональной составляющей регулятора приводит к колебаниям температуры около заданного значения, и чем выше воздействие окружающей среды, тем сильнее эти колебания.

Чтобы компенсировать внешние воздействия на нагреватель, добавляют интегральную составляющую. Всё рассогласование, которое было в системе, накапливается в интеграторе (воздух перегревается – сумма уменьшается, воздух недостаточно нагрет – сумма увеличивается). И накопленный интеграл, со своим коэффициентом, даёт свою «прибавку-убавку» к мощности. В результате такого подхода, при стационарном процессе, через некоторое время интеграл подбирает такой вклад в сумму с мощностью, который компенсирует потери окружающей среды, и колебания исчезают – интеграл становится стабильным, поэтому величина выдаваемой мощности становится постоянной. Так как при этом держится нужная температура, рассогласование отсутствует, пропорциональная составляющая не работает вообще.

Для компенсации влияния задержек между воздействием и реакцией системы в систему добавляется дифференциальная составляющая. Просто пропорциональный регулятор даёт мощность всё время, пока температура не достигнет нужной точки. Пропорционально-дифференциальный регулятор начинает снижать подаваемую мощность раньше, чем температура достигла нужной точки (так как рассогласование уменьшается, имеется наличие отрицательной производной, уменьшающей воздействие). Это позволяет минимизировать перегрев при больших переходах.

Эксперимент проводился следующим образом. Для макета была сделана комната – фанерный короб. Нагревался воздух в этом коробе. Использовался нагреватель с регулируемой мощностью.

Для реализации ПИД регулятора в Arduino использовалась функция PID() из библиотеки PID. Заданное (желаемое) значение температуры $T_{\text{зад}}=22^{\circ}\text{C}$. Значение регулируемой температуры отображалось на компьютере для сохранения и дальнейшего построения графиков.

Далее был выполнен предварительный расчет коэффициентов регулятора по методу Циглера-Никольса. Для этого, вначале, коэффициентам K_i и K_d были назначены нулевые значения. Затем постепенно увеличивался K_p до критического значения $K_c = 12$, при котором возникают автоколебания. На рис. 3 графику 1 соответствует $K_p=1$, графику 2 – $K_p = 4$, графику 3 – $K_p = K_c = 12$. Далее был измерен период автоколебаний $\tau=102$ с, а после рассчитаны значения коэффициентов K_p , K_i и K_d : $K_p = 0,60 * K_c = 7,2$, $K_i = 2,0 * K_p / \tau = 0,14$, $K_d = K_p * \tau / 8 = 91,8$, которым соответствует график 2 на рис. 4.

Затем экспериментально в районе вычисляемых значений были подобраны коэффициенты, чтобы обеспечить необходимый переходной процесс. С фиксированными значениями K_p был выбран коэффициент K_i , потом с подобранными фиксированными значениями K_i и K_p подбирался K_d . В результате был получен набор коэффициентов, который обеспечивал переходной процесс, представленный графиком изменения температуры под номером 3 (см. рис. 4). Этому графику соответствуют коэффициенты $K_p = 7,2$, $K_i = 0,06$, $K_d=108$. На рис. 4 графику 1 соответствуют коэффициенты $K_p = 12$, $K_i = 0$, $K_d = 0$.

Качество регулирования оценивалось по характеристикам переходного процесса: перерегулирование, время нарастания, время переходного процесса, степень затухания (см. рис. 4): t_n – время нарастания; t_p – время переходного процесса; A_1 – первое перерегулирование; A_2 – второе перерегулирование; $d = A_1 / A_2$ – степень (декремент) затухания переходного процесса (отношение первого перерегулирования ко второму). График 3 (см. рис. 4) соответствует лучшим показателям качества регулирования: $t_n = 200$ с, $t_p = 540$ с, $A_1 = 1,3^{\circ}\text{C}$, $A_2 = 0,55^{\circ}\text{C}$, $d = A_1 / A_2 = 1,3 / 0,55 = 2,36$.

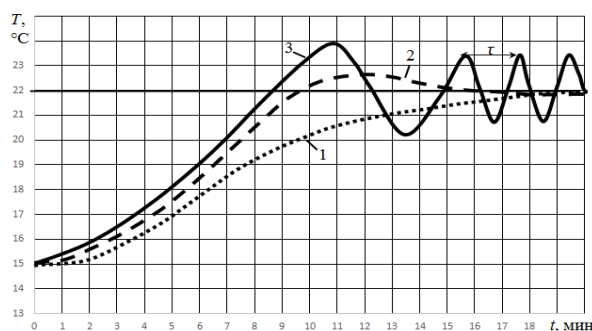


Рис. 3. Подбор коэффициента K_p

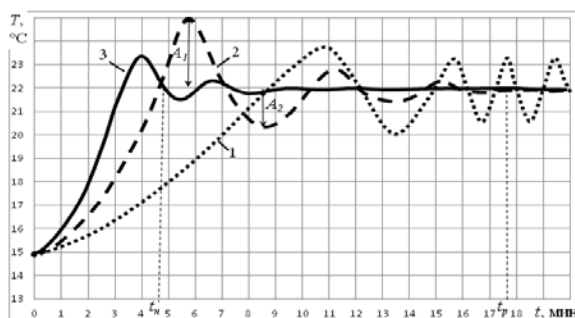


Рис. 4. Подбор коэффициентов K_p , K_i и K_d

4. Программно-аппаратная реализация эксперимента

Эксперимент был реализован с помощью устройства ArduinoUno на базе микроконтроллера ATmega328. Arduino - это открытая программируемая аппаратная платформа для работы с разными физическими объектами. Она включает в себя все необходимое для комфортной работы с микроконтроллером.

Для реализации необходимого модуля ПИД регулирования были использованы следующие модули: датчик температуры, нагревательный элемент, а также ArduinoUno.

Датчик температуры [11, 12] передавал данные непосредственно на ArduinoUno, а он в свою очередь обрабатывал их и выдавал необходимое значение на нагревательный элемент. Нагревательный элемент в зависимости от посылаемого на него значения меняет мощность нагревания от 0 до 100 процентов. После этого цикл повторяется заново.

Научная новизна: представлен расчетно-экспериментальный подбор коэффициентов для ПИД регулятора.

Практическая значимость: результаты исследования могут использоваться в системе «Умный дом», концепция которой построена на энергосбережении. Собственная разработка в части управления, а также собственная сборка и отладка системы позволят сделать ее дешевле и до-

ступнее в сравнении с готовыми системами «Умный дом», которые предлагаются рынком.

Литература: 1. Николаев П.Л. Архитектура интегрированной в облачную среду системы управления умным домом / П.Л. Николаев // Программные продукты и системы. Международный научно-технический журнал. 2015. №2(110). С.65-69. 2. Поляков К. Ю. Теория автоматического управления для чайников (часть 1) / К. Ю. Поляков: Санкт-Петербург, 2008. 80 с. 3. Шилов К.Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа / К. Е. Шилов // Математика, информатика, управление. Труды МФТИ. Том 6, № 4. 2014. С. 22-29. 4. Борисевич А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB / А. В. Борисевич. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 200 с. 5. Dorf R. Современные системы управления / Р. Dorf, Р. Бишоп. М.: Бином, Лаборатория базовых знаний, 2004. 832 с. 6. Денисенко В.Д. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2006. №4. С. 66-74. 7. Писарев, А. В. Сравнительные исследования расчетных методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов / А.В. Писарев, С.И. Новиков // Энергетика и теплотехника. Сборник научных трудов. Вып. 11. НГТУ, 2007. С. 191-200. 8. Wen Tan. Comparison of some well-known PID tuning formulas / Wen. Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio. J. Marquez // Computers and Chemical Engineering. 2006. № 30. P. 1416-1423. 9. Astrom K. J. Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund – ISA (The instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. 460 p. 10. Белов А. В. Конструирование устройств на микроконтроллерах. / А. В. Белов. СПб.: Наука и техника, 2005. 256 с. 11. Гордон М. К. Радиоэлектроника для «чайников» / М. К. Гордон, Б. Эрл: Пер. с англ. М., 2007. 400 с. 12. Иго Т. Arduino, датчики и сети для связи устройств / Т. Иго: Пер. с англ. СПб.: БХВ-Петербург, 2015. 544с.

Transliterated bibliography:

1. Nikolaev P.L. Arhitektura integrirovannoy v oblachnyuyu sredyu sistemy I upravleniya umnyim domom / P.L. Nikolaev // Programmnyye produkty I isistemyi. Mezhdunarodnyi ynauchno-tehnicheskij zhurnal #2(110). 2015. S. 65-69.
2. Polyakov K. Yu. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya dlya chaynikov (chast 1) / K. Yu. Polyakov: Sankt-Peterburg, 2008. 80 s.
3. Shilov K.E. Razrabotka sistemyi avtomaticheskogo upravleniya bespilotnyim letatelnyim apparatom multiro-tornogotipa / K. E. Shilov // Matematika, informatika, upravlenie. Trudy MFTI. Tom 6, # 4. 2014. S. 22-29.

4. Borisevich A. V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: elementarnoe vvedenie s primeneniem MATLAB / A. V. Borisevich. SPb.:Izd-vo Politehn. un-ta, 2011. 200 s.
5. Dorf R. Sovremennyye sistemyi upravleniya / R. Dorf, R. Bishop. M.: Binom, Laboratoriya bazovyih znaniy, 2004. 832 s.
6. Denisenko V.D. PID-regulyatoryi: printsipyi postroeniya I modifikatsii. Ch. 1 // Sovremennyye tehnologii avtomatizatsii. 2006. #4. S. 66-74.
7. Pisarev, A. V. Sravnitelnyie issledovaniya raschetnyih metodov opredeleniya parametrov nastroek promyshlennyih PID-regulyatorov / A.V. Pisarev, S.I. Novikov // Energetika I teplo-tehnika. Sbornik nauchnyih trudov. Vyip. 11. NGTU, 2007. S. 191-200.
8. Wen Tan. Comparison of some well-known PID tuning formulas / Wen. Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio. J. Marquez // Computers and Chemical Engineering. 2006. # 30. P. 1416-1423.
9. Astrom K. J. Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund – ISA (The instrumentation, Systems and Automation Society), 2006. 460 p.
10. Belov A. V. Konstruirovaniye ustroystv namikrokontrollerah / A. V. Belov. Spb.: Nauka i tehnika, 2005. 256 s.
11. Gordon M. K. Radio-elektronikadlya «chaynikov» / M. K. Gordon, B. Erl: Per. s angl. M., 2007. 400 s.
12. Igo T. Arduino, datchiki I seti dlya svyazi ustroystv / T. Igo: Per. s angl. SPb.: BHV-Peterburg, 2015. 544 s.:

Поступила в редколлегия 19.05.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Кривуля Г.Ф.

Филиппенко Инна Викторовна, канд. техн. наук, доцент кафедры АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование микроконтроллерных систем, сенсорных беспроводных систем. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.

Кондюков Станислав Эдуардович, студент, кафедра АПВТ ХНУРЭ. Научные интересы: проектирование микроконтроллерных систем управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.

Кулак Георгий Константинович, ученик средней школы, кандидат в члены Малой академии наук Украины. Научные интересы: проектирование микроконтроллерных систем управления. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14.

Filippenko Inna Victorovna, PhD, Associate Professor, Design Automation Department, Kharkov National University of Radioelectronics. Scientific interests: microcontroller systems design, sensor wireless systems. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave, 14.

Kondriukov Stanislav Eduardovich, student, Design Automation Department, Kharkov National University of Radioelectronics. Scientific interests: microcontroller control systems design. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Nauki Ave, 14.

Kulak Georgiy Konstantinovich, schoolboy, candidate member of the Small Academy of Sciences of Ukraine. Scientific interests: designing of microcontroller control systems. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, science, 14.