

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.536.5 : 543.544

Н. О. Вздудева, аспирант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ТЕРМОСТАТОВ ХРОМАТОГРАФА ПУТЕМ ПОДСТРОЙКИ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СКВАЖНОСТЬЮ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Предложен алгоритм, позволяющий снизить величину отклонения температуры нагрева термостатов относительно температуры уставки путем учета скорости изменения температуры в зоне нагрева. Найдено значение ширины окна скользящего среднего, используемого для оценки скорости изменения температуры. Показано, что учет скорости изменения температуры позволяет уменьшить величину отклонения температуры термостата относительно температуры уставки более чем в два раза.

Ключевые слова: хроматограф, регулировка температуры, скважность, ПИД-регулирование.

Значение рабочей температуры газового хроматографа зависит от вида хроматографического эксперимента и может находиться в диапазоне от комнатной температуры до 400 °С [1, 2]. Наиболее жесткие требования к стабильности поддержания температуры в газовых хроматографах предъявляются к термостатам колонок. Она должна быть не хуже $\pm 0,1$ °С во всем рабочем диапазоне температур [3, 4]. Для удовлетворения таких жестких требований целесообразно использовать ПИД-регулирование [5–7].

Существенной особенностью систем стабилизации температуры, применяемых в термостатах газового хроматографа, является их нелинейность. Нелинейность связана с нелинейной зависимостью параметров системы от температуры уставки. В существующей модели хроматографа ЛГХ-3000 [8, 9] проблема нелинейности решена путем установки микропроцессора в блок анализа в цепи обратной связи ПИД-регулятора (рис. 1). В модели хроматографа ЛГХ-3000 используется релейный тип управления нагревателем путем периодического включения и выключения нагревателя [10, 11].

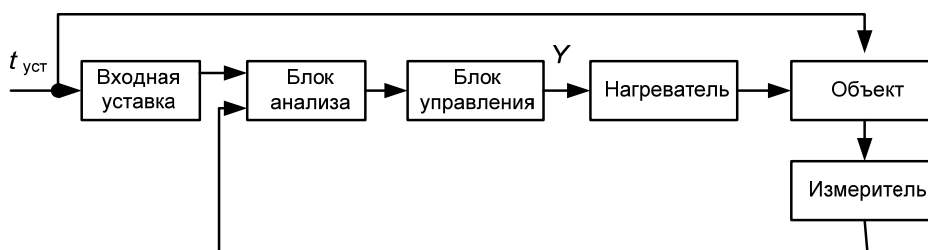


Рис. 1. Структурная схема управления термостатами хроматографа

В работе [12] предложен алгоритм управления нагревателем хроматографа, выполненного по схеме рис. 1, позволивший повысить точность поддержания температуры термостатов хроматографа. В предложенном алгоритме в качестве управляемого параметра выбрана скважность γ , под которой понимается отношение суммарной длительности времени нагрева и времени охлаждения нагревателя к длительности времени нагрева:

$$\gamma = \frac{\Delta\tau_{\text{нагр}} + \Delta\tau_{\text{охл}}}{\Delta\tau_{\text{нагр}}} = \frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau_{\text{нагр}}}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_0 = \Delta\tau_{\text{нагр}} + \Delta\tau_{\text{охл}}$ – длительность цикла нагрев-охлаждение; $\Delta\tau_{\text{нагр}}$ – длительность нагревания; $\Delta\tau_{\text{охл}}$ – длительность охлаждения.

Скважность γ определяет соотношение между количеством поступившего в термостат тепла на этапе нагрева и количеством тепла, потерянного при охлаждении, количество поступившего и количество потерянного тепла связаны интегральным соотношением с температурой уставки. Применение скважности в качестве управляемого параметра позволило реализовать принцип интегрального управления и тем самым снизить статическую погрешность поддержания заданной температуры уставки [13].

Эксперименты с системой регулирования, когда в качестве управляемого параметра использована скважность, показали, что с ростом температуры уставки $t_{\text{уст}}$, в частности, при $t_{\text{уст}} > 200$ °С амплитуда отклонений текущей температуры термостата $t_{\text{тек}}$ от $t_{\text{уст}}$ начинает резко увеличиваться. В связи с этим

возникла задача исследования возможных причин роста отклонений $t_{\text{тек}}$ от $t_{\text{уст}}$ с ростом $t_{\text{уст}}$ и разработка методов коррекции алгоритма управления скважностью с целью снижения отклонения $t_{\text{тек}}$ от $t_{\text{уст}}$ для повышенных значений $t_{\text{тек}}$.

Рост амплитуды пульсаций $t_{\text{тек}}$ говорит о снижении запаса устойчивости системы [14]. Снижение запаса устойчивости системы может быть связано с ростом скорости нагрева термостата при повышенных значениях $t_{\text{уст}}$.

Подобное поведение температурных процессов термостата можно объяснить следующим образом [15, 16]. При низких температурах установки отдельные конструкции термостата прогреты до сравнительно низких температур. При включении нагревателя возникает большой градиент температур по отношению к внешней среде и, соответственно, высокая скорость отбора тепла от нагревателя в этом направлении. Скорость повышения температуры в зоне термостатирования снижается. При высоких температурах установки окружающие термостат конструкции также прогреты до высоких значений температур. Когда термостат переходит в режим нагрева, градиенты температур по направлениям к внешним конструкциям оказываются ниже градиента при низких температурах. Соответственно, возрастает скорость повышения температуры в зоне термостатирования, что приводит к перерегулированию системы и к повышению разброса температур в зоне термостатирования.

С целью проверки данного предположения было решено ввести в систему управления скважностью составляющую, зависящую от скорости изменения усредненной по нескольким отсчетам температуры термостата. Выбор среднего значения температуры, по которому принимается решение о корректировке скважности, объясняется следующими причинами.

Необходимость корректировки скважности зависит от общего температурного состояния зоны нагрева термостата. Принятие решения о корректировке скважности по отдельным отсчетам температуры имеет случайный характер и внесет существенную стохастичность в закон изменения скважности. Чрезмерное увеличение интервала усреднения при-

водит к существенной задержке принятия решения о необходимости корректировки скважности, что также снижает запаса устойчивости системы регулирования. Предварительные эксперименты показали, что могут быть получены удовлетворительные результаты, когда использовано скользящее среднее, имеющее пять точек измерений температуры до и после момента коррекции скважности (рис. 2).

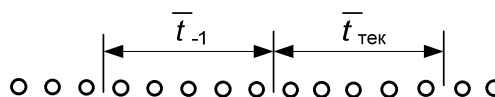


Рис. 2. Расчет скользящего среднего: $\bar{t}_{\text{тек}}$ – скользящее среднее по пяти точкам, по которым принимают решение о корректировке скважности; \bar{t}_{-1} – скользящее среднее по предшествующим пяти точкам

С целью снижения указанной зависимости в системе управления термостатом введена составляющая управления скважностью γ , зависящая от скорости изменения усредненной температуры колонок $\Delta \bar{t} = \bar{t}_{\text{тек}} - \bar{t}_{-1}$.

Экспериментально был подобран следующий алгоритм управления скважностью в зависимости от скорости изменения температуры в зоне термостатирования. Скважность увеличивается при:

$$\begin{cases} \Delta \bar{t} > k_1, \\ -2k < \Delta t < k, \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta \bar{t} = \bar{t}_{\text{тек}} - \bar{t}_{-1}$ – усредненное изменение температуры термостата, $k = 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$, $k_1 = 0,09 \text{ } ^\circ\text{C}$ – константы, подобранные экспериментально (рис. 3). Такой алгоритм управления позволил не только достаточно быстро выходить на заданный уровень температуры, но и позволил сохранять системе устойчивость по мере прогрева всех конструкций термостата.

На рис. 4 представлен пример работы системы стабилизации температуры с учетом и без учета скорости нарастания температуры. Как следует из графика, учет влияния скорости нагрева позволил снизить амплитуду колебаний температуры термостата более чем в два раза.

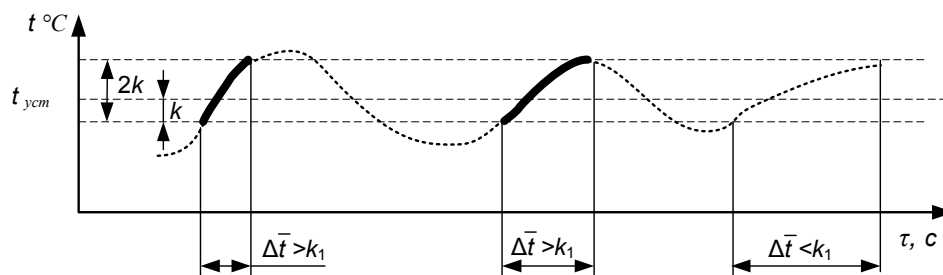


Рис. 3. Зона корректировки скважности по скорости изменения температуры (толстая линия)

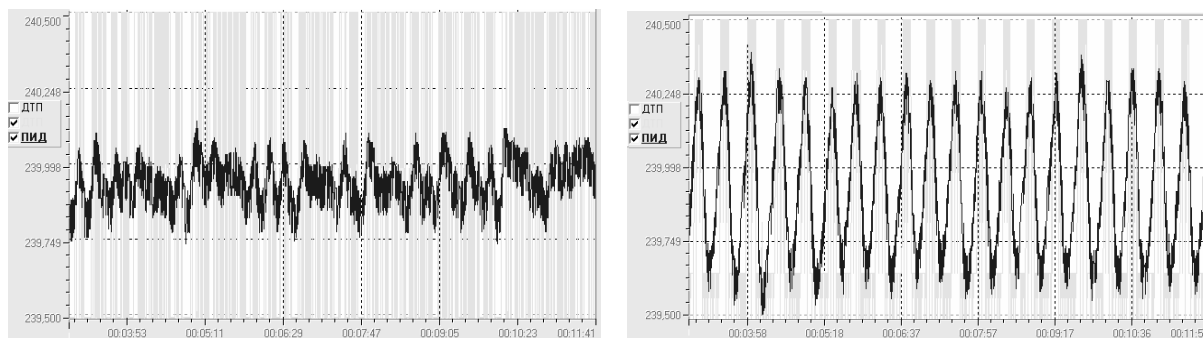


Рис. 4. Стабильность поддержания температуры термостата 240 °С. Слева – алгоритм управления с ограничением по скорости, справа – без ограничения по скорости

Библиографические ссылки

1. Айвазов Б. В. Введение в хроматографию. – М. : Высш. шк., 1983.
2. Винарский В. А. Хроматография : курс лекций. – В 2 ч. – Ч. 1. Газовая хроматография. – Минск : БГУ, 2002. – 192 с.
3. Айвазов Б. В. Введение в хроматографию. М., 1983.
4. Винарский В. А. Хроматография : курс лекций. Ч. 1. Газовая хроматография. Минск, 2002. 192 с.
5. Бесекаерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
6. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 4. С. 66–74; 2007. № 1. С. 78–88.
7. Ярышев Н. А., Андреева Л. Б. Тепловой расчет термостатов. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 176 с.
8. Пат. № 2476874 РФ МПК G01N30/54 Термостат хроматографа / Морозов В., Скурихин С. А., Старикова Л. М., Сизова Н. О. – Опубл. 27.02.2013.
9. Основные технические характеристики хроматографа ЛГХ-3000. – URL: [http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-](http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki)

[produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki](http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki).

10. Пат. № 2476874 РФ МПК G01N30/54 Термостат хроматографа / Морозов В., Скурихин С. А., Старикова Л. М., Сизова Н. О. – Опубл. 27.02.2013.

11. Основные технические характеристики хроматографа ЛГХ-3000. – URL: <http://www.kupol.ru/grazhdanskaya-produktsiya/khromatograficheskoe-oborudovanie/tekhnicheskie-kharakteristiki>.

12. Пат. № 2476874 РФ МПК G01N30/54 Термостат хроматографа / Морозов В., Скурихин С. А., Старикова Л. М., Сизова Н. О. – Опубл. 27.02.2013.

13. Вздудева Н. О., Гитлин В. Б. Поддержание температурного режима колонок хроматографа путем изменения скважности управляющих импульсов // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 3. – С. 111–113.

14. Бесекаерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.

15. Ярышев Н. А., Андреева Л. Б. Тепловой расчет термостатов. Л., 1984. 176 с.

16. Егоров В. И., Кораблев В. А., Шарков А. В. Системы термостатирования : методические указания к лабораторным работам. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2006. – 51 с.

Vzduleva N. O., Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Stabilization of the thermostat chromatograph regime by adjusting the rate of temperature change in a control system for duty cycle of the control pulse

An algorithm is proposed, which allows to reduce the deviation of the heating temperature thermostat's about temperature setting by considering the rate of change of temperature in the heating zone. The width of the window moving averages is determined which is used to estimate the rate of temperature change. It was shown that keeping the rate of change of temperature reduces the amount of deviation relative to the thermostat set point temperature by more than twice.

Keywords: chromatograph, temperature control, duty cycle, PID-control

Получено: 24.03.15