

РОБАСТНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫМ АППАРАТОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКСТРАКТА ХМЕЛЯ

Н. С. КОЛЕСНИК, А. А. МАРГУН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nik.kolesnik.1998@mail.ru*

Представлена разработанная система управления жидкостными теплообменными аппаратами в производстве экстракта хмеля. Реализован робастный регулятор на основе метода скользящих режимов и наблюдателя Люенбергера полного порядка. Проведен сравнительный анализ с этого метода и метода ПИД-регулирования с использованием широтно-импульсной модуляции в условиях возмущений, шумов и квантования измерений. Приведены результаты моделирования, подтверждающие преимущества предложенного подхода.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, экстракция хмеля, система управления, ПИД-регулятор, метод скользящих режимов

Введение. На сегодняшний день в пивоваренной промышленности широко используется хмельной экстракт, обладающий рядом преимуществ по сравнению с сухим хмелем. Однако сам процесс экстракции является весьма трудоемким, что обуславливает необходимость его автоматизации. Процедура экстракции требует управления нагревом внутри теплообменных аппаратов, где происходит конденсация углекислого газа и введение углекислоты в сверхкритическое состояние [1]. Как правило, этот процесс автоматизируется с помощью двухпозиционных жидкостных клапанов. Модальное управление в таком случае приводит к установившейся статической ошибке. Из-за сложности идентификации параметров системы управление зачастую осуществляется с помощью ПИД-регулятора, настройка которого производится эмпирическим путем, что снижает эффективность системы управления, ухудшает ее динамические и статические показатели качества либо требует значительных временных затрат, а также сравнительно высоких вычислительных мощностей [2—8]. Наиболее распространенные адаптивные алгоритмы, как правило, сложны с вычислительной точки зрения и требуют процесса настройки [9, 10], кроме того, в процессе адаптации нельзя гарантировать показатели качества — только после переходных процессов. Поэтому остается востребованной разработка простых и эффективных методов управления. Альтернативой вышеописанным способам является использование метода скользящих режимов, подходящего для двухпозиционных исполнительных устройств. Эффективность данного метода подтверждается рядом современных исследований [11—16].

Объект управления. Объектом управления служит двухконтурный жидкостный нагревающий теплообменный аппарат, во внутреннем контуре которого протекает углекислота, во внешнем — нагревающая жидкость (вода). Проектируемая система управления имеет следующий типовой состав: средства измерения, контроллер и двухпозиционный клапан, регулирующий подачу нагревающей жидкости (рис. 1).

Средства измерения включают в себя датчики температуры, которые измеряют температуру окружающей среды, нагревающей жидкости и рабочей жидкости. Эти данные вместе с сигналом от оператора, задающего желаемую температуру углекислоты, передаются на контроллер. Контроллер вырабатывает управляющее воздействие, передаваемое на клапан, открывая или закрывая его, тем самым поддерживая заданную температуру CO₂ на выходе из теплообменника.

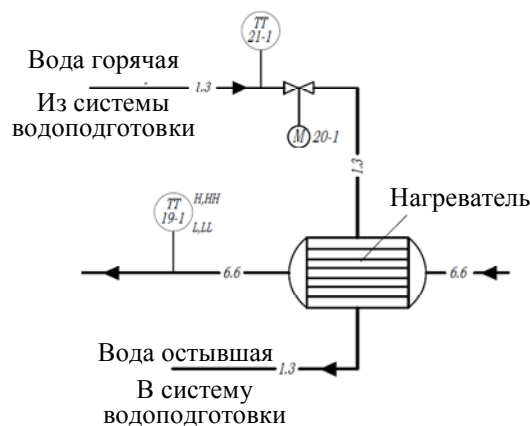


Рис. 1

Ниже представлены характеристики технологического процесса.

Параметры аппарата и процесса

Теплоемкость, Дж/(кг·К):	
CO ₂	870
меди	381
воды	4195
Масса, кг:	
воды	10
теплообменника	100
CO ₂	40
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К):	
стали	50
меди	401
Поверхностная площадь контакта, м ² :	
воды и теплообменника	6
теплообменника и окружающей среды	30
CO ₂ и теплообменника	6
<i>Переменные технологического процесса</i>	
Температура CO ₂ , ...°С:	
перед нагревателем	6
после нагревателя	40
Температура, ...°С:	
окружающей среды	25
нагреваемой жидкости	80
<i>Требуемые показатели качества</i>	
Время переходного процесса, мин, менее	1
Перерегулирование, %, менее	5
Установившаяся ошибка, ...°С, менее	2

Моделирование. Математическая модель аппарата описывается выражениями теплового баланса для внутреннего и внешнего контуров соответственно.

$$C_{rz}m_{rz}dT_{rz} = a_m F_{rz}(T_{to} - T_{rz})dt;$$

$$C_{to}m_{to}dT_{to} = a_m F_n(T_n - T_{to}) - a_{st}F_{to}(T_{to} - T_{os})dt - a_m F_{rz}(T_{to} - T_{rz})dt,$$

где C — теплоемкость, m — масса, T — температура, F — площадь поверхности, a_m — коэффициент теплопереноса меди; a_{st} — коэффициент теплопереноса стали; индексы: rz — рабочая жидкость (углекислота), to — теплообменный аппарат, os — окружающая среда, n — нагреватель (горячая вода).

Приведем систему уравнений к виду модели вход—состояние—выход:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx. \end{aligned} \right\}$$

В качестве вектора состояния выберем температуры рабочей жидкости и теплообменного аппарата, входное воздействие содержит температуры окружающей среды и нагревающей жидкости:

$$x = \begin{bmatrix} T_{rz} \\ T_{to} \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} T_{os} \\ T_n \end{bmatrix},$$

тогда матрицы A и B примут следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{a_m F_{rz}}{C_{rz} m_{rz}} & \frac{a_m F_{rz}}{C_{rz} m_{rz}} \\ \frac{a_m F_{rz}}{C_{to} m_{to}} & \frac{-a_m F_n - a_{st} F_{to} - a_m F_{rz}}{C_{to} m_{to}} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{a_{st} F_{to}}{C_{to} m_{to}} & \frac{a_m F_n}{C_{to} m_{to}} \end{bmatrix}.$$

Подставив коэффициенты, получим

$$A = \begin{bmatrix} -0,07 & 0,07 \\ 0,06 & 0,21 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0,04 & 0,06 \end{bmatrix}.$$

Так как на выходе объекта управления производятся измерения температуры углекислоты, то матрица C будет равна

$$C = [1 \quad 0].$$

Ограничения. Моделирование объекта управления произведено с использованием ПО MatLab, где дополнительно были симитированы ограничения, накладываемые аппаратным обеспечением и окружающей средой:

- инерционность клапана (управляющий сигнал проходит через фильтр в виде аperiодического звена с задержкой 0,5 с);
- квантование сигналов датчиков (температура измеряется с точностью до 0,1 °C);
- шумы измерений (белый шум), искажающие температуру не более чем на 0,2 °C;
- случайные отклонения температуры окружающей среды и нагревающей жидкости до 5 и 10 °C соответственно (внешние возмущения).

Метод скользящих режимов. Данный метод отличается высокой робастностью по отношению к параметрическим отклонениям. Алгоритм формирует закон управления, обеспечивающий протекание процесса по той динамической траектории, которую задает разработчик [17].

Введем понятие ошибки регулирования E — разности между выходным и желаемым значениями температуры углекислоты:

$$E = T_{rz} - T_{rz}^*.$$

Тогда скорость изменения ошибки равна

$$E' = T'_{rz} - T'^*_{rz} = T'_{rz}.$$

В рассматриваемом случае выбрана поверхность скольжения, такая что при положительном произведении ошибки и скорости изменения ошибки происходит переключение положения клапана: $E'E > 0$. В этом случае входное воздействие можно представить как

$$u = \begin{cases} T_n & \text{при } E'E > 0; \\ T_{to} & \text{при } E'E < 0. \end{cases}$$

Клапан имеет два положения: открытое, при котором на вход подается значение температуры нагревающей жидкости, и закрытое — температура теплообменного аппарата.

Как правило, к недостаткам метода скользящих режимов относят высокочастотные переключения вблизи положения равновесия. В разработанной системе этот недостаток не является существенным в силу инерционности клапана.

Для реализации алгоритма управления требуется измерение производной температуры. Для оценки данной величины используется наблюдатель Люенбергера, обладающий простой инженерной реализацией:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}), \quad \hat{x}(0) = \hat{x}_0; \\ \hat{y} &= C^T \hat{x}. \end{aligned} \right\}$$

Матрица K задается исходя из требований к системе. В данном случае заданное время сходимости ошибки наблюдения равно 10 с. Для этого необходимо, чтобы собственные числа матрицы $A^*=(A-KC)$ были менее $10/3$. Выберем собственные числа, равные трем. Тогда матрица наблюдателя K примет следующие значения:

$$K = \begin{bmatrix} 1,68 \\ 2,7 \end{bmatrix}.$$

Метод ПИД-регулирования. ПИД-регулятор позволяет осуществлять управление с относительно простой настройкой. Так как в данном случае используется двухпозиционный клапан, необходима цифровая широтно-импульсная модуляция (ШИМ). В качестве импульсов с двумя возможными значениями выступают температура нагревающей жидкости и температура теплообменного аппарата. Средняя температура входного воздействия рассчитывается как среднее значение из десяти импульсов. Так как параметры системы полагаются неизвестными, регулятор был настроен эмпирически со следующими коэффициентами: $K_p = 5$, $K_i = 0,04$, $K_d = 1$.

Анализ. По результатам моделирования были построены график переходных процессов и график ошибок для обеих систем управления (рис. 2, а, б соответственно):

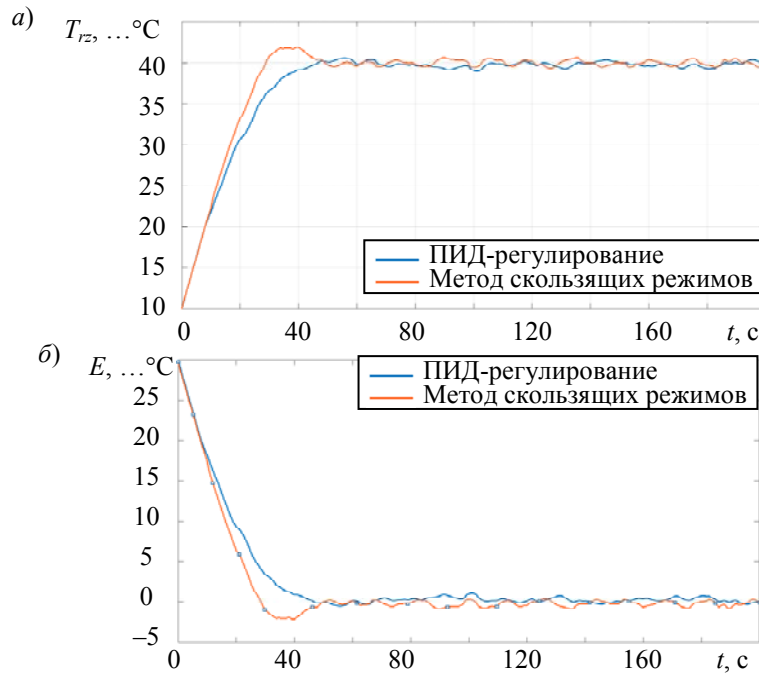


Рис. 2

Полученные показатели качества переходных процессов отражены в таблице.

Метод управления	Показатель качества		
	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %	Установившаяся ошибка, ...°C
Метод скользящих режимов	25,8	4,5	1,8
ПИД-регулирование	34,3	1,5	0,6

Приведенные данные демонстрируют преимущество метода скользящих режимов по скорости достижения заданной температуры. При невозможности построить достоверную модель объекта управления вместо наблюдателя применяется способ оценивания производных по конечной разности, отличающийся высокой точностью при сравнительно длительных термодинамических процессах. ПИД-регулирование обеспечивает меньшее отклонение регулируемой переменной, но несмотря на стабильность работы данный метод является более время- и ресурсозатратным. Кроме того, при ШИМ клапан переключается значительно чаще, чем при методе скользящих режимов, что ускоряет его износ.

Заключение. Представлена разработанная робастная система управления теплообменным аппаратом в производстве экстракта хмеля. Произведен сравнительный анализ методов управления — ПИД-регулирования и метода скользящих режимов, включающего наблюдатель Люенбергера полного порядка. Первый метод обеспечивает лучшие показатели качества, однако второй отличается простотой и при удовлетворительных показателях времени переходного процесса, максимального отклонения и перерегулирования позволяет регулировать температуру углекислоты без какой-либо настройки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христюк А. В., Касьянов Г. И. Хмель в пивоварении // Пиво и напитки. 2007. № 1. С. 10—12.
2. Данилушкин И. А., Гусева М. А. Структура системы модального управления теплообменным аппаратом // Восьмая Всерос. науч. конф. „Математическое моделирование и краевые задачи“, Самара. СамГТУ, 2011. С. 44—47.
3. Costa S. J., Ferreira R., Igreja J. M. Temperature control on double-pipe heat-exchangers // 14th APCA Intern. Conf. on Automatic Control and Soft Computing. 2020. Vol. 695 LNEE. P. 293—302.
4. Somasundar Reddy C., Balaji K. A Genetic algorithm (GA)-PID controller for temperature control in shell and tube heat exchanger // 1st Intern. Conf. on Computational Engineering and Material Science, ICCEMS 2020; Karnataka, India, 17—18 July 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/925/1/012020.
5. Adnan Khalid, Kamran Zeb, Aun Haider. Conventional PID, adaptive PID, and sliding mode controllers design for aircraft pitch control // Intern. Conf. on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). 2019. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711871.
6. Chu Zhou, Yao Wang, Xiaojie Zhang, Shaocheng Qu. Comparative research of digital-PID and sliding mode control strategy for DC/DC converter // Proc. Intern. Conf. on Modelling, Identification & Control. 2014. DOI: 10.1109/ICMIC.2014.7020717.
7. Zaineb Kanzari, Jalel Khediri, Wajdi Zaafrane, Mohamed Jemli. Comparison of two regulators for photovoltaic Systems: The PID regulator and sliding mode control // Intern. Conf. on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). 2016. DOI: 10.1109/CISTEM.2016.8066771.
8. Suppachai Howimanporn, Sasithorn Chookaew, Chaiyaporn Silawatchananai. Comparison between PID and Sliding Mode Controllers for Rotary Inverted Pendulum Using PLC // 4th Intern. Conf. on Automation, Control and Robots (ICACR). 2020. DOI: 10.1109/ICACR51161.2020.9265510.
9. Bhattarai B. P., De Cerio Mendaza I. D., Bak-Jensen B., Pillai J. R. Local adaptive control of solar photovoltaics and electric water heaters for real-time grid support // CIGRE Session 46. 2016.
10. Kueiming Lo, Rui Jiang. Optimal adaptive controller for multidimensional ARMAX model // Cybernetic and Systems. 2007. DOI:10.1080/01969720601139009.
11. Hanczyc E. M., Palazoglu A. Sliding mode control of chemical process systems described by partial differential equations // American Control Conf. 1993. 0 DOI: 10.23919/ACC.1993.4792897.
12. Jun-Chao Ren, Ding Liu, Zhan Wang, Yin Wan. Data-driven model-free adaptive sliding mode control for melt surface temperature of Czochralski silicon monocrystal growth process // Chinese Automation Congress (CAC). 2019. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997257.

13. Mardlijah Najar, Abdul Mahatir, Arif, Didik Khusnul. Comparison between PID controller and fuzzy sliding mode control (FSMC) on super heater system // Intern. Conf. on Mathematics: Pure, Applied and Computation. 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1218/1/012055.
14. Perez-Pirela M. C., Garcia-Sandoval J. P. Sliding modes control for a heat exchange system: experimental validation // Enfoque UTE. 2018. Vol. 9. P. 110—119. DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n4.404>.
15. Shah D., Shah A., Mehta A. Higher order networked sliding mode controller for heat exchanger connected via data communication network // European Journal of Control. 2021. Vol. 58. P. 301—314.
16. Ma Z., Mao X., Cai L., Liu X. Study on nonlinear heat exchanger control system of heat conduction oil of vessel // 4th Intern. Conf. on Control Science and Systems Engineering, ICCSSE. 2018. N 8724799. P. 16—20.
17. Ивайкин В. Использование скользящих режимов в регулировании // Современные технологии автоматизации. 2006. № 1. С. 90—94.

Сведения об авторах

Никита Сергеевич Колесник

— студент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: nik.kolesnik.1998@mail.ru

Алексей Анатольевич Маргун

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; доцент; E-mail: alexeimargun@gmail.com

Поступила в редакцию
25.06.2021 г.

Ссылка для цитирования: Колесник Н. С., Маргун А. А. Робастная система управления теплообменным аппаратом в производстве экстракта хмеля // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 11. С. 909—915.

ROBUST CONTROL SYSTEM FOR HEAT EXCHANGER IN HOP EXTRACT PRODUCTION

N. S. Kolesnik, A. A., Margun

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: nik.kolesnik.1998@mail.ru

A control system developed for liquid heat exchanger in hop extract production is presented. A robust controller based on the sliding mode method and the full-order Luenberger observer is implemented. A comparative analysis of this method and the PID control method using pulse-width modulation under conditions of disturbances, noise and quantization of measurements is carried out. Simulation results confirming the advantages of the proposed approach are presented.

Keywords: heat exchanger, hop extraction, control system, PID controller, sliding mode method

REFERENCES

1. Khristyuk A.V., Kas'yanov G.I. *Pishchevaya promyshlennost'* (Food Industry), Moscow, 2007, pp. 10—12. (in Russ.)
2. Danilushkin I.A., Guseva M.A. *Matematicheskoye modelirovaniye i krayevyye zadachi* (Mathematical Modeling and Boundary Value Problems), 8th All-Russian Scientific Conference, Samara, 2011, pp. 44—47. (in Russ.)
3. Costa S.J., Ferreira R., Igreja J.M. *14th APCA International Conference on Automatic Control and Soft Computing*, CONTROLO, 2020, vol. 695 LNEE, pp. 293—302.
4. Somasundar Reddy C., Balaji K. *1st International Conference on Computational Engineering and Material Science, ICCEMS 2020*, GM Institute of Technology Davangere, Karnataka, India, 17—18 July 2020, vol. 925, pp. 012020.
5. Adnan Khalid, Kamran Zeb, Aun Haider, *2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*, 2019, DOI: 10.1109/ICEET1.2019.8711871.
6. Chu Zhou, Yao Wang, Xiaojie Zhang, Shaocheng Qu, *Proceedings of 2014 International Conference on Modelling, Identification & Control*, 2014, DOI: 10.1109/ICMIC.2014.7020717.
7. Kanzari Z., Khediri J., Zaafrane W., Jemli M. *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2016, no. 17258946, DOI: 10.1109/CISTEM.2016.8066771.
8. Howimanporn S., Chookaew S., Silawatchananai C. *2020 4th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR)*, 2020, no. 2020802, DOI: 10.1109/ICACR51161.2020.9265510.
9. Bhattarai B.P., De Cerio Mendaza I.D., Bak-Jensen B., Pillai J.R. *CIGRE Session 46*, 2016, no. C6-201.

10. Kueiming Lo, Rui Jiang, *Cybernetic and Systems*, 2007, DOI:10.1080/01969720601139009.
11. Hanczyc E.M., Palazoglu A. 1993 *American Control Conference*, 1993, DOI: 10.23919/ACC.1993.4792897.
12. Jun-Chao Ren, Ding Liu, Zhan Wang, Yin Wan, *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2019, no. 19394675, DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997257.
13. Najjar A.M., Arif D.K. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, no. 1(1218), pp. 012055.
14. Perez-Pirela P.M.C., Garcia-Sandoval J.P. *ENFOQUE UTE*, 2018, no. 4(9), pp., pp. 110–119.
15. Shah D, Shah A, Mehta A. *European Journal of Control*, 2021, vol. 58, pp. 301–314.
16. Ma Z., Mao X., Cai L., Liu X. *4th International Conference on Control Science and Systems Engineering, ICCSSE 2018*, no. 8724799, pp. 16–20.
17. Ivaykin V. *Contemporary Technologies in Automation*, 2006, no. 1, pp. 90–94. (in Russ.)

Data on authors

- Nikita S. Kolesnik** — Student; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: nik.kolesnik.1998@mail.ru
- Alexey A. Margun** — PhD; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Associate Professor; E-mail: alexeimargun@gmail.com

For citation: Kolesnik N. S., Margun A. A. Robust control system for heat exchanger in hop extract production. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 11. P. 909–915 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-11-909-915