

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОГРЕВАТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ ОДЕЖДЫ С УГЛЕРОДНОЙ ЛЕНТОЙ

DYNAMIC MODEL IDENTIFICATION OF THE HEATING SECTION OF CLOTHES WITH CARBON TAPE

О.М. ВЛАСЕНКО, А.А. КАЗНАЧЕЕВА, С.В. ЗАХАРКИНА

O.M. VLASENKO, A.A. KAZNACHEEVA, S.V. ZAKHARKINA

(Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(The Kosygin State University of Russia)

E-mail: vlasenko-om@rguk-ru

Актуальная задача разработки автоматической системы регулирования температуры в спецодежде для работы в экстремальных условиях включает в себя разработку компактных обогревательных элементов, подбор технических средств автоматизации, источника питания, а также моделирование системы управления работой обогревательных элементов. Одним из первых этапов моделирования системы является получение динамической модели обогревательной секции как объекта управления. В статье приведено описание экспериментального исследования обогревательной секции одежды на основе углеродной ленты. По экспериментальным данным построены кривые разгона и проведена идентификация моделей ленты и секции по трем методам: методу характерных точек, методу Орманса и методу Круга – Мининой. Проведен сравнительный анализ полученных моделей по среднеквадратическому отклонению модели от экспериментальных данных. Определены передаточные функции и переходные характеристики отдельно для углеродной ленты и внешнего слоя секции. В дальнейшем они будут использованы для построения автоматической системы регулирования температуры, выбора закона регулирования и параметров настройки регулятора.

The current task of developing an automatic temperature control system in workwear for working at low temperatures includes the development of compact heating elements, selection of automation equipment, and a power source. Modeling the control system to determine optimal control modes is a necessary step. The first stage of system modeling involves obtaining a dynamic model of the heating section as a control object. The article describes an experimental study of the heating section of clothing based on carbon tape. Acceleration curves based on experimental data were plotted. Model identification using three methods: the Characteristic Point method, the Ormans method and the Krug-Minina method was carried out. A comparative analysis of the resulting models was carried out based on the standard deviation of the model from the experimental data. The transfer functions and transient characteristics are determined separately for the carbon tape and the outside layer of the section. In the future, they will be used to build an automatic temperature control system, select a control law and regulator settings.

Ключевые слова: обогревательная секция, передаточная функция, динамическая модель, углеродная лента, постоянная времени, запаздывание, переходная характеристика, метод Орманса, идентификация модели.

Keywords: heating section, transfer function, dynamic model, carbon tape, time constant, delay, step response, the Ormans method, model identification.

Теплозащитная одежда с обогревательными секциями, выполненными на основе углеродной ленты, – легкое, удобное и безопасное решение задачи обогрева человека при длительной работе в условиях низких температур. Внедрение в одежду активного нагревательного элемента должно обязательно сопровождаться автоматической системой управления его работой. Автоматическая система регулирования (АСР) на базе компактного микроконтроллера и цифровых датчиков позволит оптимально расходовать энергию источника питания, а также обеспечит высокую точность поддержания температуры в одежде на заданном уровне.

Многообразие различных вариантов обогрева спецодежды, наличие быстро меняющихся возмущающих воздействий, действующих на систему, появление различных интеллектуальных и цифровых технологий в области автоматизации и передачи данных – все это делает задачу проектирования обогревательной спецодежды с АСР актуальной [1, 3...5]. В свою очередь, проектирование автоматической системы управления невозможно без этапа моделирования как отдельных элементов системы, так и всей системы управления в целом [4, 7...9].

Одной из первых задач при моделировании системы управления технологического процесса является идентификация модели объекта управления [9, 10].

Математические модели, описывающие объект, могут быть выведены аналитически исходя из представления о сущности физико-химических процессов, протекающих в объекте, либо получены в результате проведения экспериментальных исследований объекта и обработки полученного массива данных. При этом экспериментальная модель – это формализованное уравнение, связывающее входные и выходные переменные объекта и обеспечивающее совпадение выходных переменных объекта и модели при одинаковых входных воздействиях [10, 11].

Существуют различные методы идентификации моделей по экспериментальным данным, они зависят от цели и вида получаемой модели, от доступного инструментария для исследования и обработки данных. Наиболее известны методы параметрической идентификации [12, 13], методы получения модели в пространстве состояний [14], метод упрощенной модели, метод Орманса, характерных точек и другие [10, 15, 16].

Ранее были проведены исследования и разработаны несколько вариантов электрообогревательных секций на основе углеродной ленты. По результатам проектных расчетов подобраны схемы подключения углеродных нагревательных лент, изготовлены образцы секций различных размеров и проведены предварительные испытания [1, 2].

По результатам данных испытаний выбраны следующие проектные решения: размер секции выбран 10x20 см, ленты располагаются в секции параллельно друг другу на расстоянии 1 см (всего 4 ленты в секции), ленты подключаются к источнику питания параллельно. Общее сопротивление ленты составляет 3,4 Ом. Ток в ленте необходимо поддерживать на уровне 0,5...0,7 А. Общий ток, подводимый к секции, должен составлять 2...2,2 А, напряжение питания 6,5...6,8 В [2].

Следующим этапом является исследование свойств секции как объекта автоматической системы регулирования температуры, а именно идентификация ее динамической модели. Для решения данной задачи была собрана схема экспериментальной установки, включающая два цифровых датчика температуры DS18B20, подключенных к микроконтроллеру Arduino Uno, лабораторный источник постоянного напряжения и ноутбук, на котором через монитор в среде IDE выводятся данные об измеряемой температуре. В коде микроконтроллера настроили сбор данных через каждые 20 секунд. Один датчик установили внутри секции непосредственно в ленте, второй за-

крепили на поверхности обогревательной секции.

Провели серию опытов, по которым построили усредненные кривые разгона для температуры ленты и секции (рис. 1).

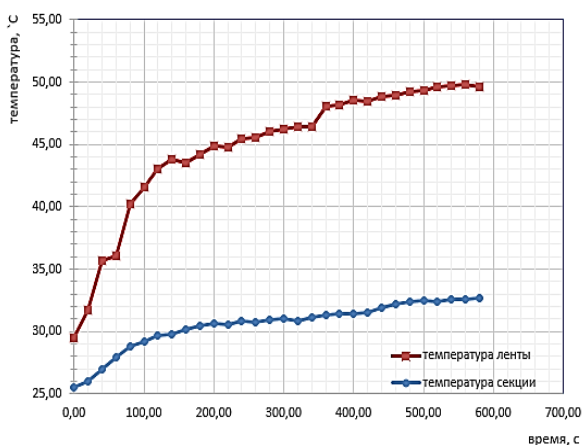


Рис. 1

Для определения теплопроводности обогревательной секции использовали уравнение теплопроводности через тонкую стенку:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} S(\theta_l - \theta_c), \quad (1)$$

где Q — подводимая тепловая мощность, равная по закону Джоуля-Ленца подводимой электрической мощности, Вт; λ — коэффициент теплопроводности слоя секции от ленты до поверхности, Вт/м²·К; δ — толщина слоя секции, м; S — площадь секции, м²; θ_l — температура ленты, °С; θ_c — температура секции, °С.

Значения температур взяли при установившемся режиме нагрева. Разность температур составила 17°С.

Таким образом, коэффициент теплопроводности рассчитали по формуле:

$$\lambda = \frac{I^2 R \cdot \delta}{S \cdot (\theta_l - \theta_c)}. \quad (2)$$

Получили коэффициент теплопроводности секции 0,097 Вт/м²К. Данный коэффициент является важной характеристикой теплофизических свойств комплексного материала с активным элементом обогрева, образцом которого является рассматриваемая секция, и может быть использован для

проектирования одежды на основе таких секций.

Далее провели расчеты динамической модели отдельно ленты и секции. При этом использовали три распространенных метода идентификации: метод характерных точек, метод Круга – Мининой и метод Орманса, провели их сравнительный анализ [3].

На рис. 2 приведены переходные характеристики для температуры ленты, построенные: по экспериментальным данным; по уравнению модели, полученной по методу характерных точек; по уравнению модели, полученной по методу Круга – Мининой; по уравнению модели, полученной по методу Орманса.

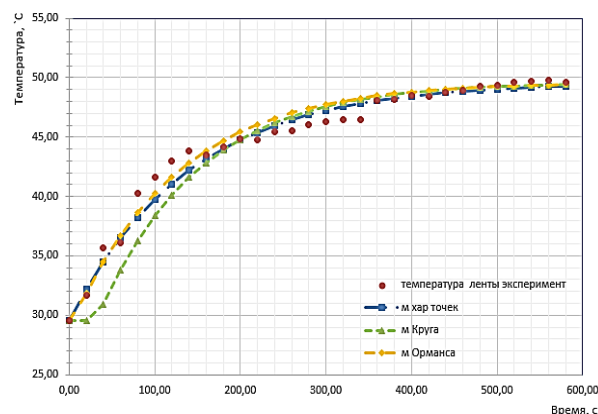


Рис. 2

Опишем методы, по которым построены данные характеристики. Для применения данных методов экспериментальную кривую разгона привели к безразмерному виду — переходной функции, используя соотношение:

$$h(t) = \frac{y_i - y_n}{y_{уст} - y_n}, \quad (3)$$

где y_i — i -е значение измеряемого выходного сигнала; y_n — начальное значение входного сигнала на кривой разгона; $y_{уст}$ — установившееся значение выходного сигнала на кривой разгона.

По методу характерных точек проводили идентификацию модели объекта регулирования как апериодического звена первого порядка:

$$W(p) = \frac{k_o}{T_o p + 1}, \quad (4)$$

где k_0 – коэффициент передачи объекта, который определили как отношение изменения выходного сигнала к изменению входного в установившемся состоянии:

$$k_0 = \frac{y_{уст} - y_n}{x_{уст} - x_n}. \quad (5)$$

По переходной функции определили две временные точки $t_{0,63}$ и $t_{0,87}$, соответствующие значениям выходного сигнала 0,63 и 0,87. Постоянную времени объекта по методу характерных точек определили следующим образом:

$$T_1 = t_{0,63}, \quad T_1 = t_{0,87}/2, \quad T_0 = 0,5(T_1 + T_2). \quad (6)$$

По экспериментальной кривой разгона (рис. 2) по методу характерных точек получена следующая модель:

$$W(p) = \frac{2,95}{141p+1}. \quad (7)$$

Уравнение модели, приведенное к реальным координатам:

$$\theta(t) = \theta_n + \Delta\theta(1 - e^{-\frac{t}{T_0}}). \quad (8)$$

По методу Круга – Мининой проводили идентификацию модели объекта регулирования как апериодического звена первого порядка с запаздыванием:

$$W(p) = \frac{k_0 \cdot e^{-p\tau}}{T_0 p + 1}, \quad (9)$$

где τ – запаздывание, с.

По переходной функции определили две временные точки $t_{0,33}$ и $t_{0,7}$, соответствующие значениям выходного сигнала 0,33 и 0,7. Время запаздывания и постоянную времени объекта определили по следующим соотношениям:

$$\tau = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}), \quad T_0 = 1,25 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}). \quad (10)$$

Модель ленты, полученная по методу Круга – Мининой, имеет вид:

$$W(p) = \frac{2,95 e^{-31,7p}}{118,13p+1}. \quad (11)$$

Уравнение модели для данного случая, приведенное к реальным координатам, имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_n + \Delta\theta(1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_0}}). \quad (12)$$

По методу Орманса проводили идентификацию модели объекта регулирования как апериодического звена второго порядка:

$$W(p) = \frac{k_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (13)$$

Значения постоянных времени в модели (13) определяли по соотношениям:

$$T_1 = \Theta(1 - \psi)/2, \quad T_2 = \Theta(1 + \psi)/2, \quad (14)$$

где коэффициент Θ находили по формуле: $\Theta = \frac{t_{0,7}}{1,2}$, а коэффициент ψ определяли по нормограмме (рис. 3) по точке, соответствующей значению $h(t_{0,4})$, или для кривой разгона $y(t_{0,4})/y_{уст}$, причем для звена второго порядка $t_{0,4} = t_{0,7}/3$.

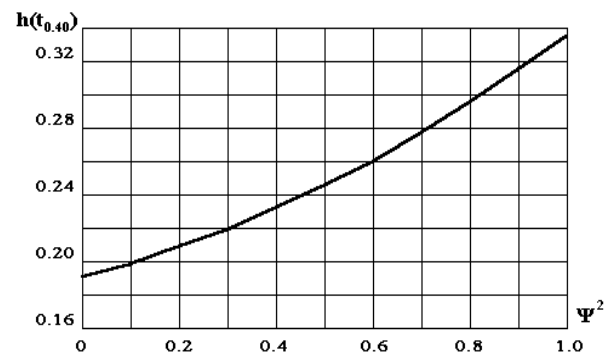


Рис. 3

В нашем случае значение $h(t_{0,4}) = y(t_{0,4})/y_{уст} = 0,32$. И по графику, приведенному на рис. 3, $\psi^2 = 0,925$ или $\psi = 0,962$.

Модель ленты, полученная по методу Орманса, имеет вид:

$$W(p) = \frac{2,95}{(126,71p+1)(2,47p+1)}. \quad (15)$$

Уравнение переходной характеристики модели для данного случая, приведенное к реальным координатам:

$$\theta(t) = \theta_n + \Delta\theta(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}}). \quad (16)$$

Сравнительный анализ моделей проводили по среднеквадратическому отклонению модели от экспериментальных данных:

$$\sigma = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{\text{э}}(t_i) - h_{\text{м}}(t_i))^2}. \quad (17)$$

Для моделей, полученных по методу характерных точек и Орманса, это отклонение составило 0,16, тогда как для метода Круга – Мининой – 0,31. Таким образом, для дальнейших расчетов можно принять модель (7) как наиболее близкую экспериментальным данным и простую по форме.

Аналогично получены передаточные функции и уравнения переходной характеристики для секции по методу характерных точек и методу Круга – Мининой. Среднеквадратическое отклонение значений модели от экспериментальных данных для обеих моделей составило 0,06.

Передаточная функция секции по методу характерных точек:

$$W(p) = \frac{1.05}{182.56p+1}. \quad (18)$$

Передаточная функция секции по методу Круга – Мининой:

$$W(p) = \frac{1.05 \cdot e^{-5.45p}}{164.18p+1}. \quad (19)$$

Для решения задачи идентификации динамической модели объекта управления АСР существует большое разнообразие различных методов. Применение конкретного метода зависит от степени сложности, характера экспериментального массива данных и цели использования модели.

Для вывода динамической модели обогревательной секции на основе углеродной ленты применили три наиболее удобных и простых метода – метод характерных точек, метод Орманса и метод Круга – Мининой. Методы характерных точек и Орманса показали близкие по точности результаты, лучшие по сравнению с методом Круга – Мининой. Модель, полученная по методу характерных точек, представляет собой аperiodическое звено первого порядка, по

методу Орманса – аperiodическое звено второго порядка. Для дальнейших исследований делаем выбор в пользу более простой модели.

ВЫВОДЫ

На основе анализа существующих методов идентификации выбраны три метода: метод Орманса, метод характерных точек и метод Круга – Мининой для обработки экспериментального массива данных и расчета динамической модели обогревательной секции.

Полученные передаточные функции и переходные характеристики для ленты и секции могут быть использованы для построения автоматической системы регулирования температуры, выбора закона регулирования и параметров настройки регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Н.С., Власенко О.М. Спецодежда для экстремальных условий с активными элементами // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. С. 125...132.
2. Григорьева С.М., Краснослободцев К.С., Власенко О.М. Разработка системы управления температурой в электрообогревательной защитной спецодежде // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. С. 93...97.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагреватели и Арктика // Вестник научно-технического развития. 2019. № 2(138). С. 30...40. – DOI 10.18411/vntr2019-138-4.
4. Mahnic M., Petrak S., Jelka G., Rolich T. Analysis of dynamics and fit of diving suits // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2017. P. 1...6.
5. Zhang H. Performance of immersion suits: A literature review // Journal of Industrial Textiles. 2013. 44(2). P. 288...306.
6. Kingma B.R., Frijns A.J., Schellen L. Beyond the classic thermoneutral zone: Including thermal comfort // van Marken Lichtenbelt W.D. Temperature (Austin). Jul 8;1(2). 2014. P. 142...149.
7. Власенко О.М., Казначеева А.А., Захаркина С.В. К вопросу моделирования обогревающего слоя спецодежды с автоматическим самонастраивающимся регулированием // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2(398). С. 152...158. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_152.

8. Li B., Yang Y., Yao R., Liu H., Li Y. A simplified thermoregulation model of the human body in warm conditions // *Applied Ergonomics*. 2017. 59 (A). P. 387...400.

9. Казначеева А.А., Власенко О.М., Захаркина С.В. Анализ моделей представления знаний в задачах управления элементами активной тепловой защиты спецодежды для работы в экстремальных условиях // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. С. 57...62.

10. Мазуров В. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 1. Промышленные объекты управления // Компоненты и технологии. 2003. № 4(30). С. 154...157.

11. Luig L. System Identification: An Overview. In: Baillieul, J., Samad, T. (eds) *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. 2019. P. 1...15.

12. Панферов В.И., Панферов С.В., Халдин К.С. Параметрическая идентификация модели объекта управления по переходной функции работающей системы автоматического регулирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2019. Т. 19, № 3. С. 52...59. – DOI 10.14529/ctcr190305.

13. Pachini D. Identification in Parametric Models: The Minimum Hellinger Distance Criterion // *Econometrics*. 2022. 10: 10. P. 1...14.

14. Трудоношин В.А., Федорук В.Г. Модифицированный метод переменных состояния // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2019. №6. С. 19...28.

15. Карев М.Н., Гарькина И.А. Математическое описание объектов управления // *Молодой ученый*. 2015. № 5(85). С. 153...155.

16. Работников М.А. Разработка метода обновления многомерной динамической модели управляемого технологического объекта // *Проблемы управления*. 2021. № 3. С. 58...64. – DOI 10.25728/пу.2021.3.7.

REFERENCES

1. Marchuk N.S., Vlasenko O.M. Overalls for extreme conditions with active elements // *Collection of scientific papers of the Department of Automation and industrial Electronics*. Moscow: Kosygin Russian State University, 2021. P. 125...132.

2. Grigorieva S.M., Krasnoslobodtsev K.S., Vlasenko O.M. Development of a temperature control system in electric heating protective overalls // *Collection of scientific papers of the Department of Automation and Industrial Electronics*. Moscow: Kosygin Russian State University, 2022. P. 93...97.

3. Shulzhenko A.A., Modestov M.B. Woven electric heaters and the Arctic // *Bulletin of scientific and technical development*. 2019. № 2(138). P. 30...40. – DOI 10.18411/vntr2019-138-4.

4. Mahnic M., Petrak S., Jelka G., Rolich T. Analysis of dynamics and fit of diving suits // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2017. P. 1...6.

5. Zhang H. Performance of immersion suits: A literature review // *Journal of Industrial Textiles*. 2013. 44(2). P. 288...306.

6. Kingma B.R., Frijns A.J., Schellen L. Beyond the classic thermoneutral zone: Including thermal comfort // van Marken Lichtenbelt W.D. *Temperature (Austin)*. Jul 8;1(2). 2014. P. 142...149.

7. Vlasenko O.M., Kaznacheeva A.A., Zakharkina S.V. About simulation of the heating layer of workwear with automatic self-adjusting regulation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. № 2(398). P. 152...158. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_2_152.

8. Li B., Yang Y., Yao R., Liu H., Li Y. A simplified thermoregulation model of the human body in warm conditions // *Applied Ergonomics*. 2017. 59 (A). P. 387...400.

9. Kaznacheeva A.A., Vlasenko O.M., Zakharkina S.V. Analysis of knowledge representation models in the tasks of controlling elements of active thermal protection of workwear for work in extreme conditions // *Collection of scientific papers of the Department of Automation and Industrial Electronics*. Moscow: Kosygin Russian State University, 2021. P. 57...62.

10. Mazurov V. Automatic regulators in control systems and their configuration. Part 1. Industrial control facilities // *Components and technologies*. 2003. № 4(30). P. 154...157.

11. Luig L. System Identification: An Overview. In: Baillieul, J., Samad, T. (eds) *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer, London. 2019. pp. 1...15.

12. Panferov V.I., Panferov S.V., Khaldin K.S. Parametric identification of the control object model by the transient function of an operating automatic control system // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics*. 2019. Vol. 19, No. 3. P. 52...59. – DOI 10.14529/ctcr190305.

13. Pachini D. Identification in Parametric Models: The Minimum Hellinger Distance Criterion // *Econometrics*. 2022. 10: 10. P. 1...14.

14. Trudonoshin V.A., Fedoruk V.G. Modified method of state variables // *Mechanical engineering and computer technologies*. 2019. No.6. P. 19...28.

15. Karev M.N., Garkina I.A. Mathematical description of control objects // *Young Scientist*. 2015. № 5(85). P. 153...155.

16. Rabotnikov M.A. Development of a method for updating a multidimensional dynamic model of a controlled technological object // *Problems of management*. 2021. No. 3. P. 58...64. – DOI 10.25728/пу.2021.3.7.

Рекомендована кафедрой автоматики и промышленной электроники РГУ им. А.Н. Косыгина. Поступила 23.05.24.