

# ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

---

УДК 681.53

Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова, И. О. Оробей  
Белорусский государственный технологический университет

### ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

В статье проведено исследование способа выбора оптимального вида математической модели и определение ее параметров по каналам управления на примере воздушного теплообменника. С этой целью для выбора шаблона идентификации передаточной функции для объекта выполнен ряд активных экспериментов. Выбор использованных шаблонов обусловлен анализом литературы и ограниченным количеством коэффициентов идентификации. Увеличение порядка модели канала управления для прикладных задач не рационально по причине нелинейного характера свойств большинства технологических процессов. Результаты эксперимента подтвердили, что динамические параметры модели подвержены постоянным случайным изменениям. Для исследуемого теплового объекта управления, который расположен в отапливаемом помещении, колебания динамических параметров превышали 5%.

Нелинейные свойства теплообменников обуславливают необходимость проведения ряда экспериментов. Анализ разгонных характеристик проводился численными методами для разных шаблонов путем минимизации отклонения между экспериментальными данными и линейной моделью. Для определения выходных параметров объекта управления были использованы три первичных преобразователя: два датчика температуры и один датчик влажности. Датчики температуры были установлены в одной точке пространства, но имели существенные отличия в конструкции и способе монтажа. В то же время результаты показывают, что теплообмен в таких объектах происходит достаточно сложно. Сравнение передаточных функций для двух датчиков температуры не позволяет по экспериментальным данным отделить динамику самого датчика от динамики объекта управления.

Анализ результатов идентификации показал, что лучшим вариантом для данного объекта будет использование апериодического звена второго порядка с запаздыванием. При этом качество аппроксимации зависит от направления задающего воздействия.

**Ключевые слова:** идентификация, нелинейная динамика, динамика теплообменников.

**Для цитирования:** Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Идентификация параметров динамических каналов воздушного теплообменника // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 70–79.

D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova, I. O. Orobei  
Belarusian State Technological University

### IDENTIFICATION OF THE DYNAMIC CHANNELS PARAMETER'S FOR THE AIRFLOW HEAT EXCHANGER

The article explores the method of choosing the optimal type of mathematical model and determining its parameters by control channels using the example of an airflow heat exchanger. To this end, a number of active experiments were performed to select the transfer function identification template for the object. The choice of templates used is due to the analysis of the literature and the limited number of identification coefficients. Increasing the order of the control channel model for applied problems is not rational due to the non-linear nature of the properties of most technological processes. The results of the experiment confirmed that the dynamic parameters of the model are subject to constant random changes. For the studied thermal control object, which is located in a heated room, fluctuations in dynamic parameters exceeded 5%.

Nonlinear properties of heat exchangers necessitate a series of experiments. The analysis of overlocking characteristics was carried out by numerical methods for different templates by minimizing the deviation between the experimental data and the linear model. To determine the output parameters of the control object, three primary transducers were used: two temperature sensors and one humidity sensor. Temperature sensors were installed at one point in space, but had significant differences in design and installation method. At the same time, the results show that heat transfer in such objects is rather complicated. Comparison of transfer functions for two temperature sensors does not allow us to separate the dynamics of the sensor itself from the dynamics of the control object based on experimental data.

Analysis of the identification results showed that the best option for this object would be to use a second-order aperiodic link with a delay. In this case, the quality of the approximation depends on the direction of the driving action.

**Key words:** identification, nonlinear dynamics, dynamics of heat exchangers.

**For citation:** Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Identification of the dynamic channels parameter's for the airflow heat exchanger. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2022, no. 2 (260), pp. 70–79 (In Russian).

**Введение.** При построении систем управления технологическими объектами, механическими системами сейчас применяются два подхода. Один обусловлен развитием методов прямого универсального управления без непосредственного выявления динамических характеристик элементов структуры управления и последующего синтеза звеньев коррекции и (или) регулирования. Для этого применяются как классические подходы с использованием математического анализа, так и нечеткие, нейронные и другие современные подходы. Несмотря на существование высокого потенциала у данного подхода, его применимость для управления технологическими процессами на сегодняшний день ограничена ввиду высоких требований к специалистам по внедрению и требований к надежности функционирования для реальных производств [1–6].

Устоявшиеся подходы к построению систем управления предполагают определение динамических каналов на основании теоретического анализа или (и) путем анализа экспериментальных данных. Наибольшей достоверностью обладают методы с применением активной идентификации, при которой до начала эксплуатации или в процессе функционирования производят активное воздействие на канал регулиро-

вания в разомкнутом или замкнутом состоянии [7–10]. Полученные в результате данные подвергаются обработке с помощью различных математических методов или специального программного обеспечения (например, System Identification Toolbox в MatLAB). Каналы управления технологическими процессами, как правило, обладают определенным уровнем нелинейности, что исключает точную линейную идентификацию. Большинство каналов также характеризуются определенной степенью нестационарности. По этой причине в процессе определения порядок передаточных функций обычно ограничивают.

Вид искомой передаточной функции может быть определен исходя из математического анализа физических процессов. Однако здесь также возникают сложности по причине наличия нелинейности и распределенности многих технологических процессов.

Одним из таких распределенных параметров является температура. В литературе встречаются различные варианты формирования модельных передаточных функций. Рассмотрим выбор формы аппроксимации на примере воздушного теплообменника.

**Объект исследования.** Объектом исследования является воздушный теплообменник.

Нагревание осуществлялось с помощью электрических нагревателей. В объекте установлены два типа датчика. Один с длинной металлической погружной частью (1000 мм), другой – канальный датчик влажности и температуры FTK+ фирмы Thermokon Sensortechnik (Германия). Датчики расположены в одной точке воздуховода. Управляющим воздействием выступает скорость движения подогретого воздуха. Изменение формируется за счет регулирования частоты оборотов двигателя нагнетающего вентилятора. Стенд находится в подвальном помещении с минимальным влиянием солнечного света на температуру объекта и окружающей среды. Нагреванию подвергался воздух в помещении, который проходил через воздуховоды с нагревателями. Влияние стенда «на самого себя», которое оценивалось с помощью датчика температуры на входе в воздуховод. В случае отклонения по каким-то причинам больше, чем на один градус, разгонные характеристики отбраковывались. Динамические характеристики снимались в области небольших отклонений около некоторого стационарного значения, но достаточных для того, чтобы обеспечить чувствительность измерительных преобразователей. Диапазон изменений варьировался для отслеживания его влияния на динамические характеристики.

**Методика исследования.** Для снятия характеристик была настроена связь между контроллером, к которому подключены датчики и исполнительные механизмы, и MatLAB через OPC-server. Перед началом проведения активного эксперимента включался стенд и температурный режим выводился на одно и то же стационарное значение. После прогрева и окончания переходных процессов проводилось отклонение в одну сторону и его возврат в другую. Результаты сохранялись для последующей обработки.

Обработка проводилась методом поиска коэффициентов передаточной функции путем минимизации коэффициента среднеквадратичного отклонения (СКО).

В результате проведенного анализа литературы выделили наиболее часто встречающиеся шаблоны для теплообменников:

$$\frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)}; \quad (1)$$

$$\frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^n}; \quad (2)$$

$$\frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; \quad (3)$$

$$\frac{1 - b \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; \quad (4)$$

$$\frac{k \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^n}. \quad (5)$$

Формула (1) наиболее популярна и давно применялась для определения настроек ПИД-регуляторов и не имеет прямого отношения непосредственно к теплообменным процессам, а является максимально допустимым огрублением, которое позволяет по полученному решению получить приемлемые, в большинстве случаев, настройки регуляторов. Создано немалое количество номограмм и таблиц, которые позволяют по значениям параметров модели выбрать настройки регулятора.

Использование формулы (2) рационально при значении  $n = 1$  или  $n = 2$ , когда распределенность температуры незначительна или проявляется достаточно слабо. При присутствии существенных градиентов температуры рационально будет использовать формулы (3)–(5).

**Результаты идентификаций.** Номера экспериментов и технические параметры их проведения сведены в табл. 1. Поскольку объект управления имеет отрицательный коэффициент усиления, то при увеличении частоты разгонная кривая и результаты аппроксимации имели вид, как на рис. 1.

Таблица 1

Параметры экспериментов

Номер эксперимента	Изменение частоты, Гц	Изменение температуры, °С	Изменение влажности, %
1	13,7–22,9	52,7–48,2	9,18–11,23
4	8,24–30,13	57,4–46,2	6,15–10,4
6	8,19–22,91	57,4–49,2–	6,74–10,01
8	8,19–22,91	58,03–49,34	6,79–9,86
9	22,91–8,16	49,43–58,52	9,86–6,54
11	8,19–19,31	56,46–49,09	6,79–9,47
12	19,25–8,16	49,38–56,86	9,57–6,69
13	8,24–19,31	56,90–50,46	6,74–9,08
14	19,30–8,17	50,56–59,15	9,08–6,54
15	8,19–30,13	56,33–45,86	8,35–13,57
16	30,13–8,19–	45,86–57,54	13,57–8,15
17	8,245–22,91	57,54–48,51	8,15–12,11
18	22,91–8,245	48,51–57,7	12,11–8,06

В табл. 2, 3 приведены значения интегральной ошибки, которые были получены по результатам аппроксимации. В табл. 2 сведены результаты при изменении показателя  $n$  формулы (5),

в табл. 3 представлены значения при разных шаблонах аппроксимаций. Номер 1 соответствует датчику температуры с металлической монтажной частью, 2 – ФТК+. Стрелка в таблице указывает на изменение управляющего воздействия: если вверх, то частота была увеличена, если вниз – уменьшена.

Таблица 2  
Интегральная ошибка при идентификации изменения температуры с использованием шаблона формулы (5)

Номер/ датчик	n				
	1	2	3	5	9
1/1, ↑	<b>0,1046</b>	0,1266	0,1316	0,2463	0,2142
1/2, ↑	<b>0,5840</b>	0,6497	0,6751	0,7253	0,7185
4/1, ↑	<b>0,0293</b>	0,0417	0,0812	0,1507	0,2541
4/2, ↑	<b>0,2080</b>	0,2689	0,3590	0,3529	0,3596
6/1, ↑	<b>0,0513</b>	0,1247	0,1476	0,3990	0,4390
6/2, ↑	<b>0,2080</b>	0,3171	0,3375	0,4119	0,4166
8/1, ↑	<b>0,0513</b>	0,1042	0,1120	0,2991	0,3292
8/2, ↑	<b>0,2835</b>	0,4004	0,4353	0,5282	0,5119
9/1, ↓	<b>0,0527</b>	0,0968	0,1001	0,2167	0,2796
9/2, ↓	<b>0,1676</b>	0,5431	3,7274	0,4510	0,4618
11/1, ↑	0,0821	<b>0,0814</b>	0,3289	0,4212	0,6021
11/2, ↑	<b>0,5555</b>	1,6216	0,7465	0,7888	0,7837
12/1, ↓	<b>0,1310</b>	0,1663	1,6201	0,3917	0,4861
12/2, ↓	<b>0,5903</b>	1,5134	6,4658	0,9666	0,9676
13/1, ↑	<b>0,1030</b>	0,0934	0,2162	0,5241	0,6208
13/2, ↑	<b>0,4300</b>	0,5476	0,5817	0,6362	0,6345
14/1, ↓	<b>0,0728</b>	0,0779	0,2969	0,4525	0,5545
14/2, ↓	<b>0,4042</b>	0,9971	5,2575	0,8386	0,8552
15/1, ↑	<b>0,0334</b>	0,0768	0,2174	0,0699	0,1394
15/2, ↑	<b>0,1190</b>	0,2089	0,1637	0,1841	0,4018
16/1, ↓	<b>0,0799</b>	0,1294	1,3143	0,3119	0,4115
16/2, ↓	<b>0,2418</b>	0,5654	4,4994	0,8411	0,8447
17/1, ↑	<b>0,0602</b>	0,1466	0,1062	0,3070	0,3260
17/2, ↑	<b>0,2614</b>	0,2665	0,2889	0,3360	0,3436
18/1, ↓	<b>0,1240</b>	0,1481	0,2822	0,4185	0,5068
18/2, ↓	<b>0,1310</b>	0,1663	1,6201	0,3917	0,4861

Непоследовательность цифр опытов обусловлена нарушением проведения экспериментов вследствие существенных возмущений, которым подвергалась установка при проведении опытов.

В каждой таблице выделены величины с минимальным значением интегральной ошибки. Этот же подход был использован и при составлении табл. 4, 5 для аппроксимации кривых разгона влажности. Соответственно, в табл. 4 интегральная ошибка с использованием аппроксимации формулы (5) при различных значениях n, табл. 5 – для разных шаблонов.

Таблица 3  
Интегральная ошибка при идентификации изменения температуры с использованием разных шаблонов формул

Номер/ датчик	Номер шаблона				
	(1)	(2)	(3)	(5) при n = 2	(4)
1/1, ↑	0,6878	1,0731	<b>0,5840</b>	0,6497	0,5849
1/2, ↑	0,2445	0,2202	<b>0,1046</b>	0,1266	<b>0,1046</b>
4/1, ↑	0,2780	0,0980	<b>0,0293</b>	0,0417	<b>0,0293</b>
4/2, ↑	0,3286	0,9755	<b>0,2080</b>	0,2689	0,2121
6/1, ↑	0,4281	0,0834	<b>0,0513</b>	0,1247	0,0523
6/2, ↑	0,3624	0,6378	<b>0,2080</b>	0,3171	0,2117
8/1, ↑	0,3367	0,1235	0,0513	0,1042	<b>0,0512</b>
8/2, ↑	0,4625	0,3641	<b>0,2835</b>	0,4004	0,2883
9/1, ↓	0,3596	0,0757	<b>0,0527</b>	0,0968	0,0531
9/2, ↓	0,4306	0,2706	<b>0,1676</b>	0,5431	0,1685
11/1, ↑	0,6118	0,1583	<b>0,0821</b>	0,0814	0,0812
11/2, ↑	0,7091	0,6539	<b>0,5555</b>	1,6216	0,5683
12/1, ↓	0,5667	0,1303	0,1310	0,1663	0,1304
12/2, ↓	0,8634	0,7359	<b>0,5903</b>	1,5134	0,5978
13/1, ↑	0,5390	0,1402	0,1030	<b>0,0934</b>	0,0970
13/2, ↑	0,5961	0,5058	<b>0,4300</b>	0,5476	0,4309
14/1, ↓	0,6443	0,1130	<b>0,0728</b>	0,0779	0,0729
14/2, ↓	0,7863	0,5661	<b>0,4042</b>	0,9971	0,4068
15/1, ↑	0,3736	0,5036	0,0334	0,0768	<b>0,0333</b>
15/2, ↑	0,2891	0,1350	<b>0,1190</b>	0,2089	0,1267
16/1, ↓	0,5371	0,0753	<b>0,0799</b>	0,1294	0,0797
16/2, ↓	0,7670	0,4359	<b>0,2418</b>	0,5654	0,2703
17/1, ↑	0,3098	0,1667	<b>0,0602</b>	0,1466	0,0599
17/2, ↑	0,2896	<b>0,2350</b>	0,2614	0,2665	0,2768
18/1, ↓	0,6003	0,1545	0,1240	0,1481	<b>0,1236</b>
18/2, ↓	0,7353	0,5496	<b>0,4225</b>	1,2632	0,4261

Таблица 4  
Интегральная ошибка при идентификации изменения влажности с использованием шаблона формулы (5)

Номер	n				
	1	2	3	5	9
1, ↑	<b>0,8456</b>	0,8926	0,8773	0,9102	1,1142
4, ↑	<b>0,1716</b>	0,1817	0,3040	0,3401	0,6319
6, ↑	<b>0,2819</b>	0,2908	0,3628	0,4366	0,6206
8, ↑	<b>0,3647</b>	0,3908	0,3810	0,4141	0,6422
9, ↓	0,4565	0,8499	<b>0,4524</b>	0,4540	0,4565
11, ↑	<b>0,6107</b>	0,6135	0,6935	0,8070	0,9195
12, ↓	<b>1,6091</b>	2,2348	4,7563	1,7249	1,7068
13, ↑	<b>0,5453</b>	0,5580	0,6484	0,7193	1,0474
14, ↓	<b>0,6820</b>	0,7725	0,7028	0,6975	0,7372
15, ↑	0,2912	0,3817	0,6664	<b>0,2773</b>	0,3195
16, ↓	<b>0,2408</b>	0,5530	0,2494	0,2551	0,2991
17, ↑	<b>0,2129</b>	0,3991	0,2608	0,2653	0,4394
18, ↓	<b>0,2985</b>	0,4006	0,3837	0,3960	0,4600

Таблица 5  
Интегральная ошибка при идентификации изменения влажности с использованием разных шаблонов формул

Номер	Номер шаблона				
	(1)	(2)	(3)	(5) при $n=2$	(4)
1, ↑	1,1000	0,8617	<b>0,8456</b>	0,8926	<b>0,8456</b>
4, ↑	0,5641	0,1785	0,1716	0,1817	<b>0,1713</b>
6, ↑	0,6665	0,2949	<b>0,2819</b>	0,2908	<b>0,2819</b>
8, ↑	0,6340	0,4981	<b>0,3647</b>	0,3908	0,3648
9, ↓	0,5226	0,7297	<b>0,4565</b>	0,8499	0,6138
11, ↑	1,0702	0,6712	<b>0,6107</b>	0,6135	0,6138
12, ↓	1,6730	1,8360	<b>1,6091</b>	2,2348	1,6763
13, ↑	0,9608	0,6283	<b>0,5453</b>	0,5580	0,5456
14, ↓	0,8712	0,8180	0,6820	0,7725	<b>0,6497</b>
15, ↑	0,4949	0,9817	0,2912	0,3817	<b>0,2766</b>
16, ↓	0,3961	0,4238	0,2408	0,5530	<b>0,2405</b>
17, ↑	0,4160	0,2896	0,2129	0,3991	<b>0,2115</b>
18, ↓	0,5345	<b>0,2897</b>	0,2985	0,4006	0,2984

На рис. 1, 2 приведены примеры кривых разгона, которые подвергались аппроксимации. Предварительно кривые были нормированы путем деления на диапазон изменения.

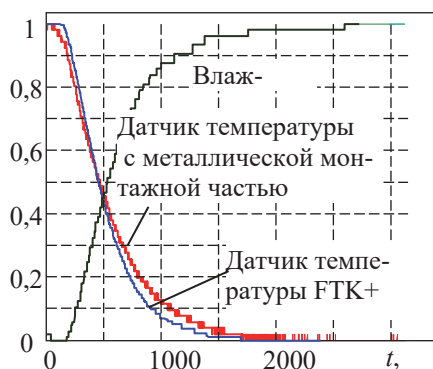


Рис. 1. Разгонные характеристики опыта 15 при увеличении управляющего воздействия

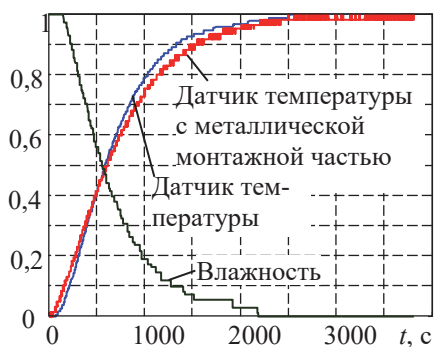


Рис. 2. Разгонные характеристики опыта 16 при уменьшении управляющего воздействия

Канал управления имеет отрицательный коэффициент управления по температуре и положительный по влажности, т. е. при увеличении частоты оборотов температура падает вследствие увеличения количества проходящего воздуха через нагреватели с постоянной мощностью, постоянно же влагосодержания при уменьшении температуры приводит к повышению влажности.

Для анализа качества аппроксимации приведены зависимости ошибки между экспериментальными данными и результатами аппроксимации для опытов 15 и 16 (рис. 3–14).

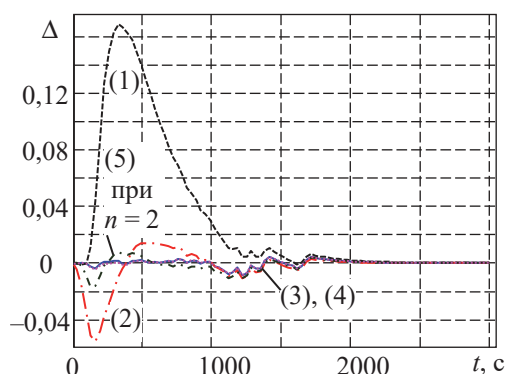


Рис. 3. Погрешность аппроксимации опыта 15 для датчика 1 при разных шаблонах

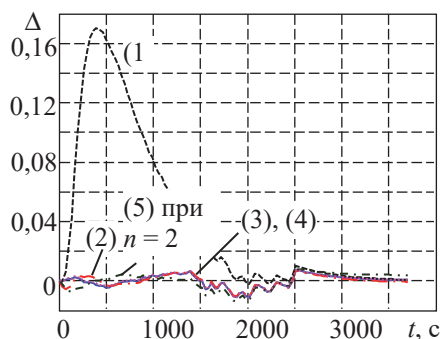


Рис. 4. Погрешность аппроксимации опыта 16 для датчика 1 при разных шаблонах

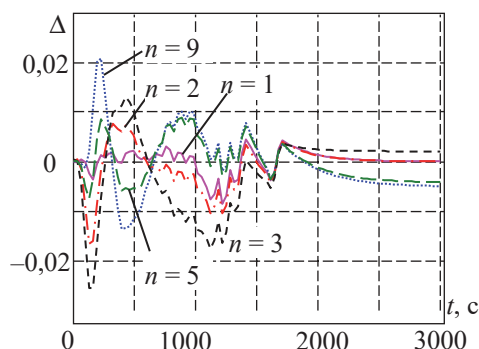


Рис. 5. Погрешность аппроксимации опыта 15 для датчика 1 при разных значениях  $n$  в формуле (5)

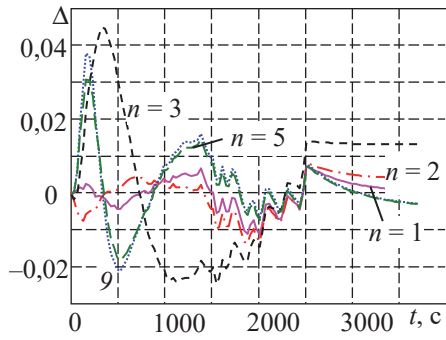


Рис. 6. Погрешность аппроксимации опыта 16 для датчика 1 при разных значениях  $n$  в формуле (5)

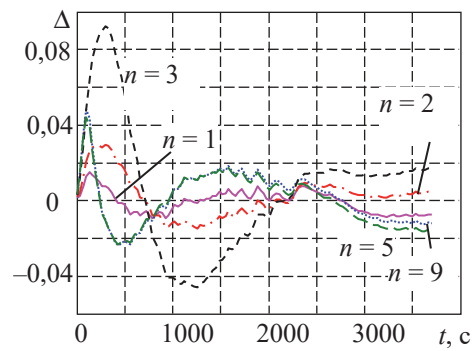


Рис. 10. Погрешность аппроксимации опыта 16 для датчика 2 при разных  $n$

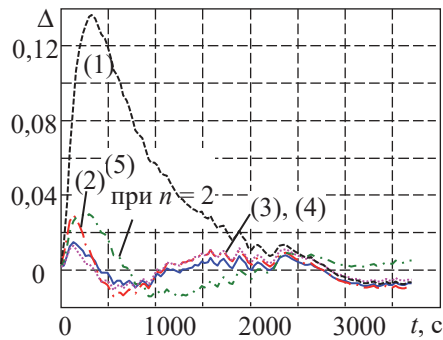


Рис. 7. Погрешность аппроксимации опыта 15 для датчика 2 при разных шаблонах

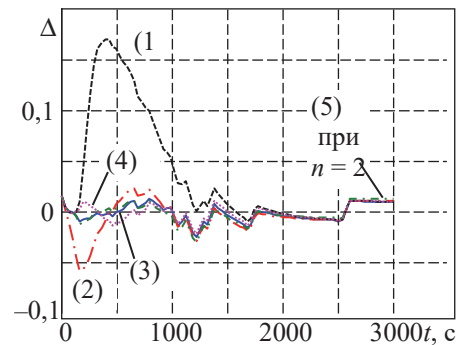


Рис. 11. Погрешность аппроксимации опыта 15 для влажности при разных шаблонах

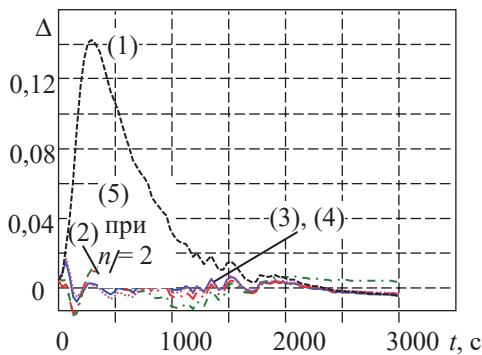


Рис. 8. Погрешность аппроксимации опыта 16 для датчика 2 при разных шаблонах

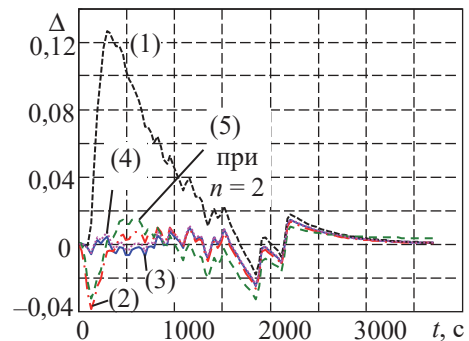


Рис. 12. Погрешность аппроксимации опыта 16 для влажности при разных шаблонах

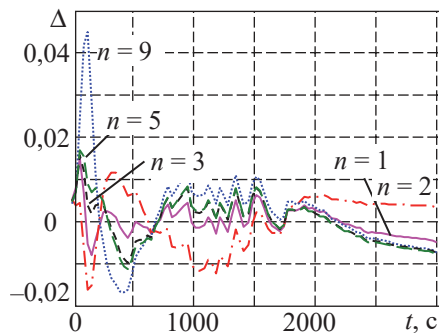


Рис. 9. Погрешность аппроксимации опыта 15 для датчика 2 при разных значениях  $n$  в формуле (5)

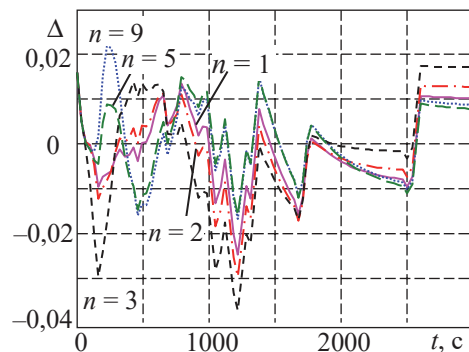


Рис. 13. Погрешность аппроксимации опыта 15 для влажности при разных значениях  $n$  в формуле (5)

Опыты характеризуются максимальным воздействием на объект исследования и минимальным случайным воздействием при проведении экспериментов. Графики на рис. 3–14 построены после проведения сглаживания по методике, представленной в литературе [6–9], что вызвано желанием уменьшить влияние эффекта квантования от аналого-цифровых преобразователей и шумов случайных процессов, который характерен для исходных данных.

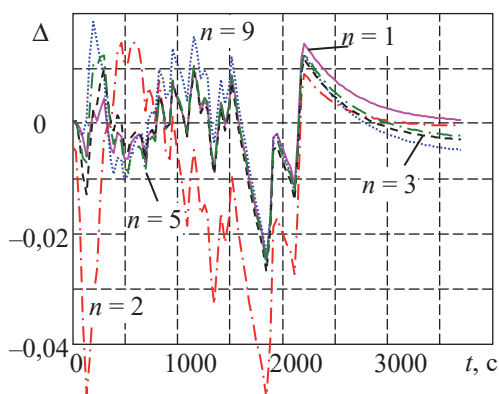


Рис. 14. Погрешность аппроксимации опыта 16 для влажности при разных значениях  $n$  в формуле (5)

Графики скомпонованы по тому же принципу, что и табл. 2–5.

В табл. 6–8 представлены динамические параметры для шаблона (3) для опытов, которые расставлены в последовательности увеличения амплитуды воздействия сигнала на входе канала идентификации. Выбор опытов из полного спектра обусловлен наилучшими условиями проведения эксперимента. Значения параметров в таблицах даны в секундах.

Таблица 6  
Динамические параметры модели для датчиков температуры

Номер	С металлической монтажной частью			ФТК+		
	Параметры модели					
	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$T_1$	$T_2$	$\tau$
При увеличении частоты						
13	275,0	173,4	48,04	481,0	80,64	8,502
17	354,4	117,1	41,47	512,9	37,25	32,78
15	252,7	156,2	123,1	389,5	119,9	64,17
При уменьшении частоты						
14	251,6	399,5	38,29	607,3	144,5	9,340
18	233,7	419,3	39,48	620,0	126,4	9,340
16	203,9	449,7	59,70	572,3	183,3	5,837

Таблица 7  
Динамические параметры модели для датчика влажности

Номер	Параметры модели		
	$T_1$	$T_2$	$\tau$
При увеличении частоты			
13	300,9	225,2	73,38
17	126,5	403,7	75,31
15	315,3	161,6	141,87
При уменьшении частоты			
14	191,4	410,7	95,24
18	196,5	425,5	45,60
16	110,1	471,8	111,1

Для оценки влияния показателя  $n$  шаблона формулы (5) в табл. 9–11 представлены значения полученных динамических параметров передаточных функций. Значения параметров в таблицах даны в секундах. Здесь прослеживаются определенные последовательности.

Таблица 8  
Запаздывание по результатам идентификации для шаблона формулы (5)

Номер	$n$				
	1	2	3	5	9
15/1	123,1	64,21	41,33	31,54	25,34
15/2	64,17	37,92	27,56	5,837	116,2
15/влажн.	141,9	135,2	53,30	76,05	53,96
16/1	59,70	37,19	5,837	23,35	5,837
16/2	5,837	5,837	5,837	53,33	47,79
16/влажн.	111,1	51,42	39,61	23,35	23,91
17/1	41,47	43,27	10,31	58,44	45,94
17/2	32,78	12,02	11,19	29,70	36,01
17/влажн.	75,31	38,92	55,03	18,29	114,4
18/1	39,48	24,04	23,35	23,35	9,139
18/2	9,340	5,837	5,837	55,75	24,35
18/влажн.	45,60	22,18	57,88	21,40	22,51

Таблица 9  
Большая постоянная времени при идентификации для шаблона формулы (5)

Номер	$n$				
	1	2	3	5	9
15/1	252,7	252,9	159,6	308,2	316,8
15/2	389,5	257,4	414,3	417,2	428,9
15/влажн.	315,3	237,9	181,8	372,2	369,3
16/1	449,7	331,3	225,2	521,5	528,0
16/2	572,3	360,9	232,5	672,8	664,1
16/влажн.	471,8	310,2	479,8	484,7	505,7
17/1	354,4	381,1	376,9	386,6	398,6
17/2	512,9	509,9	512,0	521,5	521,5
17/влажн.	403,7	273,1	441,3	441,3	456,2
18/1	419,3	331,3	505,7	529,1	530,2
18/2	619,9	347,7	223,3	669,7	664,1
18/влажн.	425,5	318,4	505,7	511,0	509,9

Таблица 10  
**Меньшая постоянная времени  
 при идентификации для шаблона формулы (5)**

Номер	<i>n</i>				
	1	2	3	5	9
15/1	156,2	105,8	0,0016	40,27	22,36
15/2	119,9	0,0779	46,14	31,69	4,513
15/влажн.	161,6	0,0423	0,0521	36,35	22,91
16/1	203,9	1,216	0,0001	37,24	22,13
16/2	183,3	0,0001	0,0001	14,20	8,7650
16/влажн.	110,1	2,343	59,35	38,05	19,99
17/1	117,1	46,14	43,35	15,42	8,855
17/2	37,25	29,82	19,05	6,349	3,172
17/влажн.	126,5	4,056	40,84	31,34	5,849
18/1	233,7	1,061	60,60	33,48	19,64
18/2	126,4	0,0001	0,0001	9,178	8,765
18/влажн.	196,5	1,531	41,85	31,50	17,67

**Обсуждение.** 1. Для выбора подхода к настройке системы управления объектами с нелинейной динамикой следует производить оценку возможных изменений параметров. Табл. 2–5 показывают, что минимальная ошибка аппроксимации соответствует шаблону, который представляет собой аперриодическое звено второго порядка с запаздыванием и соответствует формуле (3). Вариант шаблона (4) практически эквивалентен шаблону (3) и поэтому в некоторых случаях дает меньшую интегральную ошибку, однако отличия между данными шаблонами незначительны.

Изменение параметров *n* в шаблоне (5), в отличие от объекта исследования [11, 12], ухудшает качество. Однако интегральная ошибка имеет некоторую зависимость от этого показателя. Худшие характеристики очень часто возникают при значениях *n* = 2 и *n* = 3. Выбор в пользу шаблона в виде аперриодического звена первого порядка с запаздыванием (шаблон (1)), который часто используется в прикладных решениях, приводит к ухудшению качества аппроксимации.

Анализ графиков на рис. 4–14 показывает, что, кроме эффекта квантования (рис. 1, 2), основным источником накопления ошибки является начальный участок разгонной характеристики. В какой-то мере наличие значительных отклонений между исходными данными и результатами аппроксимации на начальном участке может служить простейшим критерием выбора шаблонов. При этом сравнение качества аппроксимации показывает, что для опыта 15, при котором идет процесс охлаждения, наблюдаются большие отклонения, чем для опыта 16 (идет процесс нагре-

вания). Наблюдается закономерность влияния параметра *n* на качество аппроксимации. Для опыта 16 наибольшее отклонение ошибки характерно для значения *n* = 3 или *n* = 2 (рис. 6, 10, 14). Для опыта 15 чаще наблюдается максимальное отклонение для *n* = 9. Нельзя не заметить, что для графиков опыта 15 отклонения ошибки аппроксимации характеризуются меньшими значениями для большинства исследованных шаблонов.

Несмотря на то, что разгонные характеристики снимались для одного объекта одновременно, отделить динамическую составляющую объекта управления от динамики датчика по результатам эксперимента невозможно. Несмотря на близость разгонных кривых, динамические характеристики различны. Для датчика температуры с металлической монтажной частью постоянные времени меньше, но запаздывание больше.

Как это было высказано в публикациях [13, 14], для температурных объектов наблюдается нелинейная динамика. При увеличении частоты отношение минимальной и максимальной постоянных времени выбранной модели имеют большую величину, чем при уменьшении. Особенно это характерно для датчика ФТК+. Однако зависимость носит нелинейный характер, что обусловлено, скорее всего, невозможностью обеспечить идентичность проведения экспериментов. Проведение экспериментов с одинаковым управляющим воздействием показало вариацию коэффициентов передаточных функций для всех шаблонов более 5% при сохранении отношения динамических параметров.

Увеличение показателя *n* для шаблона формулы (5) приводит к перераспределению временных параметров передаточных функций, в первую очередь, уменьшению запаздывания и малой величины постоянной в шаблоне (5).

**Закключение.** 1. Динамические характеристики каналов регулирования температуры обладают нелинейной динамикой.

2. Рациональный выбор вида передаточной функции динамики тепловых процессов является комплексной задачей.

3. В случае соизмеримости накопления энергии прибором измерения и непосредственно объектом управления рассмотрение этих составляющих по отдельности является грубым допущением. Замена одного средства измерения температуры на другое с отличными массогеометрическими характеристиками требует проведения повторной идентификации.

### Список литературы

1. Hangos K. M., Cameron I. T. Process modelling and model analysis. San Diego: Academic Press, 2001. 543 p.
2. Smedsrud H. Dynamic model and control of heat exchanger networks: 5th year project work. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering. 2007. 50 p.



3. Dorfman K. D., Prodromos D. Numerical Methods with Chemical Engineering Applications. Cambridge University Press, 2017. 511 p.
4. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. Upper Saddle River, N. J.: Prentice Hall PTR, 1998. 621 p.
5. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria // *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
6. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 497 p.
7. Олиферович Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Гармоническая идентификация технологических объектов в реальном времени // *Физико-математические науки и информатика*. № 6 (188): Труды БГТУ. 2016., С. 117–121.
8. Олиферович Н. М., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Алгоритмы гармонической идентификации для технологических объектов и их апробация на тепловом объекте // *Труды БГТУ*. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика, 2017. № 2 (200). С. 76–81.
9. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. Harmonic identification of technological objects in real time // *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream39242.2016.7485915.
10. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. The use of harmonic identification algorithms to air heat exchanger // *Electrical Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950326.
11. Marozava M., Hryniuk D. Experimental study of the variation dynamics for air heat exchanger // *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 297–301.
12. Оценка динамики изменения температуры по длине металлического стержня / Д. А. Гринюк [и др.] // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., 27 марта 2018 г. Вологда: ВоГУ, 2018. С. 85–88.
13. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки // *Труды БГТУ*. 2013. № 6 (162): Физико-математические науки и информатика, С. 95–98.
14. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой / Д. А. Гринюк [и др.] // *Труды БГТУ*. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2021. № 2 (248). С. 65–71.

## References

1. Hangos K. M., Cameron I. T. Process modelling and model analysis. San Diego, Academic Press Publ., 2001. 543 p.
2. Smedsrud H. Dynamic model and control of heat exchanger networks. 5th year project work. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering Publ., 2007. 50 p.
3. Dorfman K. D., Prodromos D. Numerical Methods with Chemical Engineering Applications. Cambridge University Press Publ., 2017. 511 p.
4. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design and Simulation. Upper Saddle River, N. J., Prentice Hall PTR Publ., 1998. 621 p.
5. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
6. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Publ., 2007. 497 p.
7. Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Harmonic identification of technological objects in real time. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 117–121 (In Russian).
8. Oliferovich N. M., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Harmonic identification algorithms for technological objects and their approbation on a thermal object. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2017, no. 2: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 76–81 (In Russian).
9. Oliferovich N., Hryniuk D., I. Orobei. Harmonic identification of technological objects in real time. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream39242.2016.7485915.

10. Olinerovich N., Hryniuk D., I. Orobei. The use of harmonic identification algorithms to air heat exchanger. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950326.

11. Marozava M., Hryniuk D. Experimental study of the variation dynamics for air heat exchanger. *Mokslas – Lietuvos ateitis. Science – Future of Lithuania*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 297–301.

12. Hryniuk D. A. Suhorukova I. G., Olinerovich N. M., Stablitskiy V. A. Assessment of the dynamics of temperature changes along the length of the metal rod. *Avtomatizatsiya i energosberezheniye mashinostroitel'nogo i metallurgicheskogo proizvodstv, tekhnologiya i nadezhnost' mashin, priborov i oborudovaniya: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Automation and energy saving of machine-building and metallurgical industries, technology and reliability of machines, instruments and equipment: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference], Vologda, 2018, pp. 85–88 (In Russian).

13. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Application of non-linear error conversion functions in the PID law. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 95–98 (In Russian).

14. Hryniuk D. A., Olinerovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O. Modeling and tuning control objects with nonlinear dynamics. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2021, no. 2 (248), pp. 65–71 (In Russian).

### Информация об авторах

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

**Олиферович Надежда Михайловна** – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Сухорукова Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina\_x@rambler.ru

**Оробей Игорь Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.

### Information about the authors

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

**Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna** – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_x@rambler.ru

**Orobei Igor Olegovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail:

*Поступила после доработки 15.06.2022*