

Полученные результаты расчетов при помощи компьютерного моделирования показали влияние температуры на геометрию внутренней и внешней обечаек. Деформации в основном наблюдались на концах внутренних обечаек. Причем, следует отметить, они носили волнообразный характер, который вызван несколькими причинами: жесткое соединение внутренних элементов (спиралевидные лопасти); подкладные листы на внешнем барабане выполнены в шахматном порядке, которые также жестко сжимают внутренний барабан и не дают равномерно расширяться и спокойно удлиняться под действием высоких температур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полный марочник сталей и сплавов. – URL: <https://vse-stali.ru/> (дата обращения 10.05.2022).

2. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А., и др. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.

УДК 004.032

**Гринюк Д.А., Олиферович Н.М.,  
Оробей И.О., Михновец А.С.**

(Белорусский государственный технологический университет)

#### **ВЛИЯНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА НА ДИНАМИКУ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ**

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 регулирования в разомкнутом или замкнутом состоянии [1–4]. При структурном анализе очень важным является вопрос всесторонней проверки системы управления путем математического моделирования. Классическим подходом к этому является использование для моделирования декомпозиции системы на составляющие контура стабилизации: объект, датчик, исполнительное устройство, регулирующий орган и т.д., где каждая из компонент рассматривается как независимое динамическое звено. Для оценки объективности данного были проведен активный эксперимент.

Объектом исследования является воздушный теплообменник с двумя средствами измерения: термометр сопротивления общего применения и каналный датчик температуры ФТК+ фирмы Thermokon Sensortechnik (Германия). Датчики расположены в одной точке воздуховода. Управляющим воздействием выступает скорость движения подогретого воздуха, которая изменяется за счет регулирования частоты оборотов нагнетающего вентилятора. Динамические характеристики снимались в области небольших отклонений около некоторого стационарного значения, но достаточных для того, чтобы обеспечить чувствительность измерительных преобразователей.

Для снятия характеристик была настроена связь между контроллером, к которому подключены датчики и исполнительные механизмы, и MatLAB через OPC-server [4]. Поиск коэффициентов передаточных функций проводился путем минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) для заданных шаблонов:

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

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

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

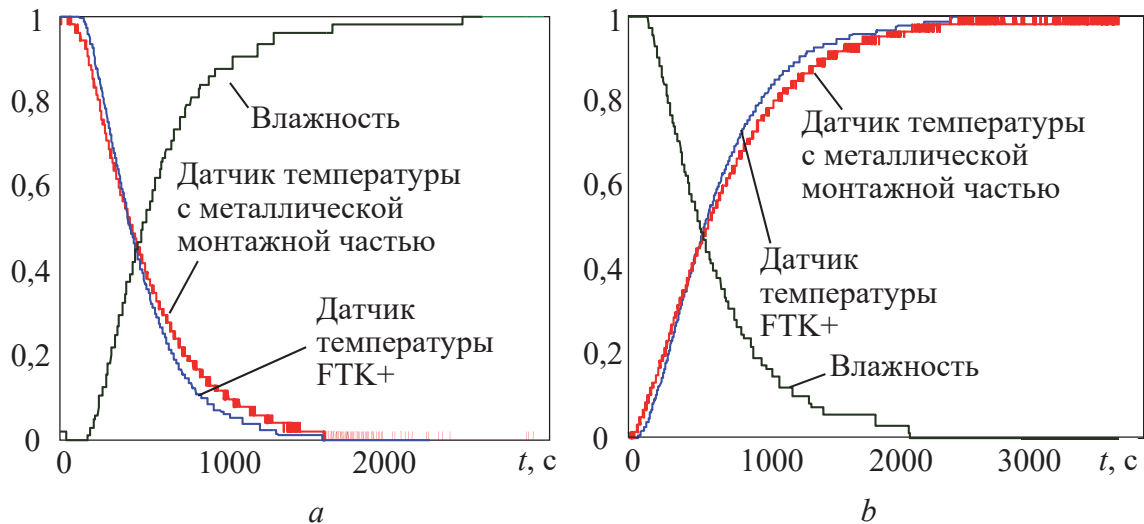
$$\frac{1 - b \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; \quad (4)$$

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

где  $k$ ,  $\tau$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  – параметры настройки при минимизации СКО.

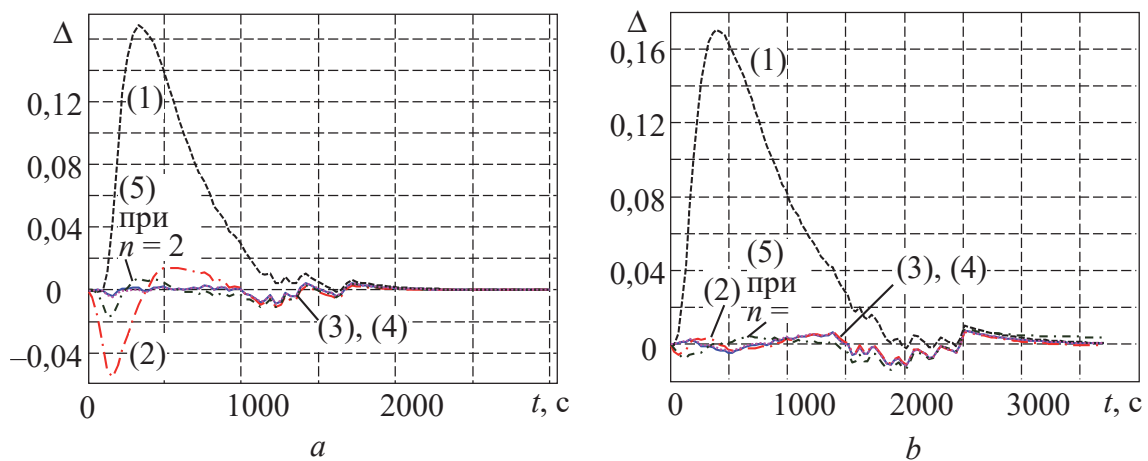
Поскольку объект управления имеет отрицательный коэффициент усиления, то при увеличении частоты разгонная кривая и результаты аппроксимации имели вид как на рисунке 1.

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, постоянство же влагосодержания при уменьшении температуры приводит к повышению влажности.



**Рисунок 1 – Разгонные характеристики опыта 15 (a) и 16 (b) при увеличении управляющего воздействия**

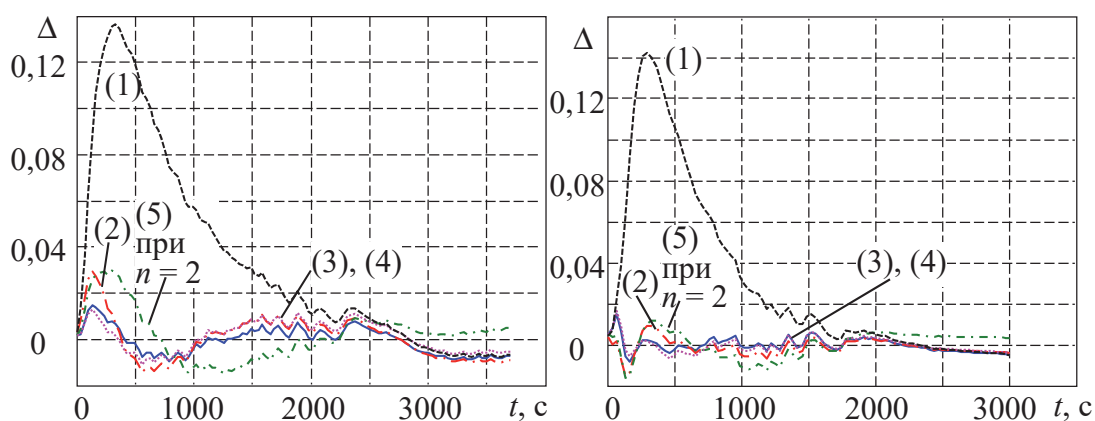
Для анализа качества аппроксимации приведены зависимости ошибки между экспериментальными данными и результатами аппроксимации для опытов 15 и 16 (рисунки 2–4). Опыты характеризуются максимальным воздействием на объект исследования и минимальным случайным воздействием при проведении экспериментов. Графики на рисунках 2–4 построены после проведения сглаживания по методике, представленной в литературе [5].



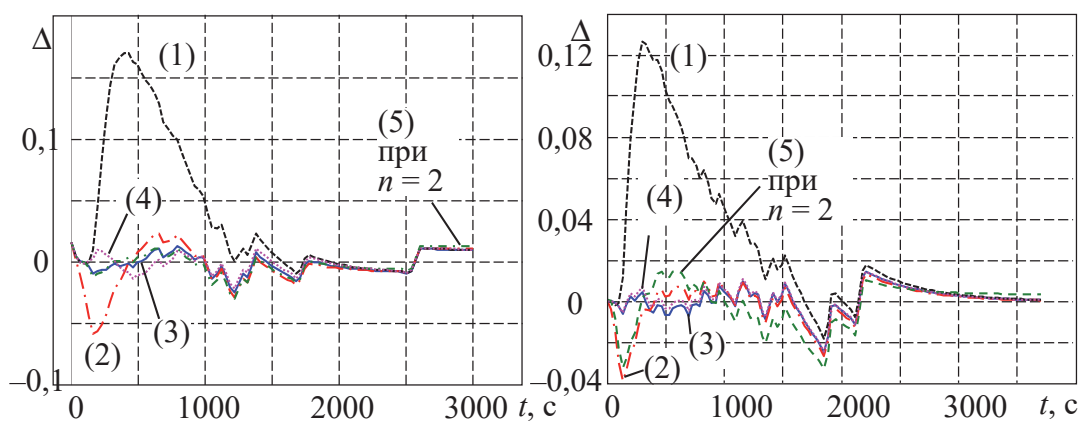
**Рисунок 2 – Погрешность аппроксимации опыта 15 (a) и 16 (b) для датчика 1 при разных шаблонах**

При настройке системы управления объектами с нелинейной динамикой проверять систему при различных возможных вариациях динамических параметров.

Для тепловых объектов характерно не только наличие нелинейностей, несимметричность параметров динамики, но вариации оптимальных шаблонов аппроксимации. При наших экспериментах оптимальным шаблоном оказалось аperiodическое звено второго порядка с запаздыванием (3). Увеличения порядка передаточной функции не по шаблону (5) не способствовало повышению качества идентификации в отличие от других объектов [5]. Худшее качество аппроксимации наблюдалось при значении  $n = 2$  и  $n = 3$ . Самый популярный шаблон аperiodическое звено первого порядка с запаздыванием (1) давал плохое качество.



**Рисунок 3 – Погрешность аппроксимации опыта 15 (a) и 16 (b) для датчика 2 при разных шаблонах**



**Рисунок 4 – Погрешность аппроксимации опыта 15 (a) и 16 (b) для влажности при разных шаблонах**

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, что обусловлено большему проявлению распределенности для датчика с большой долей металла в конструкции. 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).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mikles J., Fikar M. Process Modelling, Identification, and Control. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2007. 497 p.

2. Олиферович Н. М. Гринюк Д. А., Оробей И. О. Алгоритмы гармонической идентификации для технологических объектов и их апробация на тепловом объекте // Труды БГТУ. 2017. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика, № 2 (200). С. 76–81.

3. Oliferovich N., Hryniuk D., Orobei I. The use of harmonic identification algorithms to air heat exchanger // Electrical Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference, 2017, p. 1–5.

4. Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О. Моделирование и настройка систем с нелинейной динамикой // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информ. 2021. № 2, С. 65–71.

5. Marozava M., Hryniuk D. Experimental study of the variation dynamic's for air heat exchanger // Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania. 2017. Vol. 9, no. 3. P. 297–301.

УДК 621.39

**Гринюк Д.А., Олиферович Н.М.,  
Сухорукова И.Г., Карпук П.О.**

(Белорусский государственный технологический университет)

#### **ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ КВАНТОВАНИЯ НА ПРОЦЕСС РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Современные системы управления массово строятся на базе программируемых логических контроллеров в цифровом виде. Алгоритмы аналоговой обработки, к которой относится ПИД, реализуются путем