

**Морева Светлана Леонидовна**

канд. техн. наук, доцент

**Ляшенко Александр Леонидович**

канд. техн. наук, доцент

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения»  
г. Санкт-Петербург

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ»**

***Аннотация:** в статье рассматривается необходимость разработки специального программного обеспечения для реализации образовательных программ в дистанционном режиме. Представлено описание возможностей разрабатываемого программного комплекса, предназначенного для проведения лабораторных работ. Подробно рассмотрены основные пользовательские формы и характеристики данного комплекса. Разработанный программный продукт позволяет детально рассмотреть основные вопросы теории систем с распределенными параметрами.*

***Ключевые слова:** программный комплекс, теория систем с распределенными параметрами, лабораторные занятия, объект с распределенными параметрами, частотный анализ, переходная характеристика, критерий устойчивости, анализ, синтез.*

### ***Введение***

Изучение таких дисциплин как теория автоматического управления, моделирование систем управления, локальные системы управления в современном их развитии становится затруднительным без применения вычислительной техники и специализированного программного обеспечения. Это особенно становится актуальным при изучении специальных глав теории автоматического управления, к которым можно отнести анализ и синтез систем с распределен-

ными параметрами. Исследования систем с распределенными параметрами (СРП) получили настолько широкое развитие, что произошло выделение их в отдельную теорию. С помощью теории СРП решается огромное количество прикладных задач, и их решение было бы невозможным без специального программного обеспечения.

Однако в настоящее время, в период сложной эпидемиологической обстановки, в целях снижения рисков распространения новой коронавирусной инфекции в некоторых образовательных организациях высшего образования обеспечивается реализация образовательных программ с применением исключительно электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

В связи с этим на кафедре управления в технических системах ГУАП разрабатывается программный комплекс, предназначенный для проведения лабораторных работ в дистанционном формате.

#### *Постановка задачи*

В настоящее время для исследования процессов в системах с распределёнными параметрами разработан ряд программных продуктов, как коммерческого использования, так и некоммерческого. В [2] подробно рассмотрены пакеты прикладных программ для анализа систем с распределенными параметрами.

Коммерческие программы. FEMLAB является комплексным программным продуктом, разработанным шведской фирмой COMSOL. Первоначальные версии FEMLAB разрабатывались в виде пакета PDE Toolbox для известной системы MATLAB фирмы MathWorks. С конца 2003г. пакет FEMLAB стал самостоятельным продуктом фирмы COMSOL и с 2005г. выпускается под новым названием «COMSOL Multiphysics». FEMLAB (COMSOL Multiphysics) поддерживает процедуры моделирования статических и динамических задач для объектов с пространственно-распределенными параметрами для самых различных научных и технических приложений.

ANSYS является комплексным программным пакетом, который распространяется американской фирмой с таким же названием ANSYS Inc. Пакет

предназначен для моделирования инженерно-физических задач, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными, в широком спектре прикладных дисциплин (механика, теплофизика, динамика жидкостей и газов, акустика и т. д.) с помощью большого комплекса готовых к использованию блоков моделирования.

Кроме коммерческих пакетов для моделирования систем с распределенными параметрами, создано несколько некоммерческих разработок. Эти разработки относятся к так называемому свободному программному обеспечению.

FreeFem++ представляет собой программный пакет для численного решения двумерных (2D) уравнений с частными производными второго порядка и трехмерных (3D) уравнений в случае осевой симметрии задачи. Разработчиком пакета является Лаборатория Дж. Лиона Парижского университета им. Пьера и Марии Кюри.

GetFem++ является пакетом со свободным доступом, удовлетворяющим ограничениям. Пакет представляет собой библиотеку на языке C++ для решения методом конечных элементов различных уравнений с частными производными и смежных задач.

Коммерческие программы отличаются высокой стоимостью, некоммерческие в основном не являются универсальными. В связи с этим была предпринята попытка разработки собственного программного обеспечения.

#### *Разработка программного комплекса*

В основу математических моделей, используемых в разрабатываемом комплексе, были положены уравнения теплопроводности, записанные с помощью дифференциальных уравнений с частными производными второго порядка [3].

Работу программы рассмотрим на примере объекта цилиндрической формы (трубы), внутри которого течёт жидкий теплоноситель.

Для исследования тепловых полей составим математическую модель.

Запишем уравнение для теплоносителя.

$$\frac{\partial T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial t} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial x^2} \right] - \mathcal{G}(r, t) \frac{\partial T_1(r, \varphi, x, t)}{\partial x} \quad (1)$$

Запишем уравнение для стенки трубы.

$$\frac{\partial T_2(r, \varphi, x, t)}{\partial t} = a_2 \left[ \frac{\partial^2 T_2(r, \varphi, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, \varphi, x, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_2(r, \varphi, x, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_2(r, \varphi, x, t)}{\partial x^2} \right]. \quad (2)$$

Данные дифференциальные уравнения отражают общий характер процесса. Для получения математической модели объекта, соответствующей конкретной задаче, необходимо задание условий однозначности.

Полученная математическая модель решается с помощью явных схем численного решения (моделирование с помощью сеток).

В дискретном виде уравнение теплопроводности для теплоносителя может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} \Delta T_1[i, p, f] = & a_1 \Delta t \left[ \frac{T_1(i, p-1, f) - 2T_1(i, p, f) + T_1(i, p+1, f)}{\Delta r^2} + \right. \\ & + \frac{T_1(i, p, f) - T_1(i, p-1, f)}{R \Delta r} + \frac{T_1(i-1, p, f) - 2T_1(i, p, f) + T_1(i+1, p, f)}{\Delta x^2} + \\ & \left. + \frac{T_1(i, p, f-1) - 2T_1(i, p, f) + T_1(i, p, f+1)}{R^2 \Delta \varphi^2} \right] - \\ & - \mathcal{G}(R, t) \frac{T_1(i, p, f) - T_1(i-1, p, f)}{\Delta x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для дальнейшего моделирования была разработана программа, в основу которой положена дискретная математическая модель распределенного объекта. Для разработки программного комплекса была выбрана среда объектно-ориентированного программирования C++ Builder [1].

На рис. 1 представлен интерфейс программы, позволяющий моделировать тепловые процессы. Форма содержит три вкладки: Исходные данные; Переходный процесс; ЛАЧХ и ФЧХ.

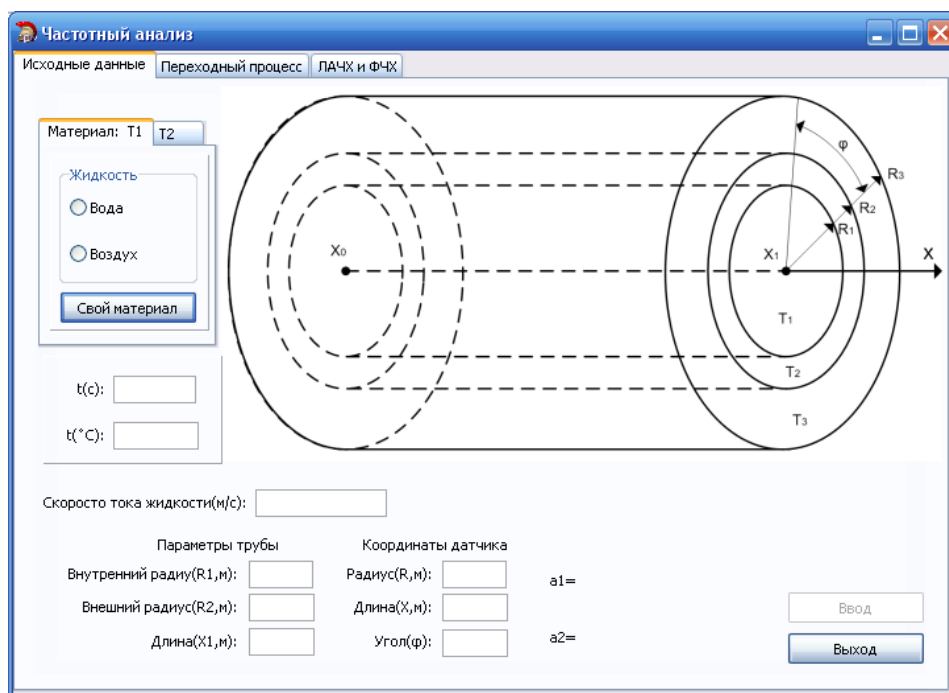


Рис. 1. Окно программы с отображением панели материалов

Первая вкладка «Исходные данные» позволяет ввести исходные данные. Она содержит панель материалов, панель температуры и времени, которая позволяет задать температуру входного воздействия и время наблюдения переходного процесса. Также содержит панель ввода данных параметров тела, координаты датчика и строку для ввода скорости тока теплоносителя.

Панель «Материал» позволяет выбрать материал или вещество исследуемого объекта. Вторая вкладка «Переходный процесс» отображает переходный процесс. Третья вкладка «Построение ЛАЧХ и ФЧХ» отображает логарифмическую амплитудно-частотную и фазовую частотную характеристики.

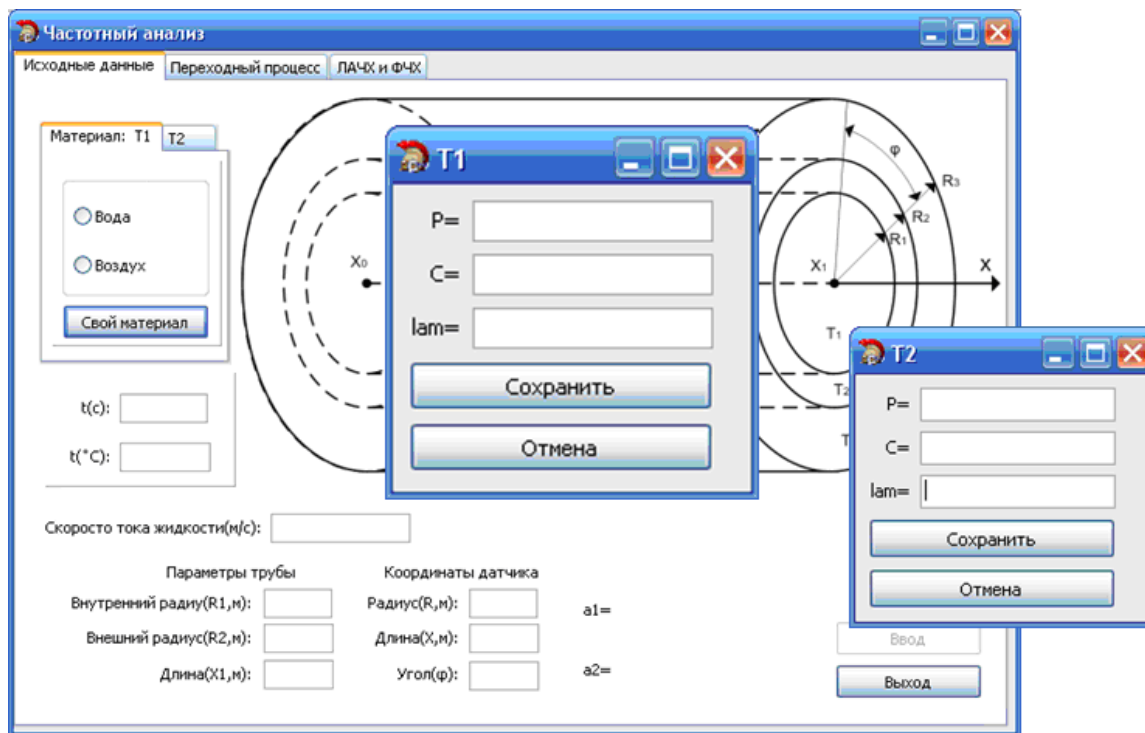


Рис. 2. Отображение панели материалов

Известно, что созданная в промышленности установка ВРТ (высокоточный регулятор температуры) позволила решить ряд задач управления температурой в заданной точке. Регулятор в этой установке состоит из усилительного дифференцирующего и интегрирующего звеньев. Из аналогичных распределенных звеньев сформирована структура распределенного высокоточного регулятора (РВР).

Передаточная функция РВР, записанная с использованием обобщенной координаты, может быть представлена в виде следующего соотношения [4]:

$$W(G, s) = E_1 \cdot \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} G \right] + E_4 \cdot \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} G \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \cdot \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} G \right] \cdot s. \quad (3)$$

На рис. 3 представлено окно программы, позволяющей производить расчет настроек распределенного высокоточного регулятора.

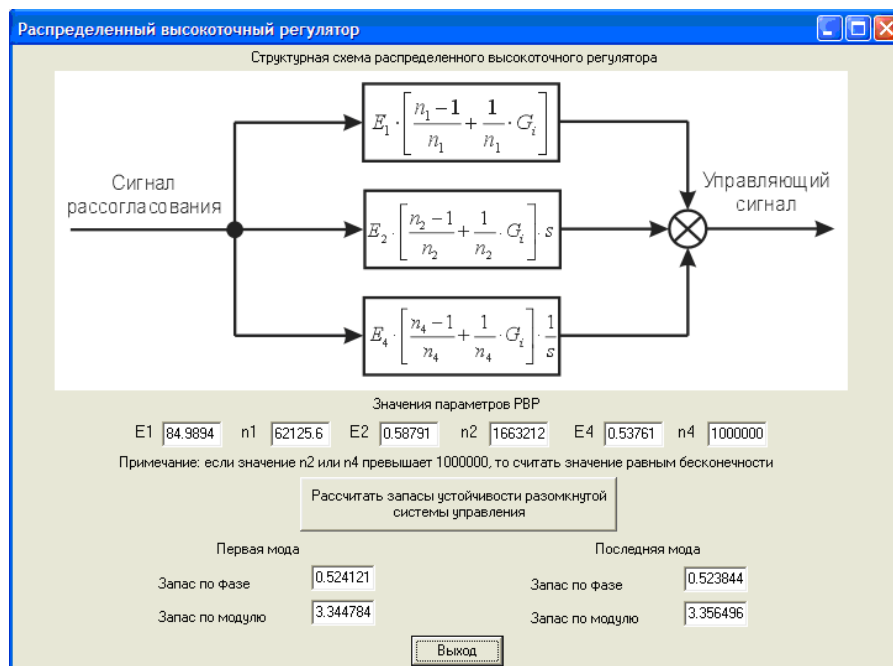


Рис. 3. Окно «Распределенный высокоточный регулятор»

### Заключение

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить анализ и синтез систем с распределенными параметрами, и может использоваться в учебном процессе для проведения лабораторных работ по дисциплине «Системы с распределенными параметрами» в дистанционном режиме.

### Список литературы

1. Архангельский А.Я. Программирование в C++ Builder / А.Я. Архангельский. – М.: Бином, 2003.
2. Дудников Е.Е. Универсальные программные пакеты для моделирования систем с распределенными параметрами / Е.Е. Дудников // Автоматика и телемеханика. – 2009. – №1. – С. 3–24.
3. Карслоу Г.С. Теплопроводность твердых тел./ Г.С. Карслоу, Д.К. Егер. – М.: Наука, 1964.
4. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами / И.М. Першин. – Пятигорск: РИА на КМВ, 2007. – 244 с.