

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Т.В. Скворцова¹, С.В. Рязанцев², Е.А. Хромых³

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных
технологий»

Приводится обзор разработанного программного обеспечения, предназначенного для автоматизации синтеза математической модели многомерного объекта управления, которое включает в себя получение топологии связей каналов и проведение параметрической идентификации.

Ключевые слова: цифровое регулирование, многомерный объект, синтез модели, программное обеспечение.

SOFTWARE DEVELOPMENT FOR MODELING A MULTIDIMENSIONAL CONTROL OBJECT

T.V. Skvortsova¹, S.V. Ryazantsev², E.A. Khromykh³

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

²Voronezh State Technical University

³Voronezh State University of Engineering Technologies

An overview of the developed software designed to automate the synthesis of a mathematical model of a multidimensional control object, which includes obtaining the topology of channel connections and carrying out parametric identification, is given.

Key words: digital regulation, multidimensional object, model synthesis, software.

Разработка системы управления технологическим процессом или производством включает ряд этапов, среди которых можно выделить следующие [1]:

формализованное описание объекта управления (ОУ) в виде математической модели и расчет элементов управляющей части. Формирование модели ОУ связано с получением экспериментальных данных входов и выходов, указанием структуры их взаимосвязи, выполнением структурной и параметрической идентификации каждого из каналов многосвязного ОУ. На основе полученной модели объекта осуществляется расчет и настройка компенсаторов и регуляторов системы.

Моделирование многосвязного ОУ является одним из ключевых моментов, в значительной степени определяющих характеристики разрабатываемой системы управления, точность и качество регулирования технологического процесса. При построении модели могут быть использованы детерминированный или экспериментально-статистический подходы. Многомерность ОУ, определяемая количеством входов и выходов, основных и перекрестных каналов, приводит к значительным сложностям и временным затратам при формировании математического описания и при последующем его численном решении.

Таким образом, автоматизация этапа формирования математической модели многосвязного ОУ путем разработки специализированного программного обеспечения (ПО), является актуальной задачей.

Модель объекта управления формируется путем математической обработки одним из статистических методов экспериментальных данных входов и выходов, полученных в ходе функционирования или специального исследования. На основе метода декомпозиции объект представлен в виде системы взаимосвязей, описывающих влияние входов на каждый из выходов. В качестве математического описания каждой из связей используются либо дифференциальные (1), либо конечно-разностные (2) уравнения произвольного порядка.

$$P_n^{u[\lambda][\theta]} \cdot \frac{d^n y^{u[\lambda][\theta]}(t)}{dt^n} + \dots + P_1^{u[\lambda][\theta]} \cdot \frac{dy^{u[\lambda][\theta]}(t)}{dt} + y^{u[\lambda][\theta]}(t) = Q_m^{u[\lambda][\theta]} \cdot \frac{d^m u^{u[\lambda]}(t - \tau^{u[\lambda][\theta]})}{dt^m} + \dots + Q_0^{u[\lambda][\theta]} \cdot u^{u[\lambda]}(t - \tau^{u[\lambda][\theta]})$$

(1)

где $P_n^{u[\lambda][\theta]}$, $Q_m^{u[\lambda][\theta]}$ - параметры дифференциальных уравнений; $y^{u[\lambda][\theta]}(t)$ - реакция θ -ого выхода на λ -й вход; $u^{u[\lambda]}$ - λ -ое входное воздействие; $\tau^{u[\lambda][\theta]}$ - запаздывание по соответствующему каналу; n - порядок дифференциального уравнения; $\lambda, \theta = \overline{1, r}$ - номера входов и выходов соответственно.

Соответствующее конечно-разностное уравнение имеет вид

$$y_k^{u[\lambda][\theta]} = \sum_{q=1}^{n^{u[\lambda][\theta]}} a_q^{u[\lambda][\theta]} \cdot y_{k-1}^{u[\lambda][\theta]} + \sum_{l=1}^{m^{u[\lambda][\theta]}+1} b_l^{u[\lambda][\theta]} u_{k-l-d}^{u[\lambda][\theta]}, \quad (2)$$

где $y_k^{u[\lambda][\theta]}$ - реакция θ -ого выхода на λ -й вход на k -м такте квантования; $u_{k-l-d}^{u[\lambda][\theta]}$ - λ -ое входное воздействие на такте $(k-l-d^{u[\lambda][\theta]})$; $a_q^{u[\lambda][\theta]}$, $b_l^{u[\lambda][\theta]}$ - коэффициенты конечно-разностного уравнения; $n^{u[\lambda][\theta]}$, $m^{u[\lambda][\theta]}$ - порядки левой и правой частей конечно-разностного уравнения; k - значение такта квантования.

С целью упрощения описания избавимся от параметров, определяющих номера входов и выходов. Тогда описание объекта управления представляется в виде совокупности дифференциальных и/или конечно-разностных уравнений.

$$P_n \cdot \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + P_1 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Q_m \cdot \frac{d^m u(t-\tau)}{dt^m} + \dots + Q_0 \cdot u(t-\tau),$$

$$y_k = \sum_{q=1}^n a_q \cdot y_{k-1} + \sum_{l=1}^{m+1} b_l \cdot u_{k-l-d}.$$

Переход между непрерывной (1) и дискретной (2) формами описания осуществляется по выведенным зависимостям. При заданных значениях коэффициентов дифференциального уравнения параметры конечно-разностной модели вычисляются по зависимостям вида:

$$a_i = (-1)^{(i-1)} \frac{\sum_{g=i}^n C_i^g \cdot P_g \cdot T_0^{(n-g)} - q \cdot T_0^n}{\sum_{s=1}^n C_0^s \cdot P_s \cdot T_0^{(n-s)}}, \quad b_l = (-1)^l \frac{\sum_{g=l}^m C_l^g \cdot Q_g \cdot T_0^{(m-g)}}{\sum_{g=1}^n C_0^g \cdot P_g \cdot T_0^{(n-g)} + x \cdot P_0},$$

$$x = \begin{cases} 0, & n \geq 1 \\ 1, & n = 0 \end{cases}.$$

где $q = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i = 2, n \end{cases}$, C_i^g - коэффициенты бинома Ньютона, рассчитываемые по выражению $C_i^g = \frac{g!}{i!(g-i)!}$, $g \geq i$; T_0 - такт квантования.

При известных параметрах конечно-разностного выражения коэффициенты дифференциального уравнения определяются по зависимостям вида (обратная задача):

$$Q = (A^Q)^{-1} \cdot B^Q,$$

$$P = (A^P)^{-1} \cdot B^P,$$

где P , Q - векторы коэффициентов соответствующего дифференциального уравнения;

$$A_{(g,l)}^Q = \begin{cases} (-1)^l \cdot \sum_{g=l}^m (C_l^g \cdot T_0^{(m-g)}) \cdot T_0^{(n-m)}, & g \geq l \\ 0, & g < l \end{cases}, \quad B_l^Q = b_l \cdot \left(\sum_{g=l}^m C_0^g \cdot P_g \cdot T_0^{(n-g)} + x \cdot P_0 \right);$$

$$A^Q = \begin{bmatrix} A_{(0,0)}^Q & A_{(1,0)}^Q & \cdots & A_{(m,0)}^Q \\ A_{(0,1)}^Q & A_{(1,1)}^Q & \cdots & A_{(m,1)}^Q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{(0,m)}^Q & A_{(1,m)}^Q & \cdots & A_{(m,m)}^Q \end{bmatrix}; \quad B^Q = \begin{bmatrix} B_0^Q \\ B_1^Q \\ \vdots \\ B_m^Q \end{bmatrix};$$

$$A_{(i,j)}^P = \begin{cases} a_i \cdot P_j \cdot T_0^{(n-j)}, & j < i \\ P_j \cdot T_0^{(n-j)} \cdot (a_i - (-1) \cdot C_i^j), & j \geq i, j = i, n \end{cases}; \quad B_i^P = q \cdot (-T_0^n); \quad q = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 0, & i = 2, n \end{cases}.$$

В рамках предлагаемого программного обеспечения предусмотрены варианты автоматизированного и ручного задания структуры взаимосвязей входов и выходов объекта.

Автоматизированный способ заключается в проверке для каждого канала объекта следующего условия:

$$\frac{\sum_{k=1}^N y_k^{\lambda \parallel \theta}}{N} > \xi,$$

где $y^{\lambda \parallel \theta} = [y_1^{\lambda \parallel \theta}, y_2^{\lambda \parallel \theta}, \dots, y_N^{\lambda \parallel \theta}]$ – экспериментальные значения временной характеристики канала λ -й вход – θ -й выход; N – количество экспериментальных значений по соответствующему каналу; ξ – некоторого граничной значение, задаваемое пользователем и определяющее несущественность той или иной взаимосвязи.

Если среднее значение больше пороговой величины ξ , связь считается существенной и учитывается в структурной схеме объекта. В противном случае связь отбрасывается, что упрощает модель объекта и последующие расчеты элементов управления. Такой подход уменьшает вычислительные сложности и время, затрачиваемое на синтез многосвязных систем регулирования.

В результате проведенного исследования автоматически формируется структурная схема рассматриваемого объекта с указанием определённого количества входов, выходов и наиболее значимых взаимосвязей между ними (рис. 1).

Ручной способ формирования структуры связей объекта предусматривает самостоятельный ввод пользователем всей необходимой информации с использованием специального интерфейса (рис. 1). После указания в соответствующих полях ввода требуемого количества входных и выходных сигналов разработчик с помощью графического интерфейса и «мыши» задаёт необходимые каналы, со-

единия между собой соответствующие входы и выходы. Если объект характеризуется наличием всех связей, существует возможность их автоматического формирования путём задания соответствующего параметра.

На следующем этапе формируется модель каждого из каналов объекта управления. В автоматическом режиме проводится идентификация конечно-разностными уравнениями нескольких порядков (с первого по пятый) для каждого из каналов.

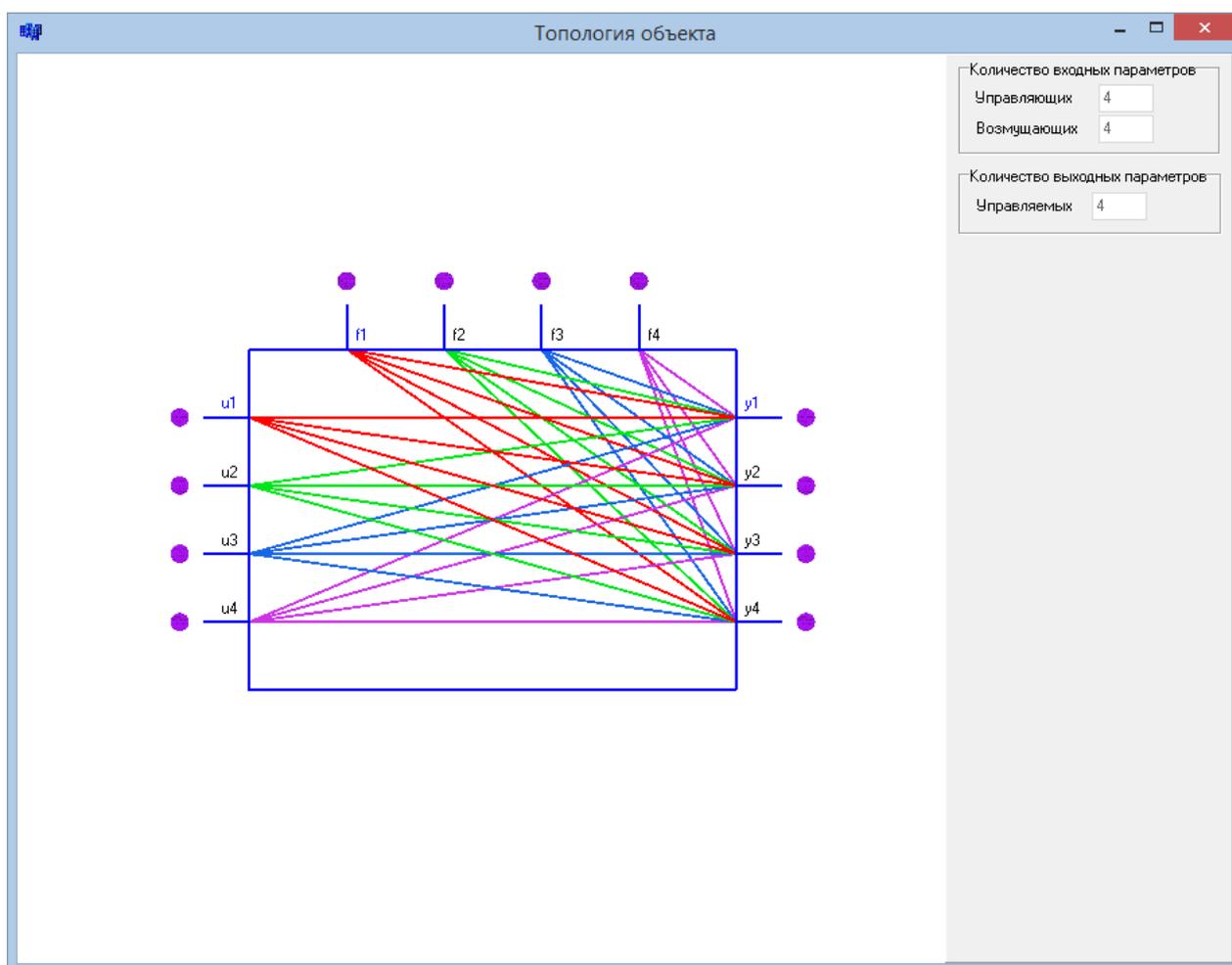


Рисунок 1 – Интерфейс модуля формирования структуры взаимосвязи каналов объекта управления

Результаты идентификации представляются графиками кривых разгона и численными значениями параметров моделей каналов (в конечно-разностной форме), а также табличными ($F_{\text{табл}}$) и расчетными ($F_{\text{расч}}$) значениями критерия Фишера, используемых для проверки адекватности. На основании значений критерия дается рекомендация о порядке конечно-разностного (дифференциального) уравнений, наиболее точно описывающего данную взаимосвязь (канал).

Используя полученные результаты можно осуществить расчет коэффициентов соответствующего дифференциального уравнения, т.е. осуществить переход к непрерывной модели канала объекта, используя пункт меню «пересчитать в параметры ДУ».

Предусмотрен ручной способ ввода численных значений параметров модели канала непосредственно пользователем с использованием соответствующего интерфейса. Выделяя «мышью» на структурной схеме объекта (рис. 1) необходимый канал, пользователь с помощью контекстного меню вызывает окно ввода коэффициентов модели (рис. 3), в котором указывается порядок и численные значения параметров (в непрерывной и дискретной формах).

В автоматизированном режиме на основе экспериментальных данных осуществляется параметрическая идентификация конечно-разностными уравнениями пятого порядков. После проверки адекватности по численным значениям критерия Фишера формируются рекомендации по выбору наилучшей модели (рис. 2). Если значения критерия Фишера отличаются несущественно, то в качестве модели рекомендуется принять конечно-разностное уравнение меньшего порядка.

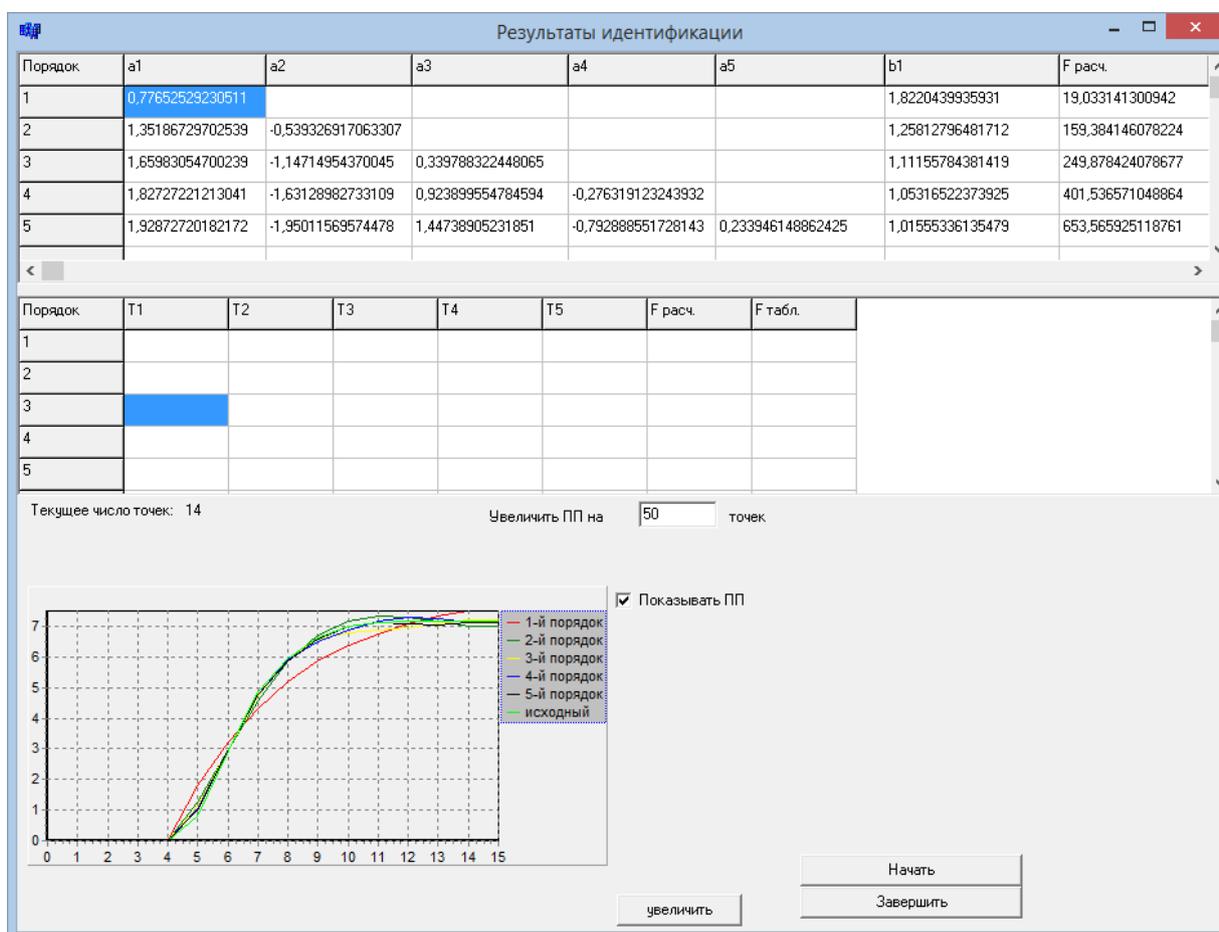


Рисунок 2 – Интерфейс модуля параметрической идентификации

Параметры связи "u1 -> y1"

Порядок

Такт квантования T0

Запаздывание мин

Тип канала
 Основной
 Перекрестный

Контроль кратности тактов квантования

	T (диф. ур.)	T (пост. время)	a (КРЧ)	b (КРЧ)
1	24,00		1,257226	0,444032
2	9,32		-0,301423	
k				

Комментарий

Рисунок 3 – Окно ввода параметров канала объекта управления

Разработанное ПО автоматизирует разработку математической модели многосвязного объекта, давая возможность выполнения ряда операций как вручную, так и автоматически. Переход между непрерывной и дискретной формами математического описания, путем расчета неизвестных численных значений коэффициентов на основе заданных, позволяет использовать различные методы и способы анализа свойств объекта и синтеза систем.

Список литературы

1. Рязанцев, С. В. Моделирование и исследование процесса пастеризации как многосвязного объекта управления. / С.В. Рязанцев, Е.А. Хромых, И.А. Козенко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2021. - № 11. - С. 31-42.

2. Полуэктов А.В., Макаренко Ф.В., Ягодкин А.С. Использование сторонних библиотек при написании программ для обработки статистических данных // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 33-41.

3. Новикова, Т. П. Математическая модель распределения трудовых ресурсов при технической эксплуатации и ремонте автотранспортных средств /

Т. П. Новикова, А. И. Новиков, С. В. Дорохин // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса : Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. интернет-конференции, Орел, 18–20 апреля 2016 года / под общ. ред. А.Н. Новикова. – Орел, 2016. – С. 133-139.

References

1. Ryazantsev, S. V. Modeling and investigation of the pasteurization process as a multi-connected control object. / S.V. Ryazantsev, E.A. Khromykh, I.A. Kozenko // Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2021. No. 11. pp. 31-42.

2. Poluektov A.V., Makarenko F.V., Yagodkin A.S. The use of third-party libraries when writing programs for processing statistical data // Modeling of systems and processes. - 2022. – Vol. 15, No. 2. – pp. 33-41.

3. Novikova, T. P. Mathematical model of the distribution of labor resources in the technical operation and repair of motor vehicles / T. P. Novikova, A. I. Novikov, S. V. Dorokhin // Topical issues of innovative development of the transport complex : Materials of the 5th International Scientific and Practical Internet Conference, Orel, April 18-20, 2016 / under the general edited by A.N. Novikov. – Orel: Oryol State University named after I.S. Turgenev, 2016. – pp. 133-139.