

## ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДЕ LABVIEW

А.П. Самарский

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: doc882@mail.ru

*Статья посвящена исследованию возможности использования среды программирования LabVIEW для разработки динамических моделей непрерывных технологических процессов, функционирующих в реальном масштабе времени. Реализованный в среде LabVIEW принцип «потока данных» позволяет при разработке динамической модели технологического объекта отказаться от непосредственного решения дифференциальных уравнений. Предлагается представить объект моделирования в виде совокупности элементарных динамических звеньев, основным из которых является интегрирующее звено. Приведены блок-диаграммы пропорционального, интегрирующего, инерционного звеньев и звена запаздывания. Применимость платформы LabVIEW для моделирования непрерывных технологических процессов продемонстрирована на примере модели простейшего теплообменника, гидродинамическая структура потоков которого соответствует модели идеального перемешивания. Приведены структурная схема и блок-диаграмма разработанной модели. С целью тестирования модели теплообменника был проведен численный эксперимент в статическом и динамическом режимах. Результаты тестирования модели подтвердили ее непротиворечивость, чувствительность и реалистичность, являющиеся признаками адекватности.*

**Ключевые слова:** технологический процесс, динамическое моделирование, элементарное звено, среда программирования LabVIEW

## DYNAMIC SIMULATION OF CONTINUOUS TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE LABVIEW ENVIRONMENT

A.P. Samarskiy

Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, Russia, 153000

E-mail: doc882@mail.ru

*The article is devoted to the study of the possibility of using the LabVIEW programming environment to develop dynamic models of continuous technological processes operating in real time. The principle of "data flow" implemented in the LabVIEW environment allows, when developing a dynamic model of a technological object, to abandon the direct solution of differential equations. It is proposed to present the modeling object as a set of elementary dynamic links, the main of which is the integrating link. Block diagrams of the proportional, integrating, inertial and delay links are given. The applicability of the LabVIEW platform for modeling continuous technological processes is demonstrated on the example of a model of the simplest heat exchanger, the hydrodynamic structure of the flows of which corresponds to the ideal mixing model. The structural diagram and block diagram of the developed model are given. In order to test the heat exchanger model, a numerical experiment was carried out in static and dynamic modes. The results of testing the model confirmed its consistency, sensitivity and realism, which are signs of adequacy.*

**Key words:** technological process, dynamic modeling, elementary link, LabVIEW programming environment

**Для цитирования:**

Самарский А.П. Динамическое моделирование непрерывных технологических процессов в среде LabVIEW. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2022. Т. LXVI. № 2. С. 8–15. DOI: 10.6060/rcj.2022662.2.

**For citation:**

Samarskiy A.P. Dynamic simulation of continuous technological processes in the LabVIEW environment. *Ros. Khim. Zh.* 2022. V. 66. N 2. P. 8–15. DOI: 10.6060/rcj.2022662.2.

## ВВЕДЕНИЕ

Термин «динамическое моделирование», довольно часто используемый в настоящее время разработчиками и пользователями автоматизированных систем управления технологическими процессами, подразумевает использование математической модели технологического объекта в непосредственных расчетах с целью генерации промежуточных и выходных переменных технологического объекта [1, 2]. Сферой применения методов динамического моделирования является оптимизация управления технологическими процессами при помощи прогнозирования выходных переменных объекта [3] в форме их прямого расчета с использованием модели, а также построение компьютерных симуляторов технологических процессов, функционирующих в реальном масштабе времени [4].

Подробный анализ применения методов динамического моделирования в задачах управления технологическими процессами дан в [1]. Рассмотрены различные аспекты использования моделей технологических объектов – в качестве:

пассивного носителя информации об объекте (задача аналитического конструирования регуляторов) [5];

элемента контура регулирования (разработка алгоритмов управления с «внутренней моделью») [6];

имитатора выходных переменных объекта (прогнозирование выходных переменных объекта [7, 8] и разработка компьютерных тренажеров реального времени [2]).

Средой разработки и функционирования динамической модели может быть один из универсальных [9] или специализированных программных пакетов, обеспечивающих «проигрывание» модели в реальном (или близком к реальному) масштабе времени.

Целью настоящей работы является оценка возможности построения динамических моделей непрерывных технологических процессов в среде одного из популярных пакетов LabVIEW [10], созданного фирмой «National Instruments» (США) для разработки приложений, выполняющих сбор и обработку информации в информационно-измерительных системах и АСУТП.

В зарубежной литературе описано достаточно много примеров использования платформы LabVIEW в системах автоматизации технологических процессов [11–17], однако все они направлены на создание систем сбора данных и управления конкретными технологическими объектами. Примеров использования LabVIEW для построения виртуальных моделей химико-технологических систем ни в зарубежной ни в русскоязычной литературе найти не удалось, хотя приложения, созданные на данной платформе, обладают всеми необходимыми качествами динамических моделей:

возможность создания динамических структур произвольной сложности;

интерактивность с использованием дружественного интерфейса;

работа в реальном масштабе времени;

возможность взаимодействия с типовыми программными средствами АСУТП.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗВЕНЬЕВ В СРЕДЕ LABVIEW

При анализе динамики объектов химической технологии широко применяется подход [18–21], при котором динамические свойства объекта аппроксимируются некоторой совокупностью элементарных динамических звеньев. Аналогичный подход изложен в [22], где модель объекта представлена в виде сигнального графа.

Применение такого подхода к построению моделей химико-технологических процессов на платформе LabVIEW позволит отказаться от непосредственного решения дифференциальных уравнений в силу реализованного в LabVIEW принципа «потока данных». Набор элементарных звеньев, позволяющий с удовлетворительной точностью описывать линейные объекты химической технологии любой сложности, включает всего 4 звена – пропорциональное, интегрирующее, инерционное (апериодическое 1-го порядка) и звено запаздывания.

В качестве основного элемента динамических структур предлагается использовать интегратор, реализующий метод прямоугольников [23] (рис.1):

$$\int_{t_1}^{t_2} X(t)dt = \sum_{i=1}^n X(t_i)\Delta t, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – фиксированный шаг интегрирования и

$n = \frac{t_2 - t_1}{\Delta t}$ . Ввиду малого шага, принятого в среде LabVIEW (0,001с), и значительной инерционности объектов химической технологии метод прямоугольников уступает по точности методу трапеций [23] совсем незначительно.

Блок-диаграмма интегратора приведена на рис. 2.

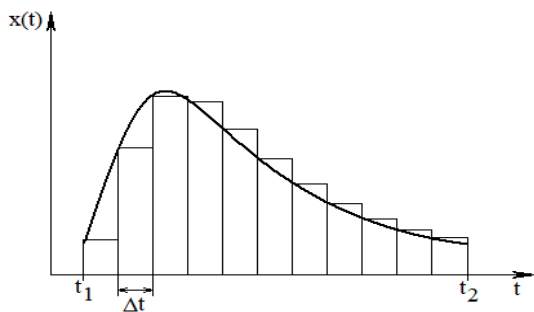


Рис. 1. Интегрирование входной величины методом прямоугольников

Основным параметром данного звена является время интегрирования  $T_{ин}$ .

Передаточные функции, структурные схемы и блок-диаграммы наиболее часто используемых элементарных звеньев приведены в таблице.

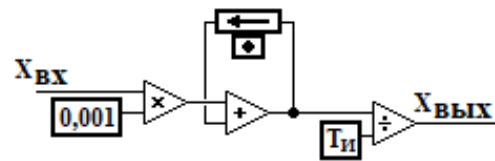


Рис. 2. Блок-диаграмма интегратора

Численное моделирование транспортного запаздывания в режиме реального времени является довольно сложной задачей [24], поэтому в данной работе предлагается аппроксимировать звено запаздывания каскадом из  $N$  инерционных звеньев с одинаковой постоянной времени  $T_n$  [19]. Время запаздывания при этом будет равно:

$$\tau_3 = N T_n. \quad (2)$$

Удовлетворительная погрешность аппроксимации достигается при  $N=5-7$ .

Таблица

Передаточные функции, структурные схемы и блок-диаграммы элементарных звеньев

Наименование звена	Передаточная функция	Структурная схема	Блок-диаграмма
Пропорциональное	$W(s)=K$		
Интегрирующее	$W(s)=\frac{1}{T_n s}$		
Инерционное	$W(s) = \frac{1}{T_n s + 1}$		
Запаздывания	$W(s) = e^{-s\tau_3}$		

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТЕЙШИХ  
НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ

Применимость платформы LabVIEW для моделирования непрерывных технологических процессов продемонстрируем на примере простейшего теплообменника. В качестве объекта моделирования рассмотрим проточный теплообменник, гидродинамическая структура потоков которого соответствует модели идеального перемешивания [25] (рис. 3).

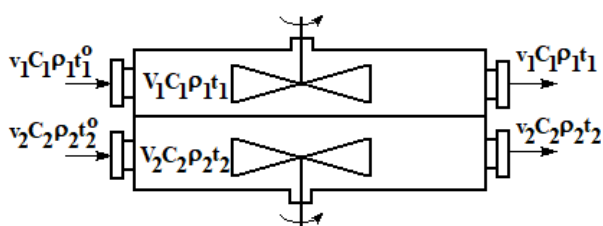


Рис. 3. Концептуальная модель теплообменника

$v$  – объемный расход теплоносителя;  $C$  – теплоемкость теплоносителя;  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $t^0$  – температура теплоносителя на входе в теплообменник;  $V$  – объем зоны идеального смешения;  $t$  – температура в зоне идеального смешения и на выходе теплообменника. Нижние индексы при переменных соответствуют условному номеру потока

Концептуальная модель теплообменника представляет собой два потока теплоносителя, проходящие через две зоны идеального перемешивания, разделенные стенкой.

Примем, что тепловая емкость стенки, разделяющей потоки, пренебрежимо мала. Тогда математическая модель теплообменника будет состоять из двух дифференциальных уравнений [25]:

$$V_1 \rho_1 C_1 \frac{dt_1}{d\tau} = v_1 \rho_1 C_1 (t_1^0 - t_1) - FK_T (t_1 - t_2) \quad (3)$$

$$V_2 \rho_2 C_2 \frac{dt_2}{d\tau} = v_2 \rho_2 C_2 (t_2^0 - t_2) + FK_T (t_1 - t_2) \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4)  $F$  – площадь поверхности теплообмена и  $K_T$  – коэффициент теплопередачи. Преобразуем уравнение (3) следующим образом. Раскроем скобки и перенесем все слагаемые с  $t_1$  в левую часть. Получим:

$$V_1 \rho_1 C_1 \frac{dt_1}{d\tau} + (v_1 \rho_1 C_1 + FK_T) t_1 = v_1 \rho_1 C_1 t_1^0 + FK_T t_2$$

Далее, разделим все члены уравнения на коэффициент при  $t_1$ :

$$\frac{V_1 \rho_1 C_1}{v_1 \rho_1 C_1 + FK_T} \frac{dt_1}{d\tau} + t_1 = \frac{v_1 \rho_1 C_1}{v_1 \rho_1 C_1 + FK_T} t_1^0 + \frac{FK_T}{v_1 \rho_1 C_1 + FK_T} t_2 \quad (5)$$

Аналогичные преобразования выполним для уравнения (4), получим:

$$\frac{V_2 \rho_2 C_2}{v_2 \rho_2 C_2 + FK_T} \frac{dt_2}{d\tau} + t_2 = \frac{v_2 \rho_2 C_2}{v_2 \rho_2 C_2 + FK_T} t_2^0 + \frac{FK_T}{v_2 \rho_2 C_2 + FK_T} t_1 \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) отвечают уравнениям динамики аperiодических звеньев 1-го порядка с

соответствующими коэффициентами:

$$T_1 \frac{dt_1}{d\tau} + t_1 = k_1 t_1^0 + k_2 t_2, \quad (7)$$

$$T_2 \frac{dt_2}{d\tau} + t_2 = k_3 t_2^0 + k_4 t_1. \quad (8)$$

В итоге структурная схема моделируемого объекта будет иметь вид:

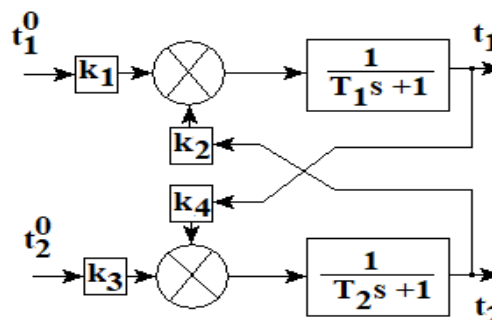


Рис. 4. Структурная схема теплообменника

Динамическая модель, реализующая структуру, приведенную на рис. 4, должна обрабатывать следующие функции:

задание констант, характеризующих свойства объекта ( $V_1, V_2, C_1, C_2, \rho_1, \rho_2, F, K_T$ );

задание входных переменных ( $t_1^0, t_2^0, v_1, v_2$ );

вычисление коэффициентов передачи  $k_1 - k_4$  и постоянных времени  $T_1, T_2$ ;

динамические преобразования входных температур в соответствии с алгоритмом функционирования инерционного звена (таблица);

визуализацию выходных переменных  $t_1, t_2$ .

Лицевая панель симулятора простейшего теплообменника (виртуального прибора, обрабатывающего перечисленные функции), приведена на рис. 5.

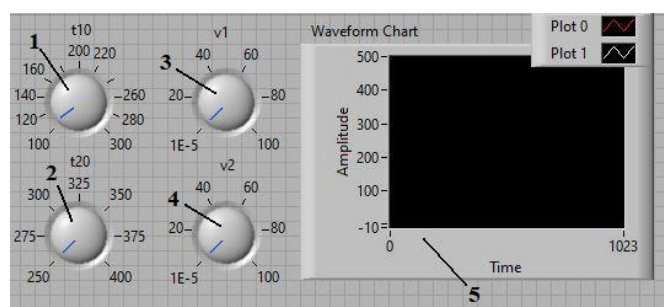


Рис. 5. Лицевая панель виртуального прибора  
1, 2 – элементы управления входными температурами теплоносителей; 3, 4 – элементы управления расходами теплоносителей; 5 – экран осциллограммы выходных температур

Блок-диаграмма симулятора, представленная на рис. 6, включает в себя 4 составляющих:

I – блок задания входных температур и расходов;

II – блок вычисления коэффициентов передачи  $k_1$ - $k_4$  и постоянных времени  $T_1, T_2$ ;

III – блок динамических преобразований (инерционные звенья);

IV – блок визуализации выходных температур.

Константы, характеризующие свойства объекта моделирования были заданы исходя из условий удобства оценки результатов моделирования – удовлетворительной чувствительности к изменениям входных переменных, широкого диапазона изменения выходных температур и достаточно малых значений постоянных времени.

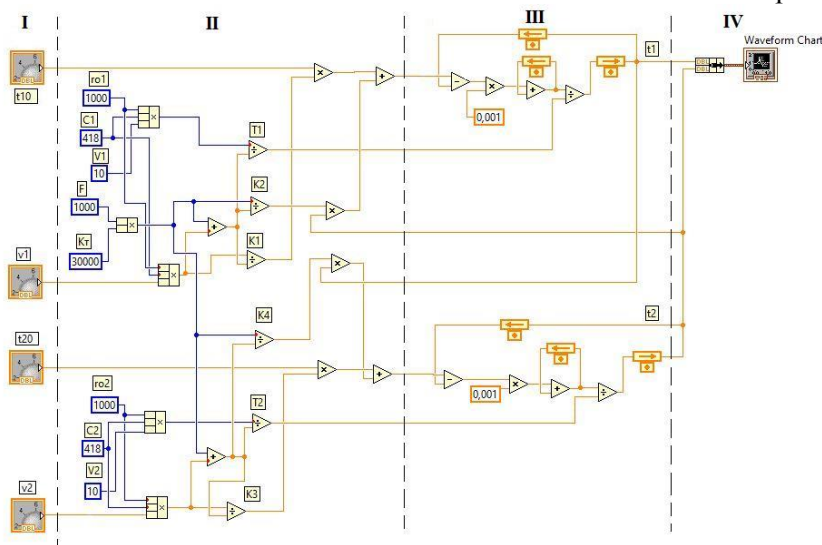


Рис. 6. Блок-диаграмма виртуального прибора

### ТЕСТИРОВАНИЕ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Вопросам тестирования и проверки адекватности виртуальных моделей, используемых в симуляторах технологических процессов и АСУТП, в настоящее время уделяется большое внимание [26]. Тестирование обычно заключается в задании (тем или иным способом) входных величин модели, обработке входных данных в соответствии с алгоритмом функционирования модели и оценке (качественной и количественной) результатов расчета. Тестирование виртуальных моделей производится в циклическом режиме и, желательно, в реальном масштабе времени [26].

Адекватность виртуальной модели, в современном понимании, трактуется как сочетание непротиворечивости, чувствительности и реалистичности [27]. Иными словами, результаты расчетов не должны противоречить физическим

принципам, положенным в основу модели, должны реагировать на малые изменения входных величин модели и соответствовать экспериментальным данным (если таковые имеются). Проверки выполняются в статическом, динамическом или интегрированном режиме [27].

В ходе тестирования модели теплообменника (рис. 4) был проведен численный эксперимент в статическом и динамическом режимах. Результаты тестирования в статических режимах, следующие:

при постоянстве во времени входных температур и расходов теплоносителей выходные температуры также постоянны во времени;

при нулевом расходе одного из теплоносителей выходные температуры равны температуре потока с ненулевым расходом;

при равенстве входных температур потоков выходные температуры не зависят от расходов теплоносителей.

Результаты тестирования модели в динамическом режиме (фотографии экрана 5 на рис. 5) представлены на рис. 7. Константы модели, определяющие коэффициенты передачи  $k_1$ - $k_4$  и постоянные времени  $T_1, T_2$  были заданы исходя из возможности расположения временных зависимостей выходных температур, построенных в реальном масштабе времени, на формате А4.

Как видно из рис. 7, временные зависимости выходных температур, являющиеся реакциями модели на изменения входных температур и расходов теплоносителей, вполне соответствуют логике изменения выходных температур реального теплообменника. При оценке реалистичности разрабатываемых динамических моделей [27] на первый план выходит соответствие реакций модели на входные воздействия реакциям объекта моделирования. При этом количественные значения свойств объекта моделирования и модели могут отличаться друг от друга.

Таким образом, целенаправленно изменяя значения констант, характеризующих свойства объекта моделирования ( $V_1, V_2, C_1, C_2, \rho_1, \rho_2, F, K_T$ ), можно добиться количественного соответствия динамических характеристик модели и объекта моделирования.



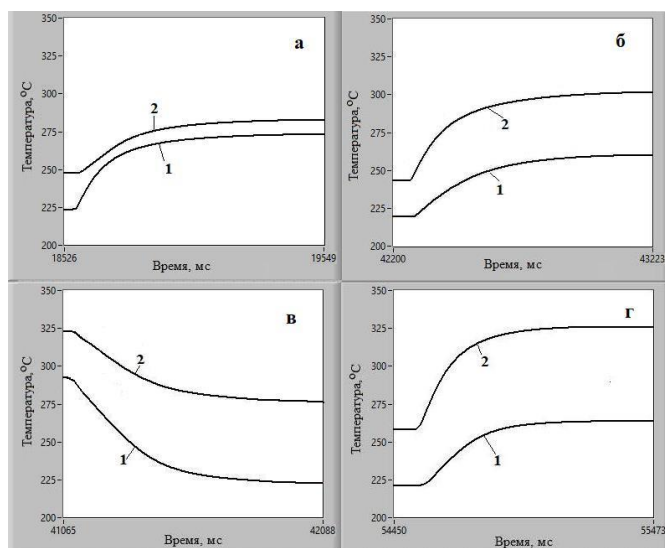


Рис. 7. Реакции динамической модели теплообменника а) на изменение температуры  $t_1^0$  160 – 260 °С; б) на изменение температуры  $t_2^0$  300 – 400 °С; в) на изменение расхода  $v_1$  30 – 100%; г) на изменение расхода  $v_2$  30 – 100%. 1 – выходная температура  $t_1$ ; 2 – выходная температура  $t_2$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дозорцев В.М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Часть 1. Задачи оптимального управления. Приборы и системы управления. 1996. № 7. С. 46–51.
2. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: СИНТЕГ. 2009. 365 с. ISBN 978-5-89638-107-5.
3. Перельман И. И. Обобщение модели Калмана в задачах идентификации. Автоматика и телемеханика. 1970. Вып. 9. С. 108–118.
4. Дозорцев В.М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Часть 2. Компьютерные тренажеры реального времени. Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 41–50.
5. Антонов В.Г., Шепелявий А.И. Оптимальное управление на конечном интервале времени для дискретных систем в задаче минимизации неоднородного квадратического функционала. Автоматика и телемеханика. 1973. № 4. С. 43–50.
6. Герасимов Д.Н., Парамонов А.В., Никифоров В.О. Алгоритм компенсации мультигармонических возмущений в линейных системах с произвольным запаздыванием: метод внутренней модели. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1023–1030. DOI: 10.17586.
7. Максимей И.В. Разработка имитационных моделей сложных технических систем / И.В. Максимей, В.С. Смородин, О.М. Демиденко; Гомель: ГТУ им. Ф. Скорины. 2014. 298 с. ISBN 978-985-439-951-5.
8. Балабушкин А.Н., Гулько Ф.Б. Прогнозирование экстремальных значений фазовых координат стохастических систем. Автоматика и телемеханика. 1981. № 1. С. 70–77.

#### ВЫВОДЫ

Динамическая модель непрерывного технологического процесса (теплообмена), разработанная в среде LabVIEW, отличается относительной простотой построения, интерактивностью, и демонстрирует все признаки адекватности. Данная модель может функционировать в реальном масштабе времени в течение неограниченного временного промежутка. Таким образом, платформа LabVIEW вполне может быть рекомендована для разработки виртуальных моделей непрерывных технологических процессов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

#### REFERENCES

1. Dozortsev V.M. Dynamic simulation in optimal control and automated training of technological processes operators. Part 1. Optimal control problems. Pribory i systemy upravleniya. 1996. N 6 P. 46–51. (in Russian).
2. Dozortsev V.M. Computer simulators for technological processes operators training. M.: SYNTEG. 2009. 365 p. ISBN 978-5-89638-107-5. (in Russian).
3. Perelman I.I. Generalization of the Kalman model in identification problems. Avtomatika i telemekhanika. 1970. N 9. P. 108–118. (in Russian).
4. Dozortsev V.M. Dynamic simulation in optimal control and automated training of technological processes operators. Part 2. Real time computer simulators. Pribory i systemy upravleniya. 1996. N 8. P. 41–50. (in Russian).
5. Antonov V.G., Shepelyaviy A.I. Optimal control over a finite time interval for discrete systems in the problem of minimizing an inhomogeneous quadratic functional. Avtomatika i telemekhanika. 1973. N 4. P. 43–50. (in Russian).
6. Gerasimov D.N., Paramonov A.V., Nikiforov V.O. Compensation algorithm for multiharmonic disturbances in linear systems with arbitrary delay: Internal model method. Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnyh tekhnologiy, mekhaniki i optiki. 2016. V. 16. N 6. P. 1023–1030. DOI: 10.17586. (in Russian).
7. Maksimey I.V. Development of simulation models of complex technical systems. I.V. Maksimey, V.S. Smorodin, O.M. Demidenko. Gomel: GSU im. F. Skorina. 2014. 298 p. ISBN 978-985-439-951-5. (in Russian).
8. Balabushkin A.N., Gulko F.B. Prediction of extreme values of stochastic systems phase coordinates. Avtomatika i telemekhanika, 1980. N 1. P. 70–77. (in Russian).
9. Hartman T.N., Sovetin F. chemical-technological systems. Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2012. V. XXVI. N 11 P. 117–120. (in Russian).

9. Гартман Т.Н., Советин Ф.С. Аналитический обзор современных пакетов моделирующих программ для компьютерного моделирования химико-технологических систем. Успехи в химии и химической технологии. 2012. Т. XXVI. № 11. С. 117–120.
10. Тревис Дж. LabVIEW для всех / Джеффри Тревис: Пер. с англ. Клущин Н. А. ~ М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект. 2005. 544 с. ISBN 5-94074-257-2.
11. Srinivas P., Durga Prasada Rao P., Vijaya Lakshmi K. Modelling and simulation of complex control systems using LabVIEW. International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM). 2012. V. 2. N 4. P. 1–19. DOI: 10.5121.
12. Abdulrahman A.A. Emhemed, Aleisawee Alsseid, Dirman Hanafi. Modelling and Controller Design for Temperature Control of Power Plant Heat Exchanger. Universal Journal of Control and Automation 2017. V. 5. N 3. P. 49–53.
13. Shakor Zaidoon, Fawzi Aymen. Application of LabVIEW and Genetic Algorithm for controlling of Plate Heat Exchanger. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering. 2018. N 4. P. 125–135.
14. Khsan Mahfudin, Adi Abimanyu, Syarip. Implementation of reactor kinetic model using labview program code on functional simulator of Kartini reactor operation and control. Jurnal Iptek Nuklir Ganendra. 2020. V. 23. N 2. P. 47–54.
15. Honey Devassy, Anagha S Menon, Minnu Merine Leegy. Adaptation of LABVIEW for a Chemical Process. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, National Conference on Digital Signal Processing, Information and Communication Engineering Govt. Polytechnic College, Kasaragod. 2016. V. 5. Special N 4. P. 30–32.
16. Ghanim M. Alwan. LabVIEW Control of Exothermic Semi-Batch Chemical Reactor [Электронный ресурс] [https://www.researchgate.net/publication/344774959\\_LabVIEW\\_Control\\_of\\_Exothermic\\_Semi-Batch\\_Chemical\\_Reactor](https://www.researchgate.net/publication/344774959_LabVIEW_Control_of_Exothermic_Semi-Batch_Chemical_Reactor).
17. Quintero María, Dominguez Gustavo, Davila-Rincon, Javier Andres. Use of LabVIEW to control systems in chemical engineering. Dyna. 2011. V. 78. P. 150–157. (in Russian).
18. Rotach V.Ya. Theory of automatic control (5th edition, revised and supplemented) М.: Izd-vo MPEI. 2008. 400 p. ISBN: 978-5-383-00326-8. (in Russian).
19. Gebel E. S. Theory of automation of technological processes of hazardous industries: textbook. E. S. Gebel, E. I. Pastukhova. Omsk: Publishing house of OmSTU. 2017. 94 p. ISBN 978-5-8149-2466-7. (in Russian).
20. Novikov S.I. Practical identification of dynamic characteristics of control objects of thermal power equipment: textbook. Novosibirsk: Publishing house of NGTU. 2004. 64 p. (in Russian).
21. Rutkovskiy A.L., Kovaleva M.A., Alikov A.Yu., Tedeeva N.V. Method for increasing the efficiency of calculating the dynamic characteristics of the control object. Vestnik VGU, seriya: sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii. 2017. № 2. С. 16–21.
22. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Анализ и синтез химико-технологических систем. Учебник для вузов. М.: Химия. 1991. 432 с. ISBN 5-7245-0366.
23. Бахвалов Н. С. Численные методы в задачах и упражнениях [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.С. Бахвалов. М.: ДМК Пресс. 2005. 544 с. ISBN 5-94074-257-2.
10. Travis J. LabVIEW for Everyone / Jeffrey Travis: Transl. from English. Klushin N.A. ~ М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект. 2005. 544 p. ISBN 5-94074-257-2.
11. Srinivas P., Durga Prasada Rao P., Vijaya Lakshmi K. Modelling and simulation of complex control systems using LabVIEW. International Journal of Control Theory and Computer Modelling (IJCTCM). 2012. V. 2. N 4. P. 1–19.
12. Abdulrahman A.A.Emhemed, Aleisawee Alsseid , Dirman Hanafi. Modelling and Controller Design for Temperature Control of Power Plant Heat Exchanger. Universal Journal of Control and Automation. 2017. V. 5. N 3. P. 49–53.
13. Shakor Zaidoon, Fawzi Aymen. Application of LabVIEW and Genetic Algorithm for controlling of Plate Heat Exchanger. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering. 2018. N 4. P. 125–135.
14. Khsan Mahfudin, Adi Abimanyu, Syarip. Implementation of reactor kinetic model using LabVIEW program code on functional simulator of Kartini reactor operation and control. Jurnal Iptek Nuklir Ganendra. 2020. V. 23. N 2. P. 47–54.
15. Honey Devassy, Anagha S Menon, Minnu Merine Leegy. Adaptation of LABVIEW for a Chemical Process. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, National Conference on Digital Signal Processing, Information and Communication Engineering Govt. Polytechnic College, Kasaragod. 2016. V. 5. Special N 4. P. 30–32.
16. Ghanim M. Alwan. LabVIEW Control of Exothermic Semi-Batch Chemical Reactor [Electronic resource] [https://www.researchgate.net/publication/344774959\\_LabVIEW\\_Control\\_of\\_Exothermic\\_Semi-Batch\\_Chemical\\_Reactor](https://www.researchgate.net/publication/344774959_LabVIEW_Control_of_Exothermic_Semi-Batch_Chemical_Reactor).
17. Quintero María, Dominguez Gustavo, Davila-Rincon, Javier Andres. Use of LabVIEW to control systems in chemical engineering. Dyna. 2011. V. 78. P. 150–157. (in Russian).
18. Rotach V.Ya. Theory of automatic control (5th edition, revised and supplemented) М.: Izd-vo MPEI. 2008. 400 p. ISBN: 978-5-383-00326-8. (in Russian).
19. Gebel E. S. Theory of automation of technological processes of hazardous industries: textbook. E. S. Gebel, E. I. Pastukhova. Omsk: Publishing house of OmSTU. 2017. 94 p. ISBN 978-5-8149-2466-7. (in Russian).
20. Novikov S.I. Practical identification of dynamic characteristics of control objects of thermal power equipment: textbook. Novosibirsk: Publishing house of NGTU. 2004. 64 p. (in Russian).
21. Rutkovsky A.L., Kovaleva M.A., Alikov A.Yu., Tedeev N.V. Method for increasing the efficiency of calculating the dynamic characteristics of the control object. Vestnik VGU, seriya: sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii. 2017. N 2. P. 16–21. (in Russian).
22. Kafarov V.V., Meshalkin V.P. Analysis and synthesis of chemical-technological systems. Textbook for high schools. М.: Khimiya. 1991. 432 p. ISBN 5-7245-0366. (in Russian).

- хвалов, А. В. Лапин, Е. В. Чижонков ; под ред. В. А. Садовниченко. 4-е изд. (эл.). М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2015. 195 с. ISBN 978-5-9963-2980-9.
24. Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ. 2012. 335 с. ISBN 978-5-7782-2162-8.
  25. Вейнский В.В. Математическое моделирование процессов теплообмена на основе идеализированных моделей. Теория и технология металлургического производства, 2010. № 1. С. 182–192. ISSN 2311-5378.
  26. Бракоренко А.С. Тестирование и обеспечение качества программно-технических комплексов на основе использования виртуальных технологических объектов. Приборы и методы измерений. 2014. № 2. С. 75–80.
  27. Мальков М.В., Олейник А.Г., Федоров А.Н. Моделирование технологических процессов: методы и опыт. Труды Кольского научного центра РАН. 2010. №3. С. 93–101.
  23. Bakhvalov N. S., A. V. Lapin, Chizhonkov E. V. Numerical methods in problems and exercises [Electronic resource]: textbook; ed. V. A. Sadovnichy. 4th ed. M. : BINOM. Knowledge Laboratory. 2015. 195 p. ISBN 978-5-9963-2980-9. (in Russian).
  24. Zhmud V. A. Modeling, research and optimization of closed systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, NSTU Publishing House. 2012. 335 p. ISBN 978-5-7782-2162-8. (in Russian).
  25. Veinskiy V.V. Mathematical modeling of heat transfer processes based on idealized models. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. 2010. N 1. P. 182–192. ISSN 2311-5378. (in Russian).
  26. Brakorenko A.S. Testing and quality assurance of software and hardware systems based on the use of virtual technological objects. Pribory i metody izmereniy. 2014. N 2. P. 75–80. (in Russian).
  27. Malkov M.V., Oleinik A.G., Fedorov A.N. Modeling of technological processes: methods and experience. Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2010. N 3. P. 93–101. (in Russian).

*Поступила в редакцию 26.05.2022  
Принята к опубликованию 07.06.2022*

*Received 26.05.2022  
Accepted 07.06.2022*