

# Моделирование динамики энергоблока Назаровской ГРЭС полиномами Вольтерра<sup>1</sup>

С.В. Солодуша,  
в. н. с., к. ф.-м. н., доц., solodusha@isem.irk.ru,  
ИСЭМ СО РАН, г. Иркутск

Работа посвящена численному моделированию нелинейной динамики температуры воды в пароводяном тракте энергоблока Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт с помощью аппарата интегро-степенных рядов Вольтерра. В качестве входного воздействия рассматривается изменение расхода воды. Иллюстрируются результаты применения стационарного и модифицированного квадратичных полиномов Вольтерра. Вычислительный эксперимент выполнен с помощью авторского программного комплекса «Динамика».

The paper address the numerical modeling of the nonlinear dynamics of water temperature in the steam-water path of the power unit of the Nazarovo power station with capacity of 135 MW using the Volterra polynomials. A change in water flow is considered as an input impact. The results of applying stationary and modified quadratic Volterra polynomials are showed. The computational experiment was performed using the author's software package "Dynamics".

## Введение

Один из известных подходов к математическому моделированию динамики нелинейных систем типа «вход-выход» основывается на применении аппарата интегро-степенных рядов Вольтерра. Данная статья продолжает исследования [1] по применению алгоритмов идентификации конечных отрезков ряда (полиномов) Вольтерра при  $N = 2, 3$  вида

$$y(\tau) = \sum_{m=1}^N \int_0^{\tau} \dots \int_0^{\tau} K_m(s_1, \dots, s_m) \prod_{i=1}^m x(\tau - s_i) ds_i, \quad \tau \in [0, T], \quad (1)$$

к моделированию объектов тепло- и электроэнергетики. В (1)  $x(\tau)$ ,  $y(\tau)$  - соответственно скалярные входной и выходной сигналы динамической системы,  $K_m(s_1, \dots, s_m)$  - ядра Вольтерра, симметричные по переменным  $s_1, \dots, s_m$ . Для данной работы представляет интерес применение разработанных методик и алгоритмов [1, 2] для моделирования динамики сложного теплоэнергетического объекта.

## Об основных результатах

В [1] верификация алгоритмов идентификации квадратичных и кубичных полиномов Вольтерра (1) выполнена на базе имитационной модели одиночного теплообменника [3]

$$\Delta i(\tau) = \frac{Q_0 \lambda_1 \lambda_2}{D_0 (\lambda_2 - \lambda_1)} \int_0^{\tau} \Delta D(\eta) \begin{pmatrix} e^{-\lambda_1 \int_{\eta}^{\tau} D(\zeta) d\zeta} & -e^{-\lambda_2 \int_{\eta}^{\tau} D(\zeta) d\zeta} \\ & \end{pmatrix} d\eta. \quad (2)$$

Здесь  $\tau$  - время (с);  $D$  - расход вещества (кг/с);  $Q$  - полная тепловая нагрузка (кВт);  $i$  - энтальпия (кДж/кг);  $\Delta$  - приращение, например,  $D(\tau) = D_0 + \Delta D(\tau)$ ;  $\lambda_{1,2}$  - некоторые константы; индексами «0» обозначены начальные параметры ( $D_0 = 0,16$  кг/с,  $Q_0 = 100$  кВт).

Анализ динамики одиночного теплообменника (2) и динамики сложных теплоэнергетических объектов, описанных в [4, 5], показал возможность методического применения (2) при формировании практических рекомендаций по реализации алгоритмов построения интегральных моделей на базе полиномов Вольтерра. Сравнение нормированной по времени  $\tilde{t} = \frac{\tau}{T}$  и масштабу динамики энтальпии данных объектов при возмущении расхода воды проиллюстрировано на рис. 1.

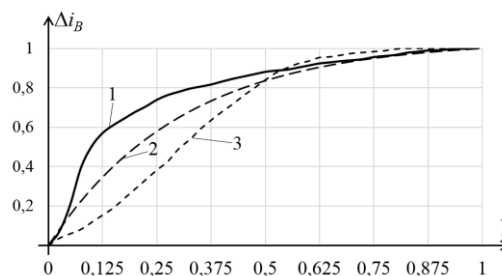


рис. 1 Нормированные графики энтальпии при безразмерном времени

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований СО РАН, проект №АААА-А17-117030310446-6.

Кривая 1 на рисунке соответствует изменению энтальпии  $\Delta i_B$  пара на выходе из прямооточного котла ТГМП-314П в режиме **70%** нагрузки от номинальной при возмущении расхода питательной воды [12, с. 35]. Кривая 2 получена по (2) при достаточно глубоком возмущении  $\Delta D$  (до **25%** от  $D_0$ ). Кривая 3 соответствует расчетам  $\Delta i_B$ , полученным при помощи модели с распределенными параметрами [13, с. 119] на выходе из экономайзера котельного агрегата при глубоком изменении расхода на входе теплоносителя. Расчеты показали совпадение результатов при  $\tilde{t} \in [0,9;1]$  с точностью  $\delta = 10^{-3}$ .

Таким образом, практические рекомендации по использованию аппарата рядов Вольтерра, полученные применительно к тестовой имитационной модели теплообменника (2), могут быть использованы при рассмотрении данного подхода к исследованию динамики сложных теплоэнергетических объектов.

Приведем результаты применения ПВК «Динамика» для моделирования динамики температуры воды на выходе из объемных теплообменников в энергоблоке Назаровской ГРЭС мощностью 135 МВт. Вычислительный эксперимент выполнен на основе данных, полученных с помощью ПВК «Р150», реализованного в ИСЭМ СО РАН В.Ф. Чистяковым и А.А. Логиновым под руководством Э.А. Таирова на основе модели Иркутской ТЭЦ-10 [6].

Схематичное изображение движения пароводяной смеси приведено на рис. 2, где приняты обозначения: Д - термический деаэратор, ПЭН - система питательных электронасосов, ППК - прямооточные паровые котлы, ЦВД - цилиндр высокого давления, ЦСД - цилиндр среднего давления, СВД - цилиндр низкого давления, БС - бойлерная система, К - конденсатор, КЭН - система конденсатных электронасосов, ПНД - подогреватели низкого давления, ПВД - подогреватели высокого давления.

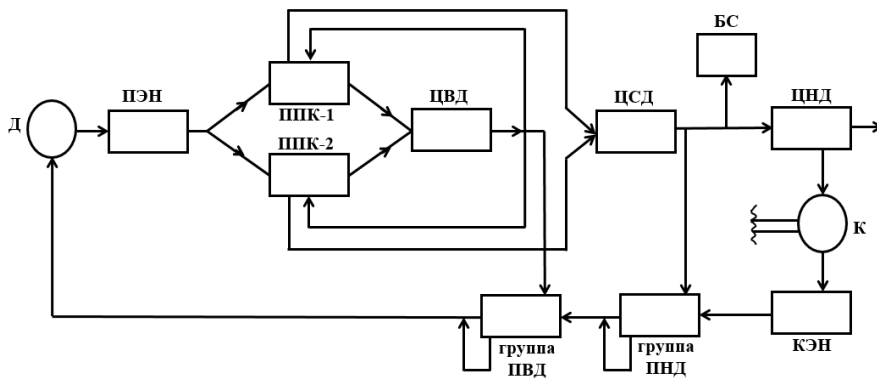


рис. 2 Упрощенная схема пароводяного тракта энергоблока

Рассмотрена динамика температуры воды  $\Delta t(\tau)$  (°C) на выходе из объемных теплообменников при изменении расхода воды  $\Delta D(\tau)$  (кг/с), проходящей через теплообменники с начальными значениями  $t_0 = 15,19$  °C,  $D_0 = 11562,2$  кг/с. Для  $N = 2$  выполнено построение стационарного и комбинированного полинома Вольтерра, учитывающего нестационарные свойства динамического объекта [7]. Проведены две серии тестовых испытаний  $\Delta D(\tau) = \alpha_{1,2}(e(\tau) - e(\tau - \omega))$ ,  $0 \leq \omega \leq \tau \leq T$ , где  $e(\tau)$  - функция Хевисайда,  $T = 90$  с,  $\alpha_1 = -\alpha_2 = \alpha = 25\%D_0$ . На рис. 3 иллюстрируются отклики  $\Delta t(\tau)$ , используемые для решения задачи идентификации ядер Вольтерра.

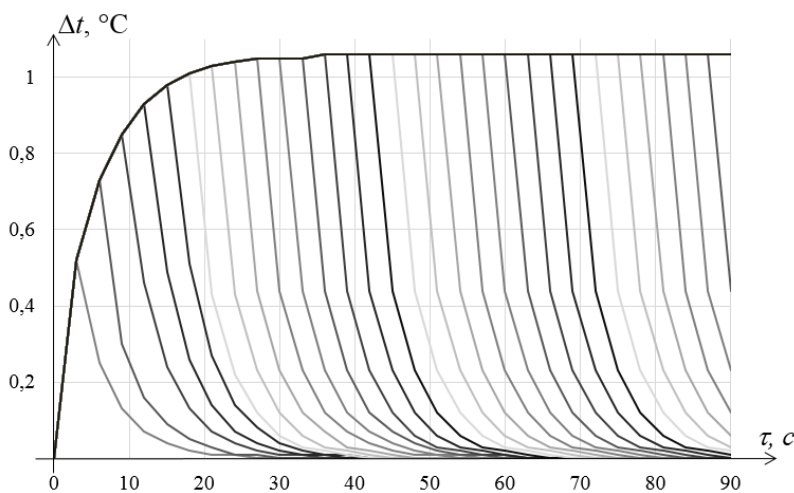


рис. 3 Отклики  $\Delta t(\tau)$  при возмущении  $\Delta D(\tau)$  с амплитудой (высотой)  $\alpha_2$

Рис. 4 иллюстрирует результаты тестирования точности интегральных моделей для входного воздействия  $\Delta D(\tau) = 20\%D_0(e(\tau) - 2e(\tau - \omega) + e(\tau - T))$ , где  $\omega = 27$  с.

Цифрой 1 здесь отмечен отклик имитационной модели, полученный с помощью ПВК «Р150». Цифрами 2, 3 отмечены отклики стационарной и комбинированной интегральных моделей, максимальная относительная погрешность которых составила  $0,290\%t_0$ ,  $0,263\%t_0$  соответственно.

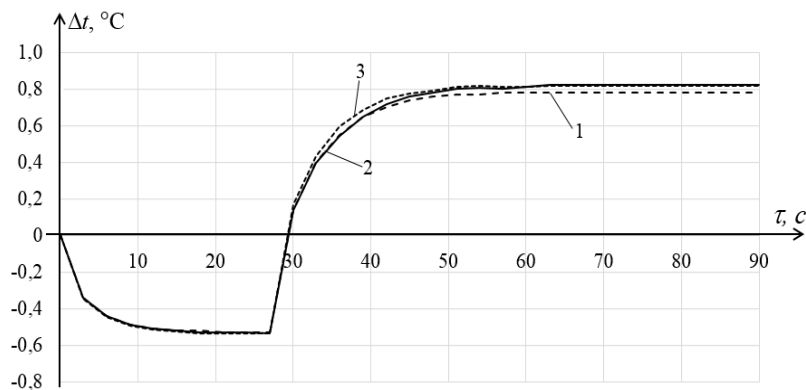


рис. 4 Результат вычислительного эксперимента

На основе обширного вычислительного эксперимента получено, что квадратичные полиномы Вольтерра с достаточной для практического применения точностью описывают динамику изменения температуры воды  $\Delta t$  при достаточно глубоких (до **25%** от  $D_0$ ) изменениях расхода  $\Delta D$ .

### Литература

1. Солoduша С.В. Пакет «Динамика» для исследования динамических процессов рядами Вольтерра // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2017. Т. 17. №2. С. 83-92.
2. Апарцин А.С. Неклассические уравнения Вольтерра I рода: теория и численные методы. Новосибирск: Наука, 1999. 193 с.
3. Таиров Э.А. Нелинейное моделирование динамики теплообмена в канале с однофазным теплоносителем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1989. №1. С. 150-156.
4. Магид С.И., Гержой И.П., Рубашкин А.С., Крашенинников В.В. Математическая модель переходных процессов прямоточного котла для тренажера оператора теплофикационного энергоблока 250 МВт // Теплоэнергетика. 1985. № 5. С. 34-38.
5. Таиров Э.А., Левин А.А., Запов В.В. Развитие методов моделирования динамики теплоэнергетических установок // Вестник ИргТУ. 2011. № 3(50). С. 117-123.
6. Таиров Э.А., Логинов А.А., Чистяков В.Ф. Математическая модель, численные методы и программное обеспечение тренажера для энергоблока Иркутской ТЭЦ-10. СЭИ СО РАН. 1999. Препринт № 11. 43 с.
7. Солoduша С.В. К идентификации ядер Вольтерры в нестационарных интегральных моделях динамических систем // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. 2017. №15. С. 222-228.