

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**
№ 3, 2020



**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**
No 3, 2020

**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богуш, Т. В. Борботко, В. Б. Байбурин (РФ),
Д. Ю. Большаков (РФ), Л. С. Герасимович, Н. Н. Гурский,
Ю. М. Захарик, И. А. Каляев (РФ), Г. О. Кипиани (Грузия),
Э. Г. Лазаревич, В. А. Липницкий, А. А. Лобатый,
Е. И. Никифорович (Украина),
А. А. Прихожий, И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов,
П. П. Урбанович, А. Патрин (Польша),
Ю. Н. Петренко (ответственный секретарь),
Н. Н. Ташатов (Казахстан), А. В. Чигарев, Д. К. Щеглов (РФ)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National
Technical University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, V. Baiburin (RF),
D. Bolshakov (RF), N. Gurskiy, L. Gerasimovich,
J. Zaharik, I. Kalyaev, G. Kipiani (Georgia),
E. Lazarevich, V. Lipnitsky, A. Lobaty,
E. Nikiforovich (Ukraine),
A. Prihozhy, I. Satikov, V. Starovoytov,
P. Urbanovich, A. Patrin (Poland),
Y. Petrenko (executive secretary), N. Tashchatov
(Kazakhstan), A. Chigarev, D. Shcheglov (RF)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка

- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

Ответственный секретарь редакции

Хвитько Е. А.

Технический редактор

Хвитько Е. А.

Адрес редакции

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

E. Khvitsko

Technical Editor

E. Khvitsko

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 01.07.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5.93. Уч.-изд. л. 3,13. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Романчак В. М., Гундина М. А. Выделение периодической компоненты р азложением по сингулярным вейвлетам.....	4
--	---

УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Новиков С. О., Новикова Л. И., Титко В. Ю. Режимы управления автоматикой слежения за частотой энергосистемы	10
--	----

Рожков И. В. Синтез инвариантного контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу тангажа....	14
--	----

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Асатрян Д. Г., Арутюнян М. Е., Голуб Ю. И., Старовойтов В. В. Влияние типа искажения на оценку качества изображения при уменьшении его размеров.....	22
---	----

Золотарев С. А., Савеня П. С., Жуков К. А., Седнина М. А. Метод неразрушающего контроля толщины и внут- ренней дефектности стенок металлической трубы	28
--	----

Курочка К. С., Токочаков В. И., Карабчикова Е. А., Панарин К. А. Компьютерное моделирование перенапряжений в распределительных сетях 6–10 кВ при однофаз- ных замыканиях на землю.....	34
--	----

Напрасников В. В., Полозков Ю. В., Бородуля А. В., Кункевич Д. П. Результаты численного моделирования течений в ячеистых структурах различных видов.....	42
---	----

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS

Romanchak V. M., Hundzina M. A. Isolation of a periodic component by singular wavelet decomposition	4
--	---

MANAGEMENT
OF TECHNICAL OBJECTS

Novikov S. O., Novikova L. I., Titkov V. Y. Control modes for frequency tracking equipment in the power system	10
---	----

Rozhkov I. V. Synthesis of invariant circuit angular stabilization of unmanned aircraft at the pitch angle.....	14
--	----

DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING

Asatryan D. G., Harutyunyan M. E., Golub Y. I., Starovoitov V. V. Influence of the distortion type on the image quality assessment when reducing its sizes.....	22
--	----

Zolotarev S. A., Savenia P. S., Zhukov K. A., Sednina M. A. Method of non-destructive control of thickness and internal defectivity of the walls of metal pipe.....	28
--	----

Kurochka K. S., Tokochakov V. I., Karabchikova E. A., Panaryn K. A. Computer simulation of overvoltages in 6–10 kV distribution networks for single-phase ground faults.....	34
---	----

Naprasnikov V. V., Polozkov Y. V., Kunkevich D., Borodulya A. Results of numerical modeling of flows in cellular structures of various species	42
---	----

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

В. М. РОМАНЧАК, М. А. ГУНДИНА

ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КОМПОНЕНТЫ РАЗЛОЖЕНИЕМ ПО СИНГУЛЯРНЫМ ВЕЙВЛЕТАМ

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

В работе предлагается применять дискретное вейвлет-преобразование с сингулярным вейвлетом для выделения периодической составляющей из сигнала. Традиционно считается, что для базисного вейвлета должно выполняться условие допустимости (среднее значение вейвлета равно нулю). Для сингулярных вейвлетов условие допустимости не выполняется. В качестве сингулярного вейвлета можно использовать дельтаобразные функции, которые участвуют в оценках Парзена-Розенблатта, Надарая-Ватсона. С помощью сингулярного вейвлета определяется дискретное вейвлет-преобразование. Подобное преобразование изучалось нами ранее для непрерывного случая. Были получены теоретические оценки скорости сходимости суммы вейвлет-преобразований; предложены различные варианты и дано теоретическое обоснование применению метода сингулярных вейвлетов; сформулированы достаточные условия равномерной сходимости суммы вейвлет-преобразований. Показано, что с помощью вейвлет-преобразования можно решать задачу непараметрической аппроксимации функции. Разложение по сингулярным вейвлетам является новым методом и в настоящее время отсутствуют примеры его приложения к решению прикладных задач. В данной работе анализируются возможности метода сингулярных вейвлетов. Сделано предположение, что в некоторых случаях из сигнала можно выделить медленную и быструю компоненту, и такая гипотеза подтверждается численным решением реальной задачи. Аналогичный анализ проводится и с помощью параметрического уравнения регрессии, которое позволяет выделить периодическую составляющую из сигнала. Сравнение результатов расчетов подтверждает, что непараметрическая аппроксимация, основанная на сингулярных вейвлетах, и применение параметрической регрессии может приводить к аналогичным результатам.

Ключевые слова: вейвлет, вейвлет-преобразование, окно Парзена-Розенблатта, непараметрическая аппроксимация, ядерная оценка Надарая-Ватсона.

Введение

В литературе, посвященной изучению обработки сигналов, представляют интерес алгоритмы, которые позволяют раскладывать сигнал на составляющие. Один из подходов к решению этой проблемы – это предварительное разложение исходного сигнала на более простые составляющие (вейвлеты). Такой подход нашел широкое применение (А. Гроссмана и Ж. Морле [1], А. Хаара [2], А. Кальдерона [3], И. Добеши [4]). В настоящее время классические вейвлеты применяются в задачах распознавания образов; при обработке и синтезе различных сигналов.

Наряду с классическими вейвлетами, для которых среднее значение на всей числовой равно нулю, можно рассматривать и сингулярные вейвлеты для которых среднее значение на числовой оси равно единице [5–7]. С помощью сингулярных вейвлетов удобно представлять

сигнал как сумму вейвлетов, которые содержат разные масштабные постоянные. Достоинством такого подхода является простой числовой алгоритм и естественная интерпретация полученной информации о сигнале.

Основные определения

Пусть для функции $y(x)$ выполняется условие на бесконечности

$$|\psi(x)| \leq \frac{d}{1+x^2}, \quad (1)$$

где d – некоторая положительная константа и для функции $\psi(x)$ существует конечное среднее значение C_ψ :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Из условий (1) и (2) следует, что функция $\psi(x)$ принадлежит пространству $L^1(R)$. Функцию $\psi(x)$ назовем *базисным вейвлетом*.

Обычно для базисного вейвлета должно выполняться условие допустимости: среднее, определяемое по формуле (2), должно равняться нулю: $C_\psi = 0$. Если считать, что для вейвлета среднее не равно нулю ($C_\psi \neq 0$), то такой базисный вейвлет будем называть сингулярным [5–6]. Например, сингулярным вейвлетом является функция плотности нормального распределения. Будем считать, что среднее значение сингулярного вейвлета равно единице: $C_\psi = 1$. Для бесконечного промежутка вейвлет-преобразование определяется по формуле [7]:

$$W(f)(x, a_0) = \frac{1}{a_0} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi\left(\frac{\tau - x}{a_0}\right) d\tau, \quad (3)$$

где a_0 – масштаб преобразования, $a_0 > 0$.

Фактически вейвлет-преобразование осуществляет сглаживание функции. Если определено вейвлет-преобразование (3), то для функции $f(x)$ справедливо тождество:

$$f(x) = \frac{1}{a_0} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi\left(\frac{\tau - x}{a_0}\right) d\tau - \frac{1}{a_0} \int_{-\infty}^{\infty} (f(\tau) - f(x)) \psi\left(\frac{\tau - x}{a_0}\right) d\tau. \quad (4)$$

Тождество (4) будем называть вейвлет-разложением первого порядка функции $f(x)$. Его можно записать в виде суммы вейвлет-преобразования (3) и невязки первого порядка $F_1(x)$:

$$f(x) = W(f)(x, a_0) + F_1(x). \quad (5)$$

где $F_1(x) = W(f(x) - f)(x, a_0)$. Если выполнить вейвлет-разложение остаточного члена $F_1(x)$ в формуле (5) с масштабом a_1 и подставить в формулу (5), получим вейвлет-разложение функции $f(x)$ второго порядка:

$$f(x) = W(f)(x, a_0) + WF_1(x, a_1) + F_2(x). \quad (6)$$

где $F_2(x) = W(F_1(x) - F_1)(x, a_2)$ – невязка второго порядка.

Выражение (6) является тождеством, в котором остаточный член $F_2(x)$ определяет степень точности, с которой можно заменить функцию $f(x)$ суммой двух вейвлет-преобразований. Аналогично можно получить вейвлет-разложение произвольного порядка. Введение сингулярных вейвлетов расширяет возможности теории вейвлетов и ядерных оценок типа Надарая – Ватсона [8–9].

По аналогии с непрерывным вейвлет преобразованием (3) определим дискретное вейвлет-преобразование функции $f(x)$ по формуле:

$$W(x, a) = \frac{1}{C(x, a)} \sum_{i=0}^n f(\tau_i) \psi\left(\frac{\tau_i - x}{a}\right). \quad (7)$$

где $C(x, a) = \sum_{i=0}^n \psi\left(\frac{\tau_i - x}{a}\right)$. Тогда для вейвлет-преобразования (7) справедливо вейвлет-разложение (5). Областью определения вейвлет-преобразования $W(f)(x, a)$ является вся действительная ось, а остаточный член $F_1(x)$ определен в точках разбиения $x \in \{\tau_1, \dots, \tau_{n-1}, \tau_n\}$.

Алгоритм дискретной аппроксимации функции

Рассмотрим алгоритм дискретной аппроксимации функции на примере функции, для которой не выполняются условия Липшица. Пусть значения $\tau_i, i = 1, \dots, n$ принадлежат интервалу $[-1, 1]$, и известны значения функции $y_i = f(\tau_i)$ в этих точках.

Присваиваем начальные значения y_i коэффициентам вейвлета нулевого порядка:

$$F_{0,i} = y_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Вычисляем коэффициенты вейвлет-преобразования, используя дискретный аналог формул (5), (6):

$$F_{k+1,i} = F_{k,i} - WF_k(\tau_i, a_k), \quad (9)$$

где $k = 1, \dots, K$; $F_{k,j}$ – значения коэффициентов вейвлета k -го порядка, $a_k = \alpha 2^{-k}$, α – постоянная.

$$WF_k(x, a_k) = \frac{\sum_i F_{k,i} \psi\left(\frac{\tau_i - x}{a_k}\right)}{\sum_i \psi\left(\frac{\tau_i - x}{a_k}\right)}. \quad (10)$$

Восстанавливаем функцию $f_k(x) \approx f(x)$ во всех точках интервала $[A, B]$, используя аналог формулы (9):

$$f(x) = \sum_{k=0}^{K-1} WF_k(x, a_k) + F_K(x). \quad (11)$$

Выделение периодической компоненты сигнала

Аппроксимацию функцией $f_k(x)$ можно интерпретировать как результат сглаживания данных или как интерполяцию (квази-интерполяцию). Используя различные порядки аппроксимации K , получим различные степени сглаживания функции, которые можно

использовать в задаче фильтрации сигнала. Для этого функцию $f_k(x)$ удобно представить в виде суммы двух компонент:

$$f_k(x) = S(x) + T(x), \quad (12)$$

где $S(x) = \sum_{k=0}^m WF_k(x, a_k)$, $T(x) = \sum_{k=m+1}^K WF_k(x, a_k)$.

Преобразование $WF_k(x, a_k)$ определено по формуле (10). Тогда выполняется равенство $f(x) = S(x) + T(x) + F_{K+1}(x)$. Невязку аппроксимации $F_{K+1}(x)$ в узлах x_i можно найти непосредственно по формуле:

$$F_{K+1}(x_i) = f(x_i) - S(x_i) - T(x_i). \quad (13)$$

Параметры вейвлет-разложения (13) можно выбрать таким образом, чтобы компонента $S(x)$ изменялась медленно, а компонента $T(x)$ изменялась быстро, и остаток был достаточно мал.

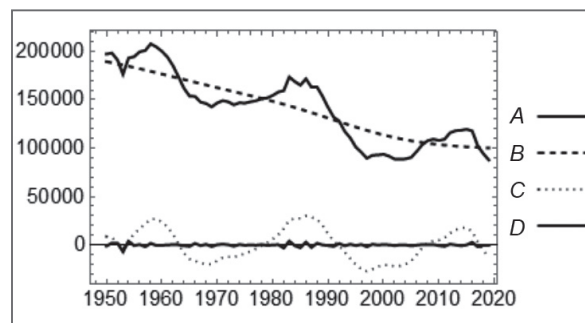
Пример. Сингулярные вейвлеты

Рассмотрим временной ряд рождаемости в Республике Беларусь за период 1950–2019 годы. Пусть τ_i – год, для которого определен уровень рождаемости; y_i – уровень рождаемости за текущий год τ_i . Аппроксимируем дискретный ряд наблюдений $y_1, y_2, \dots, y_n$ непрерывной функцией $f(x)$ такой, что $f(x_i) = y_i$. Функцию $f_k(x)$ используя формулу (12) представим в виде суммы медленной $S(x)$ и быстрой $T(x)$ компонент. Выбраны следующие параметры вейвлет-разложения $m = 1$, $K = 5$, $a_k = 2^{-k}$; сингулярный вейвлет $\psi(t) = e^{-t^2}$. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Параметрическая регрессия и сглаживание

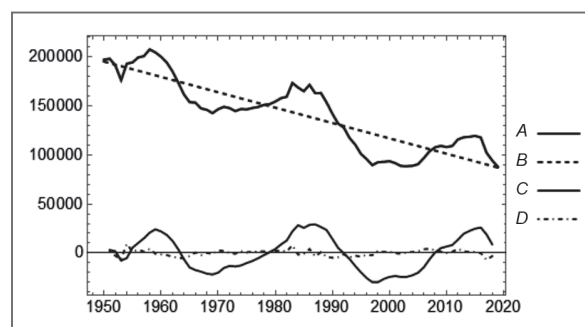
Рассмотрим процедуру разложения этого же временного ряда в системе *Mathematica*, используя классический регрессионный анализ. Под разложением временного ряда будем понимать разделение его на систематическую и периодическую составляющие. Построим график периодической и систематической составляющей временного ряда, используя аддитивную модель и встроенные функции системы *Mathematica* [10]. Аппроксимирующую кривую в системе *Mathematica* по методу наименьших квадратов можно получить, используя команду *Fit[data, {1, x}, x]*. Соответствующая кривая B представлена на рис. 2.

Для определения коэффициента детерминации использована опция *RegressionReport->{RSquared}* функции *Regress*. Данная функция реализована в пакете «*LinearRegression*», к которому идет обращение в системе *Mathematica*. Коэффициент детерминации для линейного тренда равен 0,76. Для многочлена второго, третьего и четвертого порядка соответственно 0,77; 0,78 и 0,80. При этом применение многочленов второй, третьей степени не существенно увеличивает коэффициент детерминации, а выбор многочлена четвертой степени приводит к периодическим колебаниям в уравнении регрессии, поэтому ограничимся линейной аппроксимацией. Затем находим разность ординат исходного графика A и графика B . Для оценки периодической трендовой составляющей использован метод сглаживания разности кривых A и B . В результате вычисления простого скользящего среднего используя функцию *MovingAverage*, получена кривая C , представленная на рис. 2.



A – исходные данные y_i ; B – медленная компонента $S(x)$; C – быстрая компонента $T(x)$; D – остаток

Рис. 1. Компоненты $f(x)$, построенные с применением сингулярных вейвлетов



A – исходные данные y_i ; B – линейный тренд $S(x)$; C – периодическая составляющая $T(x)$; D – остаток

Рис. 2. Компоненты $f(x)$, построенные на основе линейной регрессии

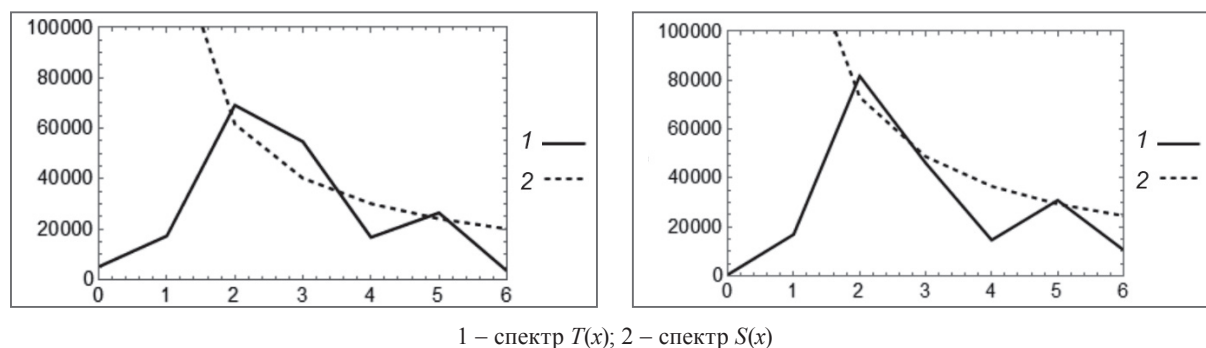


Рисунок 3. – Амплитудный спектр для компонент, полученных с помощью сингулярных вейвлетов (слева), и с помощью применение линейного тренда и скользящего среднего (справа)

Дополнительно проведем спектральный анализ Фурье исходных данных и быстрой (периодической) компоненты.

Как видно из рис. 3, спектральный анализ исходных данных не обнаружил периодическую аддитивную компоненту. Спектр быстрой компоненты указывает на наличие периодической составляющей с периодом равным приблизительно 35 лет.

Заключение

В работе изучаются свойства вейвлет-преобразований на конечном промежутке. Показано, что вейвлет-преобразования можно использовать для аппроксимации функциональных зависимостей. Сформулированы и доказаны достаточные условия сходимости ряда вейвлет-преобразований. В качестве примера проведено исследование показателя рождаемости за определенный временной период.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grossman, A.** Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related tranforms // A. Grossman, J. Morlet / Lectures on Recent Results Grossman, A. Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related tranforms. – 1985. – V.1. – P. 135–165.
2. **Haar, A.** Zur Theorie der orthogonalen Funktionsysteme / A. Haar. – Math. Ann. – 1910. – V.69. – P. 331.
3. **Meyer, Y.** Wavelets: Algorithms and applications // Y. Meyer // S.I.A.M. – 1993. – V.36. – P. 526–528.
4. **Добешин, И.** Десять лекций по вейвлетам. / И. Добешин. Ижевск: НИЦ РХД, 2001. – 464 с.
5. **Романчук, В. М.** Аппроксимация сингулярными вейвлетами/ В. М. Романчук // Системный анализ и прикладная информатика, –2018. –№ 2 – С. 23–28.
6. **Романчук, В. М.** Аппроксимация экспертных оценок сингулярными вейвлетами / В. М. Романчук, П. М. Лаппо // Вестник Гродненского гос.ун. Сер. 2: Математика. Физика. Информатика, вычислительная техника и управление, –2017. –Т. 7, № 1. –С.132–139.
7. **Романчук В. М.** Сингулярные вейвлеты на конечном интервале/ В. М. Романчук // Информатика. –2018. № 15(4). – С. 39–49.
8. **Надарая, Э. А.** Об оценке регрессии / Э. А. Надарая // Теория вероятностей и ее применение. –1964. – Т. 9, № 1. – С. 157–159.
9. **Watson, G. S.** Smooth regression analysis / G. S. Watson // Sankhya: The Indian Journal of Statistics, Ser. A. –1964. – Vol. 26, –P. 359–372.
10. **Coghlan, A.** A little book of R for time series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/a-little-book-of-r-for-time-series/latest/a-little-book-of-r-for-time-series.pdf>. – Дата доступа: 2.05.2020.

REFERENCES

1. **Grossman A.** Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related transforms. Lectures on Recent Results Grossman, 1985, vol. 1, pp.135–165.
2. **Haar A.** Zur Theorie der orthogonalen Funktionsysteme. Math. Ann, 1910, vol. 69, pp. 331.
3. **Meyer Y.** Wavelets: Algorithms and applications. S.I.A.M, 1993, vol. 36, pp. 526–528.
4. **Dobeshi I.** Desjat' lekcij po vejvletam. Ten lectures on wavelets. Izhevsk, SRC «RCD», 2001, 464 p. (in Russian).
5. **Romanchak V.M.** Approssimacija singuljarnymi vejvletami. Approximation by singular wavelets. System analysis and applied informatics, 2018, no. 2, pp. 23–28. (in Russian).
6. **Romanchak V.M., Lappo P.M.** Approssimacija jekspertnyh ocenok singuljarnymi vejvletami. Approximation of expert estimates by singular wavelets. Bulletin of the Grodno State University, Ser. 2, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 132–139. (in Russian).
7. **Romanchak V.M.** Singuljarnye vejvlety na konechnom interval. Singular wavelets on a finite interval. Informatika, 2018, vol. 15, no. 4, pp. 39–49. (in Russian).

8. **Nadaraya E.A.** Ob ocenke regressii. About Regression Estimation. Probability Theory and Its Application, 1964, vol. 9, no. 1, pp. 157–159. (in Russian).
9. **Watson G.S.** Smooth regression analysis. Sankhya, The Indian Journal of Statistics Nadaraya E.A. Ob ocenke regressii. About Regression Estimation. Probability Theory and Its Application, 1964, vol. 9, no. 1, pp. 157–159. (in Russian).
10. **Coghlan, A.** A little book of R for time series [Electronic resource]. – Access Mode: <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/a-little-book-of-r-for-time-series/latest/a-little-book-of-r-for-time-series.pdf>. – Date of access: 2.05.2020.

Поступила
01.08.2020

После доработки
10.08.2020

Принята к печати
01.09.2020

ROMANCHAK V.M., HUNDZINA M.A.

ISOLATION OF A PERIODIC COMPONENT BY SINGULAR WAVELET DECOMPOSITION

The Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

In this paper, we propose to use a discrete wavelet transform with a singular wavelet to isolate the periodic component from the signal. Traditionally, it is assumed that the validity condition must be met for a basic wavelet (the average value of the wavelet is zero). For singular wavelets, the validity condition is not met. As a singular wavelet, you can use the Delta-shaped functions, which are involved in the estimates of Parzen-Rosenblatt, Nadaraya-Watson. Using singular value of a wavelet is determined by the discrete wavelet transform. This transformation was studied earlier for the continuous case. Theoretical estimates of the convergence rate of the sum of wavelet transformations were obtained; various variants were proposed and a theoretical justification was given for the use of the singular wavelet method; sufficient conditions for uniform convergence of the sum of wavelet transformations were formulated. It is shown that the wavelet transform can be used to solve the problem of nonparametric approximation of the function. Singular wavelet decomposition is a new method and there are currently no examples of its application to solving applied problems. This paper analyzes the possibilities of the singular wavelet method. It is assumed that in some cases a slow and fast component can be distinguished from the signal, and this hypothesis is confirmed by the numerical solution of the real problem. A similar analysis is performed using a parametric regression equation, which allows you to select the periodic component of the signal. Comparison of the calculation results confirms that nonparametric approximation based on singular wavelets and the application of parametric regression can lead to similar results.

Keywords: wavelet, wavelet transform, parzen window–Rosenblatt, nonparametric approximation, nuclear assessment Nadaraya-Watson.



Романчак Василий Михайлович, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная математика», Белорусский национальный технический университет, Минск. Телефон 8–029–6323422.
E-mail: Romanchak@bntu.by.



Гундина Мария Анатольевна, кандидат физ.-мат., доцент кафедры «Инженерная математика», Белорусский национальный технический университет, Минск. Телефон 8–029–5030786.
E-mail: hundzina@bntu.by.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

С. О. НОВИКОВ, Л. И. НОВИКОВА, В. Ю. ТИТКО

РЕЖИМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИКОЙ СЛЕЖЕНИЯ ЗА ЧАСТОТОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Белорусский национальный технический университет

Характеристики генерирующих источников и потребителей, динамика изменения частоты в энергосистеме, анализ работы объектов при различных вариациях показателей энергосистемы. Анализ данных поступающие на входы объектов исследования, выходные сигналы систем.

Введение

Целью исследования является рассмотрение динамики изменения переходных процессов в энергосистеме при дефиците мощности, а также процесса выделения электрических станций на сбалансированную нагрузку.

Автоматическая частотная разгрузка (АЧР) является основной автоматикой на любой электрической станции в энергосистеме, к ней предъявляется ряд условий и требований, при этом большая часть устройств АЧР и автоматического частотного деления (АЧД) устарели и не удовлетворяют требованиям действующих ТНПА [1][2].

АЧД согласно действующих ТНПА следует устанавливать на всех ТЭС мощностью свыше 25 МВт. В таком случае отделение электростанций от энергосистемы при системных авариях предотвратит полное отключение потребителей, а АЧР помогает сохранить значение частоты на требуемом уровне [3].

Особое внимание при рассмотрении генерирующих источников и электростанций уделяется выделению генераторов на сбалансированную нагрузку, а также автоматической частотной разгрузке электростанций

в аварийных режимах работы энергосистемы. При этом актуальность таких работ возрастет в разы при пуске БелАЭС, так как отключение только одного блока атомной станции в 1200 МВт приведет к существенному изменению частоты в энергосистеме.

Регулирующий эффект нагрузки зависит от состава потребителей, поэтому в различных энергосистемах он имеет свое значение и лежит в пределах $k_n = 1,0 - 3,0$. В течение суток состав потребителей меняется, вследствие чего регулирующий эффект нагрузки k_n также не остается постоянным. При действии АЧР величину и динамику снижения частоты в основном определяет плотность разгрузки и регулирующий эффект нагрузки.

Структурная схема агрегата, используемого в энергосистеме для регулировки небаланса мощности, показана на рис. 1 [4].

Регулятор частоты вращения реагирует на отклонение частоты от номинальной и воздействует на турбину. Мощность турбоагрегата уравнивается нагрузкой P_n .

При воздействии небаланса мощности ΔP изменение частоты во времени определяется выражением:

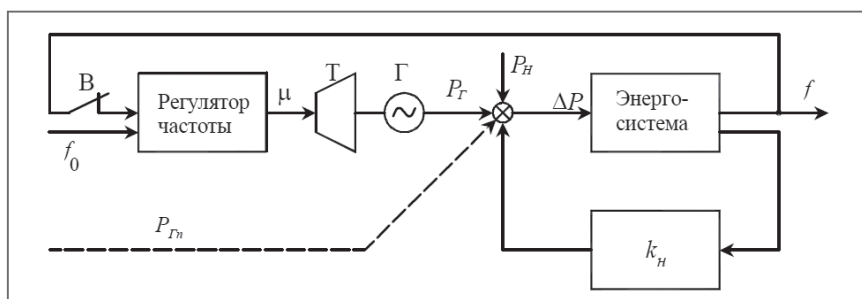


Рисунок 1 – Структурная схема для регулировки небаланса мощности

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{k_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_j}} \right).$$

Если небаланс мощности $\Delta P < 0$, то частота снижается по экспоненциальному закону на величину $\Delta f_{уст} = \Delta P / k_n$ и в установившемся режиме будет равна $f_{уст} = 50 - \Delta f_{уст}$. Процесс снижения частоты показан в виде кривой «3» на рис. 2.

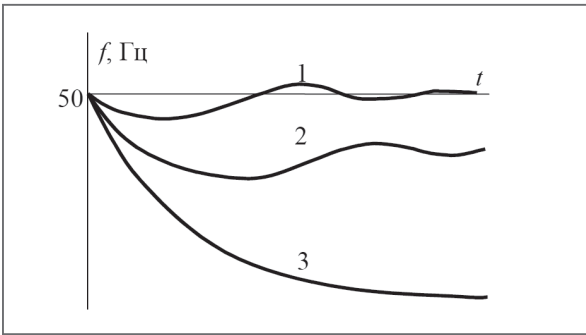


Рис. 2. Структурная схема агрегата при $P_g = \text{const}$

Если условится, что состав потребителей известен, тогда изменение состава нагрузки узла (потребителей) приводит к изменению регулирующего эффекта нагрузки, что в свою очередь даст возможность положительного регулирования (восстановления) частоты в режиме избытка и нехватки генерирующих мощностей, за счёт обратной связи. Данный процесс саморегулирования не приведет к восстановлению частоты до номинального значения, а лишь позволит сохранять частоту рассматриваемой системы

на более высоком уровне, и улучшит переходной процесс снижения частоты.

Авторами рассматривался вопрос изменения регулирующего эффекта нагрузки при работе автоматического частотного деления и при дефиците мощности, который компенсировался воздействием на турбины генерирующих источников в зависимости от частоты на шинах станции.

В момент времени « t_0 » система в равновесии и частота равна 50 Гц, в течении времени происходит ступенчатое изменение нагрузки во времени « tn » и мощность потребления растёт. Приняв, что у генерирующих источников нет запаса по мощности, частота в рассматриваемом узле начинает снижаться. В разрезе времени происходит изменение регулирующего эффекта нагрузки в зависимости от нагрузки потребителей.

Постоянная времени энергосистемы 8 с, период рассмотрения процесса 11 секунд, ступень изменения мощности 1 секунда, изменения регулирующего эффекта нагрузки на 1 МВт изменения мощности равен $\Delta k_n = 0,05$.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

При расчете режима в зависимости от суммарной мощности потребителей производилась выборка требуемого регулирующего эффекта нагрузки, и расчет частоты в данный момент времени с соответствующим коэффициентом. Далее произведен расчет системы с постоянным коэффициентом и идентичными дефицитами мощности на всем промежутке времени. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 1 – Расчет режима при дефиците мощности и «хаотичном» изменении нагрузки потребителей

Нагрузка потребителей, МВт	Дефицит, МВт	Регулирующий эффект нагрузки k_n (для выборки)	Постоянная времени энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки T_j	t, c	Выбор требуемого k_n , зависящего от нагрузки	Изменение частоты $\Delta f, Гц$	$f, Гц$
20	0	2	4	1	2	0	50
22	2	2,05	3,721	2	2,15	0,366	49,634
24,5	4,5	2,1	3,556	3	2,25	1,055	48,945
28,8	8,8	2,15	3,265	4	2,45	2,270	47,730
25,9	5,9	2,2	3,478	5	2,3	1,830	48,170
23,65	3,65	2,25	3,636	6	2,2	1,289	48,711
21	1	2,3	3,810	7	2,1	0,393	49,607
22,1	2,1	2,35	3,721	8	2,15	0,845	49,155
24,5	4,5	2,4	3,556	9	2,25	1,789	48,211
29,7	9,7	2,45	3,200	10	2,5	3,562	46,438
26,9	6,9	2,5	3,404	11	2,35	2,748	47,252
Мощность генерирующего источника, МВт	Постоянная времени энергосистемы T_j						
20	8						

На 10 секунде частота снижается ниже 46 Гц. Графики переходного процесса приведены на рис. 3 и 4.

Анализируя данные можно заметить, что наибольшее значение снижения частоты происходит на 10 секунде, дефицит в этот момент времени составляет 9,7 МВт.

Заключение

Сравнивая показатели системы с динамически изменяющимся коэффициентом k_H

можно более стабильно и плавно производить регулирования частоты.

По результатам анализа данных полученных с учетом плавной динамики изменения k_H системы у которой регулирующий эффект нагрузки может значительно изменяться во времени очевидно, что такой объект может производить регулирование частоты за счёт значительно меньшего изменения состава потребителей.

Т а б л и ц а 2 – Расчет режима при дефиците мощности и $k_H=2$

Дефицит, МВт	Регулирующий эффект нагрузки k_H	Постоянная времени энергосистемы с учетом регулирующего эффекта нагрузки T'_{Σ}	t, с	Изменение частоты Δf при $k_H=2$, Гц	f при $k_H=2$, Гц	Частота f с k_H var, Гц	f с экспоненциальным снижением частоты, Гц
0	2	4	1	0	50	50	50
2	2		2	0,393	49,607	49,634	48,623
4,5	2		3	1,187	48,813	48,945	48,153
8,8	2		4	2,781	47,219	47,730	47,788
5,9	2		5	2,105	47,895	48,170	47,503
3,65	2		6	1,418	48,582	48,711	47,281
1	2		7	0,413	49,587	49,607	47,108
2,1	2		8	0,908	49,092	49,155	46,974
4,5	2		9	2,013	47,987	48,211	46,869
9,7	2		10	4,452	45,548	46,438	46,787
6,9	2		11	3,229	46,771	47,252	46,724

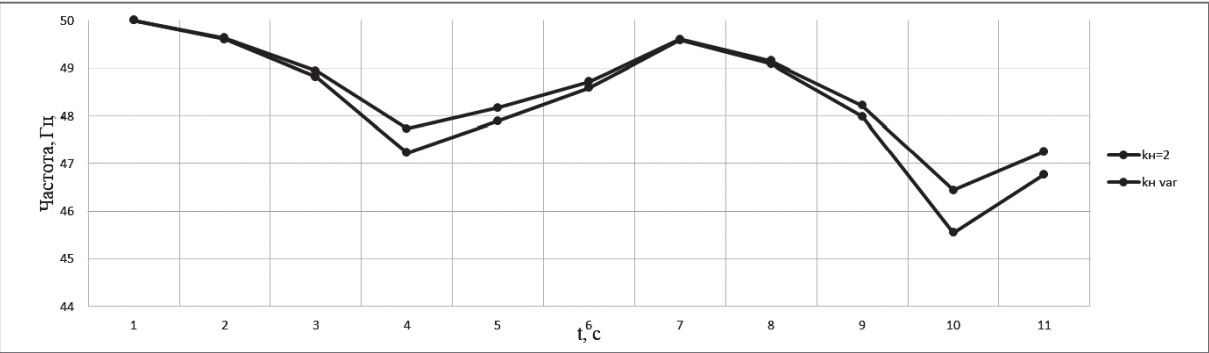


Рисунок 3 – Переходной процесс при изменяющемся k_H

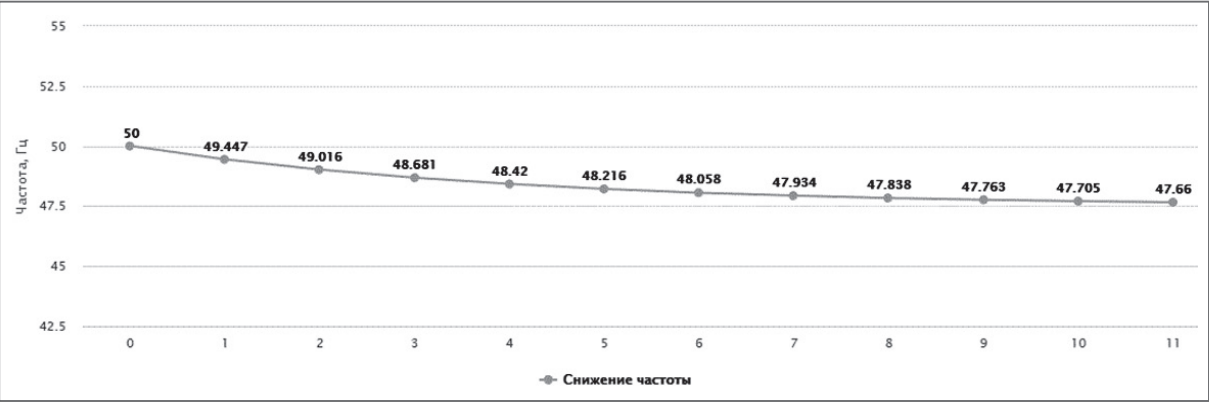


Рисунок 4– Переходной процесс при дефиците $\Delta P=5\text{МВт}$ в ПА АЧД

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок: сборник нормативных правовых актов Республики Беларусь / составители: Л. С. Овчинников, Н. В. Овчинникова. – Минск: Дизайн ПРО, 2012. – 1375 с.
2. Оперативно-диспетчерское управление. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования: ГОСТ 34045–2017. – Введ. 30.01.2017. – М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Межгос. Технический комитет по стандартизации, 2017. – 19 с.
3. Правила технического обслуживания устройств релейной защиты, электроавтоматики, дистанционного управления и сигнализации электростанций и подстанций 110–750 кВ: СТП 09110.35.677–07. – Введ. 01.11.2007. – Минск: Белэнергоремналадка, 2007. – 136 с.
4. **Окин, А. А.** Противоаварийная автоматика / А. А. Окин. – М.: МЭИ, 1995. – 212 с.

REFERENCES

1. Rules for electrical installations: collection of normative legal acts of the Republic of Belarus / compilers: L. S. Ovchinnikov, N. V. Ovchinnikova. – Minsk: Design PRO, 2012. – 1375 p.
2. Operational dispatch management. Automatic emergency management of power system modes. Emergency automation of power systems. Norms and requirements: GOST 34045–2017. – Introduction. 30.01.2017. – Moscow: Mezghos. Council for standardization, Metrology and certification: Mezghos. Technical Committee for standardization, 2017. – 19 p.
3. Rules for maintenance of relay protection devices, electrical automation, remote control and alarm systems for power plants and substations 110–750 kV: STP 09110.35.677–07. – Introduction. 01.11.2007. – Minsk: Belenergoremnaladka, 2007. – 136 p.
4. **Okin, A. A.** Anti-Accident automation / A. A. Okin. – Moscow: MEI, 1995. – 212 p.

Поступила
01.08.2020

После доработки
08.08.2020

Принята к печати
01.09.2020

NOVIKOV S. O., NOVIKOVA L. I., TITKOV V. Y.

CONTROL MODES FOR FREQUENCY TRACKING EQUIPMENT IN THE POWER SYSTEM

Characteristics of generating sources and consumers, dynamics of frequency changes in the power system, analysis of the operation of objects with different variations of power system indicators. Analysis of data coming to the equipment inputs and system output signals.



Новиков Сергей Олегович, доцент БНТУ, к.т.н. специальность 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации. Сфера интересов: программное управление технологическими комплексами.

Novikov Sergey Olegovich, Associate Professor of BNTU, Ph.D. specialty 05.13.01 – system analysis, management and information processing. Sphere of interests: software control of technological complexes.

E-mail: novikau@bntu.by



Новикова Людмила Ивановна, старший преподаватель БНТУ. современные технологии обучения.

Novikova Lyudmila Ivanovna, senior lecturer at BNTU. modern teaching technologies.

E-mail: novikova@bntu.by



Титко Вадим Юрьевич, РУП Минскэнерго, филиал минские тепловые сети, мастер производственного участка. Сфера интересов: энергоэффективные технологии в энергетике.

Titkov Vadim Yurievich, RUE Minskenergo, branch Minsk heating networks, foreman of the production area. Area of interest: energy efficient technologies in the energy sector.

E-mail: Vadik29071992@mail.ru

И. В. РОЖКОВ

СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНОГО КОНТУРА УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО УГЛУ ТАНГАЖА

Учреждение образования “Белорусская государственная академия авиации”

В статье рассматривается методика синтеза инвариантной системы автоматической стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу тангажа, базирующаяся на концепции обратных задач динамики. Приводятся методика и результаты имитационного математического моделирования синтезированного контура стабилизации с использованием пакета расширения Simulink программы MATLAB. Представлены результаты сравнительного анализа динамических характеристик контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу тангажа с PID-регулятором и синтезированным робастным регулятором.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; робастная система автоматической стабилизации; обратные задачи динамики; математическая модель беспилотного летательного аппарата.

Введение

Важную роль в обеспечении управляемого полета беспилотного летательного аппарата (БЛА) играет система угловой стабилизации.

Для многих систем управления БЛА характерна большая неопределенность условий их работы, обусловленная изменением параметров объекта управления, а также внешних возмущений, действующих на БЛА.

В настоящее время контуры стабилизации большинства известных типов САУ строятся на основе PID-регуляторов. Такие регуляторы имеют простую структуру и позволяют получать приемлемое качество процессов регулирования для номинальных параметров объекта управления (ОУ).

Нестационарность ОУ может привести к недопустимому снижению качества регулирования в контурах стабилизации, а в некоторых случаях и к потере их устойчивости.

Существенным негативным фактором при стабилизации БЛА является уровень флуктуационной составляющей угловых колебаний, обусловленной воздействием на летательный аппарат турбулентной атмосферы. Повышенный уровень угловых флуктуаций может привести к увеличению силы лобового сопротивления, а значит, к уменьшению продолжительности полета, а также к снижению точности вывода БЛА в заданные

координаты и точности прицеливания (для ударных БЛА).

Разработан целый ряд способов получения систем стабилизации, инвариантных к изменению параметров ОУ и внешних возмущений. Контуры стабилизации углового положения БЛА могут строиться либо как адаптивные системы управления, либо как системы эквивалентные адаптивным.

К системам эквивалентным адаптивным относятся системы с эталонными моделями, параметрически инвариантные компенсационные системы (ПИКС), системы переменной структуры. Такие системы являются робастными, т.е. обладают слабой чувствительностью параметров переходного процесса в широком диапазоне изменения параметров объекта управления. Однако они обладают различной степенью «помехозащищенности», которая определяется полосой пропускания контура стабилизации.

Для БЛА, особенно классов микро и мини, рациональным является использование робастных систем автоматической стабилизации.

Они должны быть максимально простыми по структуре, обеспечивать требуемое качество переходного процесса в контуре и обладать свойством инвариантности характеристик переходного процесса к изменению параметров летательного аппарата. Кроме того, они

должны обладать слабой чувствительностью выходных сигналов к случайным возмущениям, действующим на БЛА.

Постановка задачи исследования

В данной работе предлагается разработать методику синтеза инвариантного контура угловой стабилизации БЛА по каналу тангажа, основанную на концепции обратных задач динамики (ОЗД); проверить качество функционирования и оценить качество переходных процессов контура стабилизации БЛА по каналу тангажа с PID – регулятором и регулятором с предлагаемой структурой.

Решение задачи

В общем случае состояние ОУ характеризуется n -мерным вектором X , описываемым стохастическим дифференциальным уравнением:

$$\dot{X} = AX + BU + N\xi, \quad (1)$$

где A , B , N – матрицы постоянных коэффициентов соответствующей размерности, U – m -мерный вектор управления, ξ – n -мерный вектор белого шума с известной матрицей интенсивностей.

В процессе управления измеряются все или часть фазовых координат объекта в соответствии с уравнением измерений:

$$Z = CX + \eta, \quad (2)$$

где Z – r -мерный вектор измерений, C – матрица размерности $n \times r$, определяющая измеряемые координаты, η – r -мерный вектор шума измерений с известной матрицей интенсивностей.

В соответствии с принципом ОЗД [3], оптимальное управление находится в виде такой функции вектора фазовых координат $U(X)$, которая обеспечивает близость фазовых траекторий ОУ и эталонной модели (ЭМ) с заданными динамическими свойствами. Эталонная модель представляет собой детерминированную динамическую систему, описываемую в пространстве состояний n -мерным вектором Y , удовлетворяющим уравнению:

$$\dot{Y} = A_y Y + A^0 Y^0, \quad (3)$$

где A_y , A^0 – известные матрицы постоянных коэффициентов, причем элементы матрицы A_y определяют требуемые динамические ха-

рактеристики ЭМ, Y^0 – вектор, определяющий вынужденное движение ЭМ.

Степень близости фазовых траекторий ОУ и ЭМ будем характеризовать вектором Δ расхождения их фазовых скоростей:

$$\Delta = \dot{Y} - \dot{X}. \quad (4)$$

Тогда в качестве критерия оптимальности может быть принята квадратичная форма:

$$G(U) = \frac{1}{2} \Delta^T L \Delta, \quad (5)$$

где L – диагональная матрица весовых коэффициентов размерности $n \times n$.

Поскольку квадратичная форма (4) является случайной функцией, для решения задачи оптимизации будем использовать функцию риска:

$$\hat{G}(U) = M_z[G(U)] = \frac{1}{2} M_z(\Delta^T L \Delta), \quad (6)$$

где M_z – операция определения условного математического ожидания.

Оптимальный вектор управления U находится путем решения задачи локальной оптимизации. Это значит, что вектор управления должен удовлетворять дифференциальному уравнению:

$$\dot{U} = -P[\text{grad } \hat{G}(U)]^T, \quad (7)$$

где $\text{grad } \hat{G}(U) = (\frac{d\hat{G}}{du_1}, \frac{d\hat{G}}{du_2}, \dots, \frac{d\hat{G}}{du_m})$, P – диагональная матрица весовых коэффициентов размерности $n \times m$.

С учетом соотношений (4) и (6), получим выражение для вектора градиента функции риска:

$$\begin{aligned} \text{grad } \hat{G}(U) &= (\frac{d\hat{G}}{dU})^T = M_z(\Delta^T L \frac{d\Delta}{dU})^T = \\ &= -M_z(\Delta^T L B)^T. \end{aligned}$$

Тогда уравнение для $\dot{U}$ будет иметь вид:

$$\dot{U} = P M_z(\Delta^T L B)^T = P B^T L^T M_z(\Delta). \quad (8)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (8) по времени, с учетом соотношения (3), окончательно получим:

$$\begin{aligned} U &= P B^T L^T M_z[\int \Delta dt] = \\ &= P B^T L^T M_z[\int \dot{Y} dt - \dot{X}] = \\ &= P B^T L^T [\int (A_y Y + A^0 Y^0) dt - \dot{X}] \end{aligned} \quad (9)$$

где $\hat{X} = M_z(X)$ – условное математическое ожидание вектора состояния, которое может

быть получено путем использования фильтра Калмана.

С учетом близости фазовых траекторий ОУ и ЭМ в уравнении (9) вместо Y можно приближенно использовать $\hat{X}$. Такая замена позволяет получить вектор управления в виде обратной связи:

$$U = PB^T L^T \left[\int (A_y \hat{X} + A^0 Y^0) dt - \hat{X} \right]. \quad (10)$$

С учетом выражения (10), структурная схема оптимальной системы стабилизации будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Таким образом, в соответствии с теоремой разделения задача оптимального управления системой стабилизации для линейной модели ОУ распадается на две подзадачи: задачу построения оптимальной оценки вектора состояния системы (фильтр Калмана) и задачу синтеза оптимального регулятора,

реализующего закон управления в форме (10) [1,2].

Для частного случая, когда ОУ представляет собой детерминированную систему второго порядка, а матрицы весовых коэффициентов имеют вид:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b_0 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & p_0 \end{bmatrix},$$

структурная схема контура угловой стабилизации полностью соответствует структуре, изображенной на рис. 2. Передаточная функция БЛА по каналу тангажа:

$$W_{\delta}^g(p) = \frac{K_g(T_V p + 1)}{p(T_{\alpha}^2 p^2 + 2\xi_{\alpha} T_{\alpha} p + 1)}, \quad (11)$$

где $K_g = \frac{K_{\alpha}}{T_V}$ – коэффициент передачи в канале тангажа; T_V – аэродинамическая постоянная.

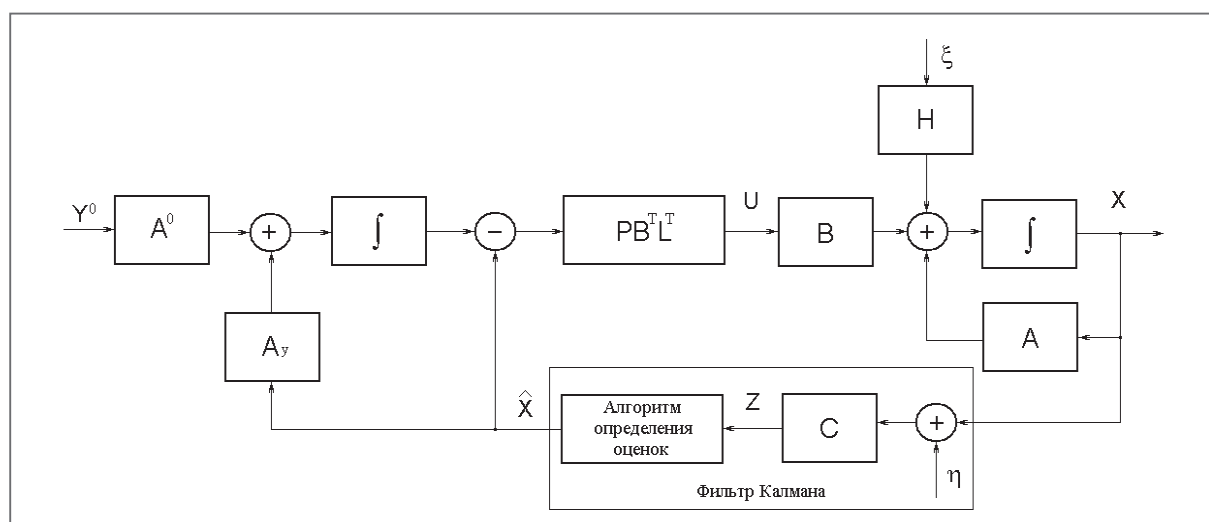


Рис. 1. Структурная схема контура стабилизации

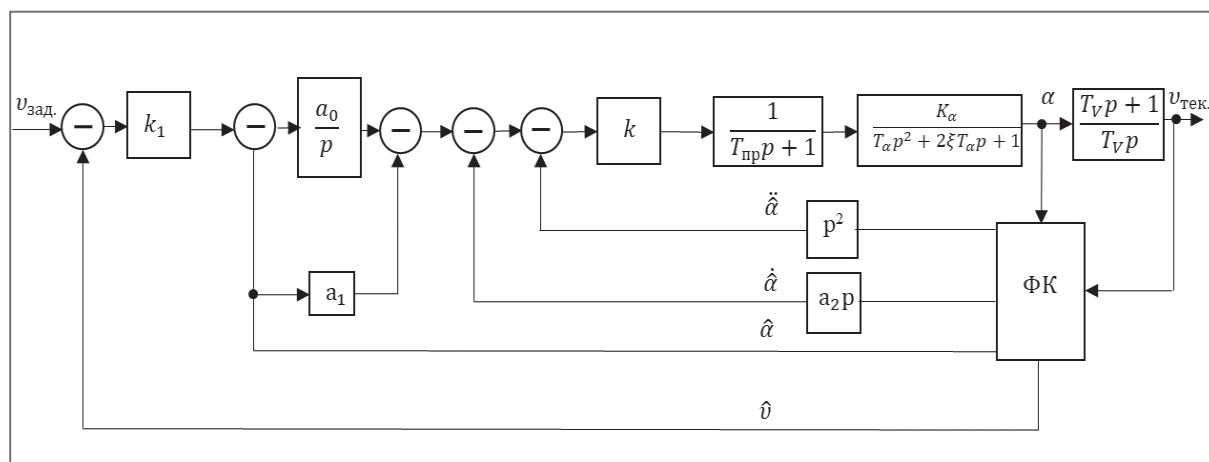


Рис. 2. Структурная схема инвариантного контура угловой стабилизации по каналу тангажа

ная времени БЛА; $K_\alpha, T_\alpha, \xi_\alpha$ – коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент демпфирования по углу атаки.

Предполагается, что наибольшие изменения могут претерпевать параметры БЛА $K_\alpha, T_\alpha, \xi_\alpha$.

Параметры регулятора выбираются таким образом, чтобы на выходе передаточной функции ОУ по углу тангажа формировался такой же сигнал, как и на выходе ЭМ, в качестве которой принята система 3 порядка:

$$W_p(p) = \frac{kk_\alpha a_0}{(T_\alpha^2 + kk_\alpha)p^3 + (2\xi_\alpha T_\alpha + kk_\alpha a_2)p^2 + (1 + kk_\alpha a_1)p + kk_\alpha a_0}$$

При сравнительно небольших значениях k выполняются условия $kk_\alpha a_2 \gg 2\xi_\alpha T_\alpha$; $kk_\alpha \gg T_\alpha^2$; $kk_\alpha a_1 \gg 1$. Тогда передаточная функция разомкнутой части контура определяется выражением:

$$W_p(p) = \frac{a_0}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0},$$

т.е. перестает зависеть от параметров ОУ и определяется только коэффициентами ЭМ.

Проверка качества функционирования контура стабилизации угла тангажа проводилась путем компьютерного моделирования с использованием пакета расширения Simulink программы MATLAB.

В математической модели БЛА предусмотрена возможность оперативного изменения

$$\ddot{y} + a_2 \dot{y} + a_1 y + a_0 y = a_0 \Delta \vartheta'. \quad (12)$$

Условием близости фазовых траекторий $|\alpha(t) - y(t)| < \varepsilon \rightarrow 0$ является условие минимума функции:

$$G(u) = (\ddot{y} - \ddot{\alpha}(u))^2 \rightarrow \min. \quad (13)$$

Функция управления $u(t)$ имеет вид:

$$u(t) = k \left[a_0 \int (k_1 \Delta \hat{\vartheta} - \hat{\alpha}) dt - a_1 \hat{\alpha} - a_2 \dot{\hat{\alpha}} - \ddot{\hat{\alpha}} \right]. \quad (14)$$

Передаточная функция разомкнутой части системы по углу атаки:

коэффициентов $K_\alpha, T_\alpha, \xi_\alpha$. Методика проведения экспериментов заключается в определении зависимости характеристик переходного процесса (длительность T_{III} и перерегулирование σ) в зависимости от вариации параметров ОУ при использовании PID-регулятора и синтезированного робастного регулятора. Изменение параметров ОУ проводится в относительных единицах – процентах от их номинальных значений. За номинальные значения параметров БЛА по углу атаки приняты [4]: $T_\alpha = 0,1$ с, $K_\alpha = 1,525$, $\xi_\alpha = 0,805$. Графики переходных процессов представлены на рис. 3–6.

Из графиков, представленных на рис. 3–5 видно, что для PID-регулятора динамические характеристики контура угловой стабилизации

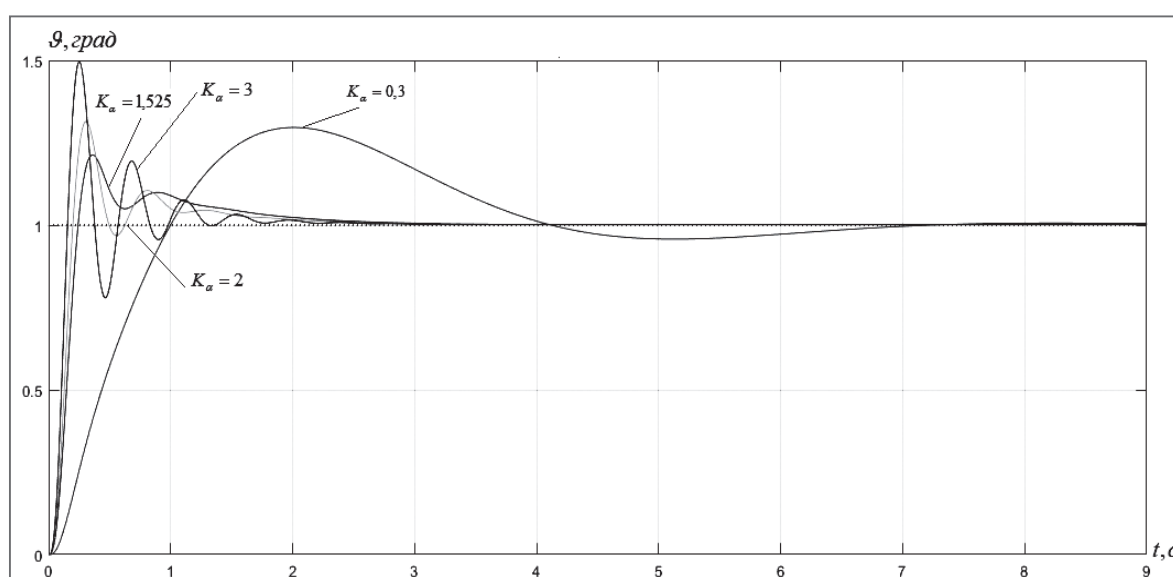


Рис. 3. Переходные процессы при обработке единичного ступенчатого воздействия и вариации коэффициента K_α (PID-регулятор)

БЛА по каналу тангажа значительно ухудшаются при вариации параметров БЛА на величину $\pm 30\div 50\%$ от их номинальных значений. Для синтезированного робастного регулятора графики переходных процессов практически не отличаются от графика для номинальных значений (рис. 6).

Заключение

1. Постоянное входное воздействие обрабатывается контуром стабилизации по тангажу с предлагаемой структурой и параметрами регулятора без статической ошибки.

2. Качество переходного процесса в контуре стабилизации с предлагаемой схемой регулятора остается высоким ($T_{III}=2,6$ с, $\sigma=1,6\%$) при вариациях параметров БЛА в диапазоне от 30% до 300% от номинального значения. Для классического PID-регулятора качество переходного процесса существенно ухудшается при отклонении параметров на величину $\pm 30\div 50\%$ от номинальных значений.

3. Синтезированная система может быть отнесена к типу параметрически инвариантных компенсационных систем с эталонной моделью в прямой цепи регулятора.

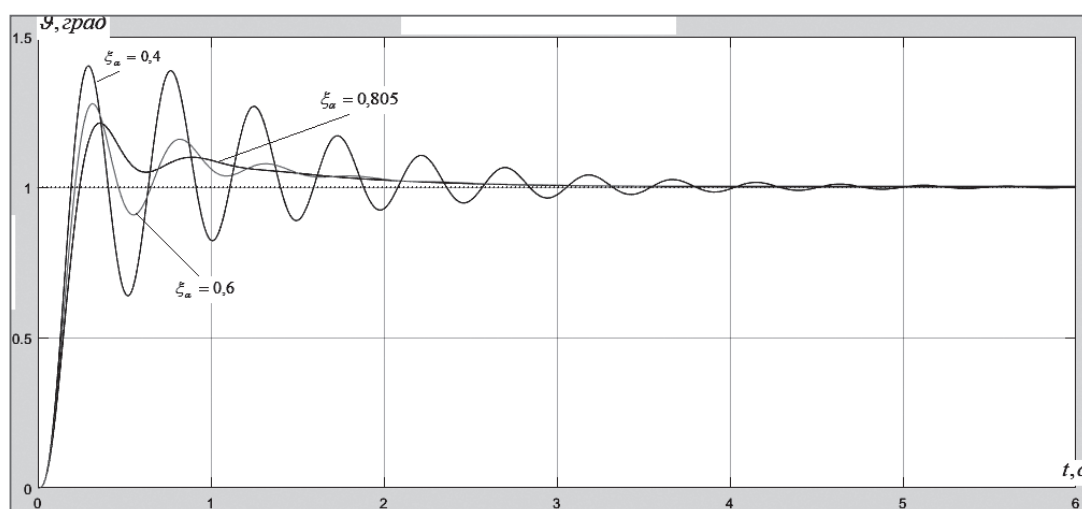


Рис. 4. Переходные процессы при обработке единичного ступенчатого воздействия и вариации коэффициента ξ_α (PID-регулятор)

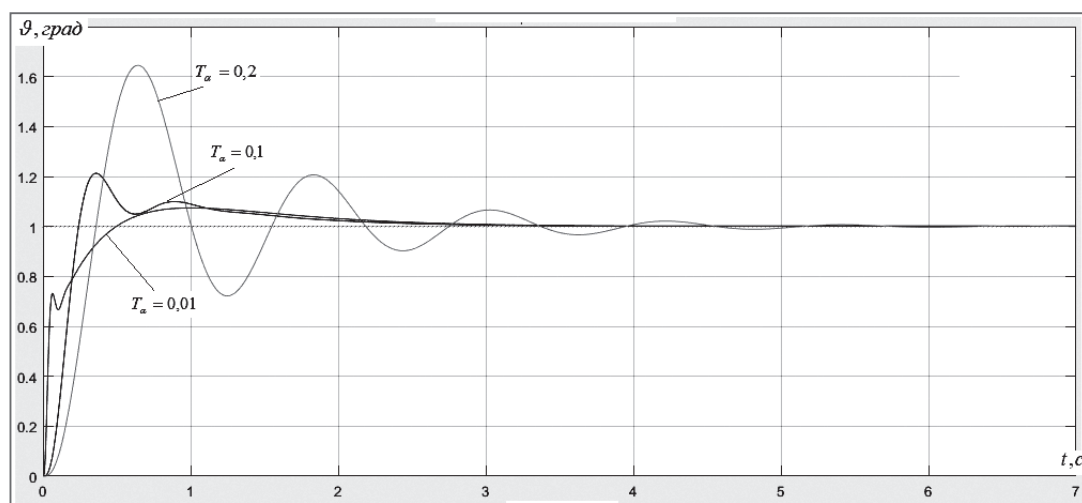


Рис. 5. Переходные процессы при обработке единичного ступенчатого воздействия и вариации коэффициента T_α (PID-регулятор)

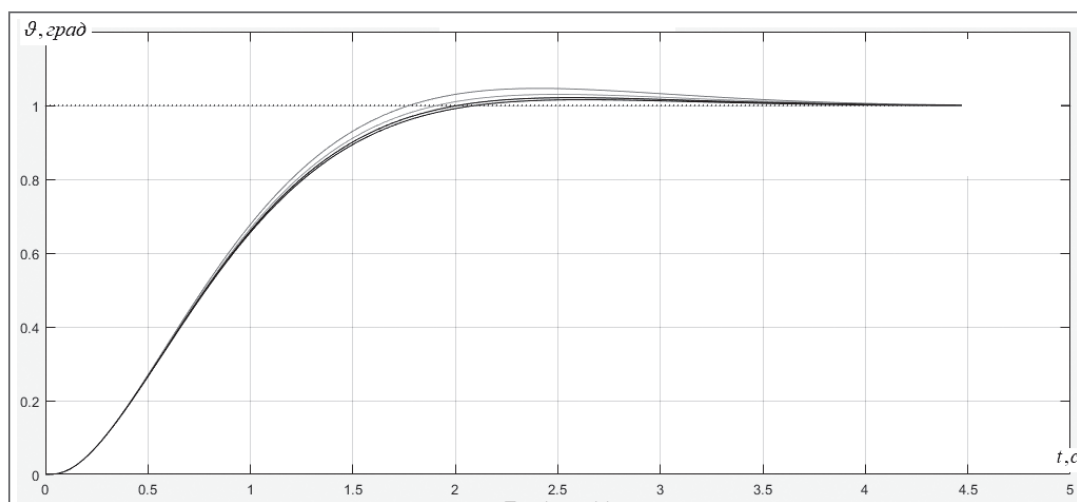


Рис. 6. Переходные процессы при обработке единичного ступенчатого воздействия и вариации параметров БЛА (робастный регулятор)

ЛИТЕРАТУРА

1. Аоки, М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки. – Москва: Наука, 1971. – 424 с.
2. Брайсон, А. Прикладная теория оптимального управления. Оптимизация, оценка и управления / А. Брайсон, Хо Ю-Ши. – Москва: Мир, 1972. – 544 с.
3. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций / П. Д. Крутько. – Москва: Машиностроение, 2004. – 576 с.
4. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В. Я. Распопова. – Москва: Машиностроение, 2011. – 184 с.
5. Михалев, И. А. Системы автоматического управления полетом самолета. Методы анализа и расчета / И. А. Михалев. – Москва: Машиностроение, 1971. – 464 с.
6. Распопов, Б. Я. Автопилот мини-беспилотного летательного аппарата / Б. Я. Распопов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 10. – С. 19.
7. Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛэйн. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.

REFERENCES

1. Aoki, M. Optimization of stochastic systems / Moscow. Aoki. – M.: Nauka, 1971. – 424 p.
2. Bryson, A. Applied theory of optimal control. Optimization, evaluation and management / A. Bryson, Ho Yu-Shi. – Moscow: Mir, 1972. – 544 p.
3. Krutko, P. D. Inverse problems of dynamics in the theory of automatic control. Lecture cycle. – Moscow: Mechanical Engineering, 2004. – 576 p.
4. Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles / ed. V. Ya. Raspopova. – Moscow: Mechanical Engineering, 2011. – 184 p.
5. Mikhalev, I. A. Automatic flight control systems of the aircraft. Methods of analysis and calculation / A. Mikhalev. – Moscow: Mechanical Engineering, 1971. – 464 p.
6. Raspopov, B. Ya. Autopilot of a mini unmanned aerial vehicle / B. Ya. Raspopov [et al.] // Mechatronics, automation, control. – 2008. – № 10. – p. 19.
7. Randal W. Byard, Timothy W. McLain. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice. – Moscow: TECHNOSPHERA, 2015. – 312 p.

ROZHKOV I. V.

SYNTHESIS OF INVARIANT CIRCUIT ANGULAR STABILIZATION OF UNMANNED AIRCRAFT AT THE PITCH ANGLE

The article considers the synthesis methods of an automatic invariant system of the pitch angle stabilization of an unmanned aerial vehicle that is based on the concept of inverse dynamics problems. The methods and results of simulation mathematical results of synthesized stabilization loop with using the Simulink of program MATLAB. The results of a comparative

analysis of the dynamic characteristics of the contour of angular stabilization of an unmanned aerial vehicle by pitch angle with a PID-controller and a synthesized robust controller are presented.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; robust automatic stabilization system; inverse dynamics problems; mathematical model of an unmanned aerial vehicle.*



Рожков Игорь Владимирович – магистр технических наук, соискатель ученой степени кандидата технических наук, старший преподаватель кафедры беспилотных авиационных комплексов и боевого управления учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации».

Rozhkov Igor Vladimirovich – master of technical sciences, candidate of the degree of candidate of technical sciences, senior lecturer at the department of unmanned aircraft systems and combat control establishment of education «Belarusian State Academy of Aviation».

Email: 7528972@mail.ru.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**

Д. Г. АСАТРЯН^{1, 2}, М. Е. АРУТЮНЯН¹, Ю. И. ГОЛУБ³, В. В. СТАРОВОЙТОВ³

ВЛИЯНИЕ ТИПА ИСКАЖЕНИЯ НА ОЦЕНКУ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ ЕГО РАЗМЕРОВ

¹ Институт проблем информатики и автоматизации НАН Армении

² Российско-Армянский университет

³ Государственное научное учреждение «Объединённый институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»

В статье представлено исследование влияния различных типов искажения и структурных свойств изображения на его качество при уменьшении его размеров. Для оценивания качества изображения используется метод сравнения с эталоном при помощи меры, основанной на близости значений параметров распределения Вейбулла, описывающего градиентные поля сравниваемых изображений. В качестве данных использовалась популярная база изображений TID2013, включающая 3000 изображений, искажённых 24 типами искажающих алгоритмов с пятью уровнями. Эксперименты выполнялись для пяти типов искажений, представленных в базе. Каждое изображение базы уменьшалось в 2, 4 и 8 раз двумя наиболее распространёнными методами и сравнивалось с изображением-оригиналом. Для принятия решения о корректности предлагаемой функции оценки качества, ее рассчитанные значения сравнивались с субъективными оценками MOS, предоставленными в базе TID2013. Сравнение осуществлялось при помощи коэффициента корреляции Спирмена. Показано, что средние значения корреляций по всем изображениям трёх типов искажений весьма высокие, в то время как для двух других типов искажений они неприемлемо низкие. Такая ситуация объясняется свойствами искажающих алгоритмов, в разной степени изменяющих структурные свойства изображений.

Продемонстрирована возможность сравнения изображений одной сцены, но разного разрешения.

Ключевые слова: цифровое изображение, оценка качества изображения, уменьшение изображения, разрешение изображения, корреляция Спирмена, распределение Вейбулла

Введение

В последние годы заметно возрос интерес исследователей к вопросам оценивания качества цифрового изображения формальными методами и сравнения результата с субъективными оценками визуальной системы человека (ВСЧ). Разнообразие постановок задач и количество предложенных в литературе подходов и методов их решения связаны не только с многообразием сцен, фиксируемых изображением, но и существованием большого числа факторов, влияющих на качество при его получении, обработке и передаче. Отметим, что в литературе начинает формироваться понимание невозможности разработки универсального метода оценивания качества изображения, одинаково хорошо работающего при воздействии всех или хотя бы для подавляющего большинства факторов. С другой стороны, для конкретного метода чаще всего удаётся выделить класс ограничений, при которых данный метод позволяет с достаточно приемлемой

надёжностью решать поставленную задачу. При этом ставится важная задача разработки методов определения эффективности самого метода оценивания качества. Для этого в литературе укоренился подход, при котором количественная оценка качества изображения сравнивается с оценками, полученными при субъективном анализе группой экспертов. Один из подобных подходов применён в [1], в результате чего была создана база TID2013 из 3000 изображений. Она получена из 25 изображений, каждое из которых подвержено искажениям 24 типов, пятью уровнями каждого искажения. Затем все 3000 изображений были визуально протестированы по балльной системе, в результате каждое получило усреднённую субъективную оценку близости к оригиналу. Эти значения названы усреднёнными оценками качества или mean opinion score (MOS). Таким образом, эта база позволяет сравнить оценки качества, полученные количественными и субъективными методами.

Авторами настоящей работы выполнен ряд исследований с применением данных базы TID2013 по анализу эффективности некоторых наиболее известных мер оценивания качества. Так, в [2] выполнен сравнительный анализ 34 наиболее распространённых безэталонных мер оценивания качества. В [3] для 22 безэталонных мер качества выполнено исследование влияния уменьшения размеров изображения на изменение оценок для определённых типов искажений изображений из базы TID2013. В [4] предложено использовать модель распределения Вейбулла для описания градиентного поля изображения. В частности, предложена мера сходства изображений, основанная на близости значений оценок параметров соответствующих эмпирических распределений. В работах [5–6] предложено использовать параметр формы распределения Вейбулла в качестве безэталонной меры оценивания качества изображений, а в [7] приведен пример использования близости параметров распределения для оценивания качества масштабирования при сравнении с эталоном.

Во всех указанных работах авторами отмечается, что эффективность оценки качества в значительной степени определяется свойствами приложенного или присутствующего типа искажений, а также структурными свойствами самого изображения.

В данной работе описаны результаты исследований влияния уменьшения размеров изображения на оценку качества изображений, вычисляемую с помощью функции, предложенной в работе [4].

Методика исследования

Используемый материал. Для экспериментов были выбраны 24 изображения базы TID2013, которые были изменены следующими типами искажений (нумерация и названия типов искажений приведены согласно [1]):

- 1 Аддитивный гауссов шум,
- 3 Пространственно-коррелированный шум,
- 8 Гауссовское размытие,
- 17 Изменение контраста,
- 19 Мультипликативный гауссовский шум.

Размеры каждого изображения были уменьшены в 2, 4 и 8 раз. В результате были сформированы четыре набора по $5 \times 24 = 120$ изображений, включая оригиналы.

Масштабирование изображений было выполнено двумя способами – методом ближайшего соседа и методом билинейной интерполяции.

Процедура обработки. Напомним, что для вычисления модуля градиента в пикселях тестируемого изображения принята модель, основанная на распределении Вейбулла, плотность которого задаётся формулой:

$$f(x; \lambda, \eta) = \frac{\eta}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\eta-1} \exp \left[- \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{\eta} \right], x \geq 0, \quad (1)$$

где $\eta > 0$ – параметр формы, $\lambda > 0$ – параметр масштаба [4]. При этом модули градиентов вычисляются оператором Собела для каждого пикселя и по их совокупности оцениваются параметры распределения (1).

Сходство двух изображений можно оценить по мере близости соответствующих эмпирических распределений Вейбулла, построенных по совокупности модулей градиентов сравниваемых изображений. Однако вместо непараметрических статистических критериев согласия применяется менее точная, но простая мера W^2 , основанная на близости параметров вейбулловского распределения исходного и искаженного изображений:

$$W^2 = \frac{\min(\eta_1, \eta_2) \min(\lambda_1, \lambda_2)}{\max(\eta_1, \eta_2) \max(\lambda_1, \lambda_2)}, 0 < W^2 \leq 1. \quad (2)$$

Были рассчитаны значения меры сходства W^2 между оригиналом каждого из 24 исходных изображений с набором из 120 изображений с уменьшённым размером для каждого типа искажения, после чего эти значения сравнивались с приведёнными в базе TID2013 субъективными оценками MOS, выставленными экспертами [1]. Для этого вычислялась корреляция по Спирмену.

Результаты экспериментов

Приведём результаты экспериментов для данных, полученных методом ближайшего соседа, следуя рекомендации [3], также учитывая результаты для билинейного метода, практически не отличающиеся от приводимых.

Сопоставляя результаты расчётов меры W^2 с данными субъективных оценок качества MOS, приведённых в [1], приходим к следующим выводам.

1. Мера (2), как правило, позволяет обнаруживать уменьшение качества изображения

при увеличении уровня искажения при сравнении с изображением нормального размера. В качестве примера в табл. 1 приведен фрагмент результатов расчётов меры W^2 для

оригинала и всех уменьшенных образцов двух первых изображений базы при искажениях с пятью уровнями типа 1.

Таблица 1. Значения меры сходства уменьшённых образцов с оригиналом при искажениях с пятью уровнями и MOS (фрагмент).

N изобр.	Уровень искаж.	MOS	Масштаб уменьшения			
			1	1/2	1/4	1/8
1	1	5.5143	0.9078	0.8593	0.6249	0.4558
	2	5.5676	0.8495	0.8047	0.6040	0.4388
	3	4.9444	0.7602	0.7339	0.5702	0.4288
	4	4.3784	0.6463	0.6220	0.5236	0.4235
	5	3.8649	0.5212	0.5150	0.4508	0.3671
2	1	5.7429	0.7187	0.7344	0.5234	0.4344
	2	5.3429	0.5858	0.6098	0.4491	0.3824
	3	5.2222	0.4392	0.4676	0.3813	0.3477
	4	4.1944	0.3167	0.3421	0.2884	0.2766
	5	3.9730	0.2278	0.2410	0.2099	0.2019

Из табл. 1 видно, что, хотя мера сходства уменьшается при уменьшении размера изображения, однако корреляция со значениями экспертных оценок MOS сохраняется, причём такая ситуация наблюдается и при других типах искажений. Поэтому в таких случаях можно ожидать высоких значений корреляции по Спирмену.

2. Представляет интерес вопрос о том, насколько сохраняются обнаруженные в предыдущем пункте закономерности при других типах искажений. Здесь следует отметить, что, поскольку используется градиентный метод, результат оценивания качества изображения при приложении к нему того или иного метода искажения неизбежно будет зависеть от того, насколько этот метод изменяет структурные свойства изображения. Это

обстоятельство наглядно демонстрируется в работах [5–6] и также проявляется в настоящем исследовании.

В табл. 2 приведены средние значения коэффициента корреляции по Спирмену, рассчитанные относительно всех изображений с исходными размерами. Выбраны типы искажений 1, 3 и 19, при которых индивидуальные значения коэффициента корреляции достаточно высокие и типы 8 и 17, при которых эти значения имеют хаотичный характер и даже на некоторых изображениях принимают отрицательные значения. Отдельными исследованиями можно показать, что эти типы искажений действительно меняют структурные свойства изображений. При этом степень изменения структурных свойств зависит также от самого изображения.

Таблица 2. Средние значения коэффициента корреляции по Спирмену уменьшённых образцов изображений для пяти типов искажений

Тип искажения	Масштаб уменьшения			
	1	1/2	1/4	1/8
1	0.9833	0.9833	0.9833	0.9625
3	0.9833	0.9833	0.9833	0.9583
8	0.4958	0.4417	-0.7542	-0.3456
17	0.4646	0.0083	-0.1625	-0.1167
19	0.9812	0.9833	0.9833	0.9542

Обращают на себя внимание весьма высокие значения коэффициентов корреляции для одних типов искажений (1, 3, 19) и низкие значения при других типах (8 и 17). Этот эффект подчёркивает важность способности применяемого типа искажения изменить структурные свойства изображения. При этом имеет значение также количество и степень выраженности структурных элементов в изображении. Эти вопросы в настоящее время плохо изучены и нуждаются в дополнительном исследовании.

Заключение

В работе приведены результаты исследования влияния уменьшения размеров изображения на изменение оценки его качества. Показано, что для оценивания качества изображений предложенным методом можно сравнивать изображения с одинаковыми и разными размерами. Для каждого из сравниваемых изображений вычисляются параметры распределения Вейбулла, описывающего градиентное поле, затем применяется функция W^2 . В качестве экспериментального материала использовалась доступная база изображений TID2013, включающая 3000 изображений, искажённых 24 типами алгоритмов с пятью уровнями искажений. Каждое изображение уменьшалось

в 2, 4 и 8 раз двумя наиболее распространёнными методами и сравнивалось с исходным изображением-оригиналом. Сравнение осуществлялось при помощи коэффициента корреляции Спирмена.

В работе показана эффективность применения предложенного метода сравнения с эталоном и последующей методики обработки. Показано, что для определённых типов искажений, применённых к объектам базы TID2013, ухудшение качества изображений при уменьшении размеров происходит плавно, однако в полном соответствии с субъективными оценками, приведёнными в [1]. Выявлено, что есть и типы искажений, при которых изменение качества изображения при его масштабировании происходит достаточно хаотичным образом. Эти результаты показывают, что хорошие результаты получаются для типов искажений, мало влияющих на структурные свойства изображений.

Отметим, что выполненные исследование демонстрируют возможность сравнения изображений одной сцены, но разного разрешения с помощью функции W^2 , поскольку вычисление параметров распределения Вейбулла не зависит от количества пикселей в изображении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ponomarenko N.** Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives / N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola, B. Vozel, K. Chehdi, M. Carli, F. Battisti, C.-C. Jay Kuo // *Signal Processing: Image Communication*. – 2015. – V. 30. – P. 57–77.
2. **В.В. Старовойтов, Ф.В. Старовойтов.** Сравнительный анализ безэталонных мер оценки качества цифровых изображений // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2017. – № 1. – С. 24–32.
3. **Ю.И. Голуб, Ф.В. Старовойтов, В.В. Старовойтов.** Влияние уменьшения размеров изображения на вычисление оценки его качества // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2020. – № 2. – С. 35–45.
4. **Asatryan D., Egiazarian K.** Quality Assessment Measure Based on Image Structural Properties // *Proc. of the International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing, Finland, Helsinki, 2009*. – P. 70–73.
5. **Асатрян Д.Г.** Оценивание степени размытости изображения путём анализа градиентного поля // *Компьютерная оптика*. – 2017. – Том. 41. – № 6. – С. 957–962.
6. **Asatryan D.** A Novel Technique for No-Reference Image Quality Assessment // *Proceedings of International Conference on Computer Science and Information Technologies, 2019*. – P. 201–203.
7. **Asatryan D.** Gradient-based technique for image structural analysis and applications // *Computer Optics*. – 2019. – Vol. 43. – № 2. – P. 245–250.

REFERENCES

1. **N. Ponomarenko, L. Jin, O. Ieremeiev, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola, B. Vozel, K. Chehdi, M. Carli, F. Battisti, C.-C. Jay Kuo** // *Signal Processing: Image Communication*. – 2015. – V. 30. – P. 57–77.
2. **Starovoitov F.V., Starovoitov V.V.** Comparative analysis of no-reference quality measures for digital images // *System analysis and applied information science*. – 2017. – № 1. – С. 24–32.
3. **Y.I. Golub, F.V. Starovoitov, V.V. Starovoitov.** Impact of image size reducing for image quality assessment // *System analysis and applied information science*. – 2020. – № 2. – С. 35–45.
4. **Asatryan D., Egiazarian K.** Quality Assessment Measure Based on Image Structural Properties // *Proc. of the International Workshop on Local and Non-Local Approximation in Image Processing, Finland, Helsinki, 2009*. – P. 70–73.

5. **Asatryan D. G.** Image blur estimation using gradient field analysis [In Russian]. Computer Optics.– 2017.– Vol. 41.– № 6.– P. 957–962.
6. **Asatryan D.** A Novel Technique for No-Reference Image Quality Assessment // Proceedings of International Conference on Computer Science and Information Technologies, 2019.– P. 201–203.
7. **Asatryan D.** Gradient-based technique for image structural analysis and applications // Computer Optics.– 2019.– Vol. 43.– № 2.– P. 245–250.

Поступила
01.07.2020

После доработки
01.08.2020

Принята к печати
01.09.2020

ASATRYAN D. G.^{1, 2}, HARUTYUNYAN M. E.¹, GOLUB Y. I.³, STAROVOITOV V. V.³

INFLUENCE OF THE DISTORTION TYPE ON THE IMAGE QUALITY ASSESSMENT WHEN REDUCING ITS SIZES

Institute for Informatics and Automation Problems of the National Academy of Sciences of Armenia

2) Russian-Armenian university

3) United institute of informatics problems of the National Academy of Sciences of Belarus

In this paper, the influence of various types of distortion of an image on its quality while reducing its sizes, is investigated. To assess the image quality, it is proposed to use the method of comparison with the standard using a previously developed measure based on the proximity of the values of the parameters of the Weibull distribution, which describes the gradient field of the image. The well-known TID2013 image database was used as the material, which includes 3000 images distorted by 24 types of distorting algorithms with five levels. Each image of the base was reduced by 2, 4 and 8 times by the two most common methods and compared with the original image-original. The calculations were performed for five types of distortions implemented in the database. To make a decision on the acceptability of the applied quality measure, the calculated measure values were compared with the subjective quality ratings provided along with the documentation on the TID2013 database. The comparison was carried out using Spearman's correlation coefficient. It is shown that the average values of correlations for all images at three types of distortions are very high, while for the other two they are unacceptably low. An attempt has been made to explain this situation by the properties of distorting algorithms that change the structural properties of the image to varying degrees.

The possibility of comparing images of the same scene, but with different resolutions, is demonstrated.

Keywords. Digital image, image quality assessment, image reduction, image resolution, Spearman correlation, Weibull distribution.



Асатрян Давид Гегамович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики и автоматизации НАН Армении, руководитель Научно-исследовательского центра критических технологий Российско-Армянского университета.

Asatryan David – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Leading scientist of the Institute for Informatics and Automation Problems of NAS Armenia, Head of the Research Center for Critical Technologies of Russian-Armenian university.

Email: dasat@ipia.sci.am.



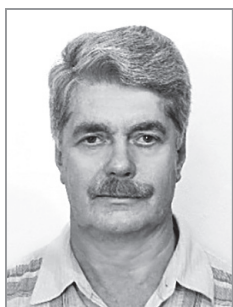
Арутюнян Мариам Евгеньевна – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий отделом Теории информации и статистических моделей Института проблем информатики и автоматизации НАН Армении.

Haroutunian Mariam – Doctor of Sciences, Professor, Leading researcher, head of department for Information theory and statistical models of the Institute for Informatics and Automation Problems of NAS Armenia.

Email: armar@sci.am.



Голуб Юлия Игоревна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси». Yuliya I. Golub – PhD, Associate Professor, Senior Research Fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus. Email: 6423506 @ gmail.com.



Старовойтов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор. Главный научный сотрудник ОИПИ НАН Беларуси. Сфера научных интересов: обработка и анализ цифровых изображений, полученных в разных участках электромагнитного спектра. Starovoirov Valery, Doctor of Sciences and professor of computer science. He is a Principal research fellow at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus (UIIP NAN Belarus). Research interests of professor Starovoirov are processing and analysis of digital images obtained in different parts of the electromagnetic spectrum.

С. А. ЗОЛОТАРЕВ¹, П. С. САВЕНЯ¹, К. А. ЖУКОВ¹, М. А. СЕДНИНА²

МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННЕЙ ДЕФЕКТНОСТИ СТенок МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

¹ ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

² Белорусский национальный технический университет

Обсуждается возможность точной оценки толщины стенки трубы, измеренной непосредственно из реконструированного изображения трубы, восстановленного из всего лишь из нескольких рентгеновских проекций, сделанных в ограниченном угле обзора. Поскольку эффекты рассеяния излучения и ужесточения рентгеновского пучка искажают до 50% первичного излучения, игнорирование этих эффектов приводит к смазыванию изображения, сильным артефактам, и неточному определению размеров. Была разработана компьютеризированная методика, которая учитывает вклад рассеянного излучения, и ужесточения рентгеновского пучка. Итерационные методы Байесовской реконструкции затем используются для восстановления изображения трубы, с использованием объемного и поверхностно-ориентированного представления трубы. Применяя эти методы, погрешность оценки толщины стенки трубы может быть доведена до 300 мкм.

Введение

Исследование относится к области рентгеновского контроля труб и полых объектов, имеющих продольное осевое направление, и может быть использовано для осуществления томографической реконструкции, как их внутренней поверхности, так и изображений внутренних неоднородностей в стенках труб, а также для определения толщины вышеуказанных стенок. Наиболее близким техническим решением является рентгеновская система для неразрушающего контроля цилиндрических и трубчатых объектов, описанная в американском патенте US 8,774,349 [1]. В нем описано устройство для неразрушающего контроля труб путем просвечивания их рентгеновским источником, который может перемещаться как параллельно вдоль оси трубы, так и осуществлять вращательное движение вокруг оси параллельной оси трубы или совпадающей с продольной осью трубы. При вращении источника вокруг оси трубы максимальный угол поворота составляет 180 градусов плюс угол раскрытия конусного пучка. Таким образом, в последнем случае рентгеновская система позволяет осуществлять трехмерную коническую реконструкцию изображения участка трубы. Главным недостатком описанной технологии является то, что при движении рентгеновского источника вдоль продольной

оси трубы уже сама схема сбора рентгеновских данных ограничивает угол обзора контролируемого участка трубы диапазоном от примерно 45 градусов до 60 градусов. Это позволяет реконструировать примерное местоположение и приближенную форму только высококонтрастных деталей внутри стенки трубы (трещины, поры, шлаки в сварном шве). Реконструкция формы внешней и внутренней поверхности и ее пространственного расположения невозможны в силу слишком малого угла обзора. Целью работы является повышение точности определения толщины стенок труб и полых объектов, имеющих продольное осевое направление, также пространственного расположения, конфигурации и геометрических размеров внутренних дефектов для труб большого диаметра.

2. Описание алгоритма реконструкции изображения трубы

Поставленная цель достигается тем, что во – первых, для определения толщины стенок трубы предложено использовать разработанный авторами метод трехмерной оболочечной реконструкции внутренней поверхности труб, опубликованный в статье [2] и монографии [3]. Введем основные обозначения, которые будут использованы при дальнейшем описании используемого метода реконструкции.

Внутренняя оболочка задается узловыми точками в цилиндрической системе координат $\rho(\varphi, y)$, полученными дискретизацией по полярному углу $\{\varphi_k : k = \overline{1, K}\}$, и полярной оси $\{y_l : l = \overline{1, L}\}$, которая совпадает с осью ординат декартовой системы координат. Цилиндрическая система координат используется только для первоначальной дискретизации внутренней оболочки. Все дальнейшие операции выполняются в декартовой системе координат. Сетки по полярному углу и оси ординат будем считать равномерными. Заметим, что $I = K * L$. Далее рассмотрим нелинейное операторное уравнение

$$A(\vec{R}(M)) = \vec{F},$$

где $\vec{F}$ – совокупность измеренных рентгеновских лучевых сумм для N проекций:

$$\vec{F} = \{f_n^m\}; n = \overline{1, N};$$

где функция $f_n^m(p)$ – измеренные лучевые суммы на n -ой проекции,

$\{p_j^n : j = \overline{1, J_n}\}$ – позиции пикселей n -ой проекции,

ϑ_n – угол проецирования для n -ой проекции,

$J = \sum J_n$ – суммарное число пикселей на всех проекциях.

Вектор $\vec{R}(M)$ – радиус-вектор текущей точки внутренней поверхности трубы $M(x, y, z)$, $\{M_i : i = \overline{1, I}\}$ – позиции узлов решетки вышеуказанной внутренней поверхности. Оператор A связывает внутреннюю поверхность S , определяемую как годограф конца вектора $\vec{R}(M)$ и проекции объекта, т.е. $A(\vec{R}(M)) = \{(A(\vec{R}(M)))_n\}, n = \overline{1, N};$ здесь $(A(\vec{R}(M)))_n = f_n^c(p)$ – расчетные лучевые суммы n -ой проекции. Для проецирования объекта контроля на плоскость детекторов мы будем рассматривать внутреннюю поверхность как совокупность элементарных поверхностных элементов $S_u : u = \overline{1, U}, U = 2 * K * (L - 1)$. Каждый такой элемент представляет собой треугольник, вершинами которого являются узловые точки дискретной решетки. Тогда $S = \bigcup S_u, S_{u_1} \cap S_{u_2} = 0, u_1 \neq u_2$. Отметим, что границы треугольника (т.е. его стороны и вершины) не обязательно принадлежат этому поверхностному элементу. Проекцию элемента поверхности S_u на детектор для некоторого

фиксированного положения пары источник-детектор n обозначим через σ_u^n . Разбиение поверхности осуществляется таким образом, что соприкасающиеся стороны соседних треугольников и их общие вершины будут принадлежать только одному из них. Такое разбиение всегда возможно и является неединственным. Оно может быть осуществлено двумя путями:

1) до начала реконструкции определенным образом маркируются границы каждого треугольника, затем, чтобы они не имели общих точек с границами соседних треугольников;

2) в процессе реконструкции принадлежность границ к элементу поверхности S_u определяется по проекции данного треугольника σ_u^n на текущем фильме. Это может быть установлено по топологической ориентации проекции поверхностного элемента σ_u^n на плоскости фильма. Далее осуществляется последовательный перебор всех элементов граничной оболочки и для каждого из них а) находится проекция треугольника S_u на текущую плоскость детекторов; б) устанавливаются границы треугольника σ_u^n ; в) определяются все пиксели $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$, центры которых лежат внутри треугольника σ_u^n или на его границах; г) рассчитываются точки пересечения лучей, проходящих через центры внутренних и граничных пикселей треугольника σ_u^n с поверхностью объекта.

После определения всех точек пересечения, лежащих на конкретном луче, осуществляется их сортировка по возрастанию, либо убыванию параметра прямой, на которой лежит луч. Число точек пересечения для каждого луча всегда будет четным. Вычисляя расстояния между соответствующими парами точек и суммируя их, мы определим лучевую сумму $f_n^c(p)$ для пикселя $p_j^n : j = \overline{1, J_n}$ определяющего данный луч. Таким образом, после обхода всех проекций мы определим все расчетные лучевые суммы. Функционал

$$\delta_n(\vec{R}(M)) = \sum_{p_i^n}^{p_{J_n}^n} (f_n^c(p) - f_n^m(p)) \left(/ \sum_{p_i^n}^{p_{J_n}^n} f_n^m(p) \right)$$

измеряет отклонение внутренней поверхности S , заданной дискретной решеткой узлов $M_i, i = \overline{1, I}$ от точной внутренней поверхности, для n -ой проекции. Среднее значение отклонения $\delta_{mid}(\vec{R}(M)) = \sum_n \delta_n(\vec{R}(M)) / N$.

Далее осуществляется деформация внутренней поверхности трубчатого объекта. Для этого осуществляется последовательный перебор всех узловых точек граничной поверхности $M_i, i = \overline{1, I}$. Через каждую узловую точку M_i проводим N лучей, которые пересекут соответствующую плоскость детекторов в пикселях $p_j^n, n = \overline{1, N}$. Для вышеуказанных пикселей вычисляем разности между измеренными и вычисленными значениями лучевых проекционных интегралов $\Delta f_n(p) = f_n^c(p) - f_n^m(p)$. Потом находим взвешенную среднюю разность

$$\Sigma(M_i) = \sum_n \Delta f_n(p) * \cos(\psi_i^n) / N,$$

где ψ_i^n – это угол между проекциями на плоскость перпендикулярную оси ординат (напомним, что конический источник вращается вокруг оси ординат) луча проведенного через данный узел M_i от источника расположенного под углом ϑ_n и радиус-вектора $\vec{R}(M_i)$. Величина смещения узла M_i будет равна

$$h(M_i) = \lambda^{(0)} * \Sigma(M_i),$$

$$0 < \lambda^{(0)} < 1,$$

где $\lambda^{(0)}$ – величина параметра релаксации для 1-й итерации. Смещение производится вдоль перпендикуляра, опущенного из данного узла M_i на ось ординат. Если в среднем рассчитанные лучевые суммы больше, чем измеренные, то смещение $h(M_i)$ будет положительным. Это приведет к увеличению расстояния между узлом и осью ординат, т.е. толщина стенки трубчатого объекта станет меньше. Смещение внутренней поверхности осуществляется для всех

узловых точек $M_i, i = \overline{1, I}$ одновременно. После смещения всех узловых точек M_i мы получим новую дискретную решетку $M_i^{(1)}, i = \overline{1, I}$. Для $(q+1)$ -ой итерации будем иметь соответственно:

$$\Sigma(M_i^{(q)}) = \sum_n \Delta f_n^{(q)}(p) * \cos(\psi_i^n) / N,$$

$$h(M_i^{(q)}) = \lambda^{(q)} * \Sigma(M_i^{(q)}),$$

$$0 < \lambda^{(q)} < 1.$$

После внесения очередного массива поправок $h(M_i^{(q)}), i = \overline{1, I}$ мы получим очередное приближение $\vec{R}(M_i^{(q+1)}), i = \overline{1, I}$. Итерационный процесс останавливается, если для трех последовательных итераций не удастся получить лучшее приближение. То есть, если справедливы неравенства

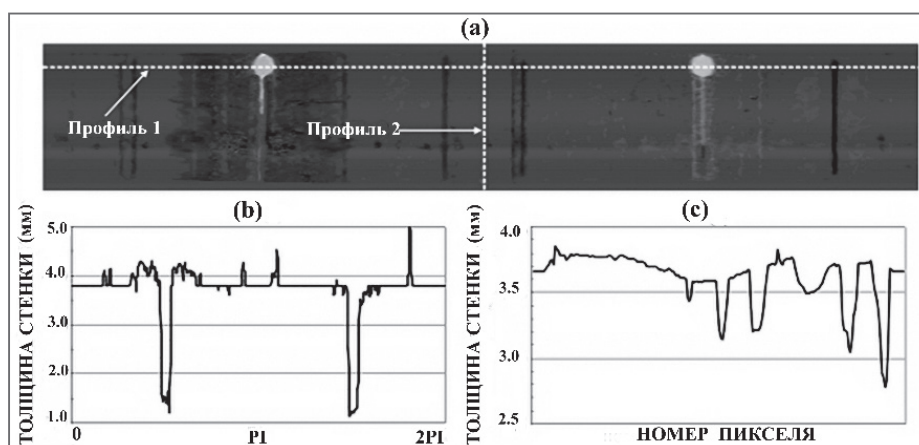
$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-1)}))$$

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-2)}))$$

$$\delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q)})) \geq \delta_{mid}(\vec{R}(M^{(q-3)})).$$

3. Примеры реконструкции изображений промышленных объектов

В БАМ (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung или БАМ, Берлин) была произведена реконструкция внутренней поверхности тестовой трубы из нержавеющей стали. Внешний диаметр трубы был равен 112 мм. Толщина стенки равнялась 3.6 мм. Внутренняя поверхность трубы имела впадины и выпуклости различных размеров. Число итераций равнялось 10–15. Функционал невязки минимизировался



(a) – Развертка трубы вместе с геометрическим расположением двух профилей
(b) – Профиль трубы по окружности – (Профиль 1) (c) – Профиль трубы вдоль продольной оси – (Профиль 2)

Рисунок 1 – Внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу

до значения 0.0785. В сравнении с реальным тестовым объектом было установлено, что погрешность реконструкции была порядка 2%, а величина артефактов – 1%. Среднее отклонение реконструированного переменного внутреннего радиуса трубы от истинного значения в тех местах, где не было выступов и впадин равно 100 мкм. На рис. 1 показана реконструированная внутренняя поверхность трубы, развернутая по полярному углу.

После реконструкции внутренней поверхности для труб большого диаметра с целью определения толщины стенок производится рентгеновское сканирование вышеупомянутой трубы согласно схеме, приведенной на рис. 2.

Идея данного подхода заключается в том, что реконструкция осуществляется по неполным данным, согласно схеме, приведенной на рис. 2. Для этого в программе реконструкции задаются размеры областей рентгеновских проекций, находящихся на краях двумерных цифровых изображений, сформированных плоскими матрицами детекторов, которые не будут использоваться в процессе реконструкции. Приведем пример использования вышеприведенной схемы сбора рентгеновских данных. Для проверки возможности реализации предлагаемой методики сначала был рассчитан спектр рентгеновской трубки для напряжения 320 кВ. Было смоделировано трехмерное модельное изображение трубы с внешним диаметром 120 мм и внутренним диаметром 104 мм. В центре трубы был смоделирован сварной шов, который на 2 мм выступал наружу и внутрь трубы. В центральную часть сварного шва были введены дефекты, которые представляли собой трещины различной конфигурации шириной в один воксель и круглая пора размером в два вокселя. Изображение сечения трубы в месте расположения дефектов представлено на рис. 3.

На модельные проекции дополнительно был наложен шум амплитудой 4%.

Далее на рис. 4 показано реконструированное изображение поперечного слоя трубы, в котором находятся дефекты, полученное по полным данным.

На рис. 5 показано изображение поперечного слоя трубы, для реконструкции по тем же модельным проекциям, но без использования прямоугольных областей, находящихся на расстоянии 68 пикселей слева и справа от краев трубы.

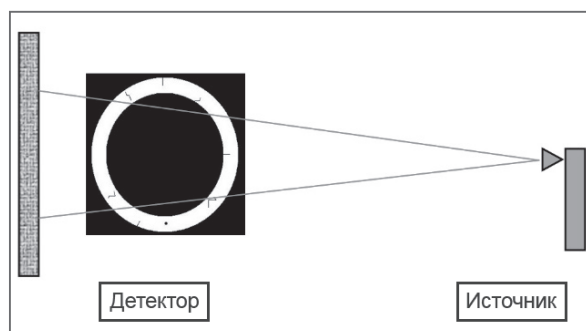


Рис. 2. Схема сканирования трубы ограниченным рентгеновским пучком

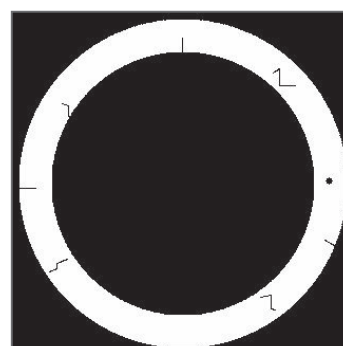


Рис. 3. Сечение модельной трубы в месте расположения дефектов

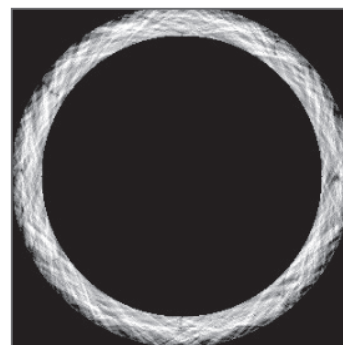


Рис. 4. Изображение поперечного слоя трубы, реконструированное по рентгеновским данным для полного рентгеновского пучка

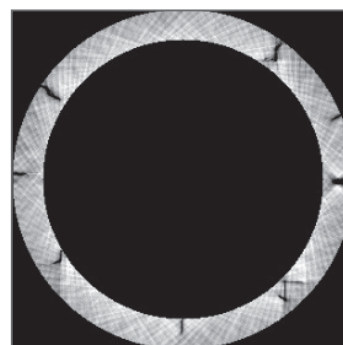


Рис. 5. Изображение поперечного слоя трубы, реконструированное по рентгеновским данным для ограниченного рентгеновского пучка

Заключение

Сравнение изображения, реконструированного по рентгеновским данным для ограниченного рентгеновского пучка с исходным модельным изображением (см. рисунок 3) показало, что пространственное положение, конфигурация и геометрические размеры дефектов восстановлены с достаточной для практических целей точностью.

Техническим результатом осуществления предлагаемого способа является

повышение точности определения толщины стенок труб и полых трубчатых объектов, имеющих продольное осевое направление, а также пространственного расположения, конфигурации и геометрических размеров внутренних дефектов для труб большого диаметра даже при наличии существенной модельной неопределенности на проекциях краев трубы (эффект ужесточения рентгеновского пучка плюс дополнительное рассеяние).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 8774349 США, МКИ G01N 023/04. Устройство и способ неразрушающего контроля объектов контроля цилиндрической или трубчатой формы с помощью рентгеновских лучей / Yxlon International GmbH, Гамбург (Германия). – № 13/142442; Заявлено 21.12.2009; Опубл. 08.07.2014; – 9 с., 3 л. ил.
2. Золотарев С.А., Венгринович В.Л., Тиллак Г.-Р. 3-х мерная реконструкция внутренней поверхности двухсвязного бинарного объекта по малому числу проекций // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2001. – № 2. – С. 8–11.
3. Венгринович В.Л., Золотарев С.А. Итерационные методы томографии // – Минск: «Белорусская наука», – 2009. – 227 с.

REFERENCES

1. Pat. US 8774349, IPC G01N 023/04. An apparatus and method for non-destructive inspection and testing of objects of cylindrical or tubular shape by using an X-ray radiographic / YXLON International GmbH, Hamburg (Germany). – № 13/142442; Stated 21.12.2009; Publ. 07/08/2014; – 9 with 3 l. yl.
2. Zolotarev S.A., Vengrinovich V.L., Tillack G.R. Three-Dimensional Reconstruction of the Inner Surface of a two-bound binary object by a small number of projections – Kiev, 2001. – number 2 – pp. 8–11.
3. Vengrinovich V.L., Zolotarev S.A. Iterative methods of tomography // – Minsk „Belarusian Science“ – 2009. – 227 p.

Поступила
01.08.2020

После доработки
21.08.2020

Принята к печати
01.09.2020

ZOLOTAREV S. A.¹, SAVENIA P. S.¹, ZHUKOV K. A.¹, SEDNINA M. A.²

METHOD OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF THICKNESS AND INTERNAL DEFECTIVITY OF THE WALLS OF METAL PIPE

The possibility of an accurate estimation of the pipe wall thickness measured directly from the reconstructed image of the pipe, reconstructed from only a few X-ray projections made in a limited viewing angle, is discussed. Since the effects of radiation scattering and X-ray beam hardening distort up to 50% of the primary radiation, ignoring these effects leads to blurred images, strong artifacts, and inaccurate sizing. A computerized technique has been developed that takes into account the contribution of scattered radiation and the hardening of the X-ray beam. Iterative Bayesian reconstruction techniques are then used to reconstruct the pipe image using the volumetric and surface-oriented representation of the pipe. Using these methods, the error in estimating the pipe wall thickness can be increased to 300 microns.



Золотарев Сергей Алексеевич. Специалист в области: решение обратных задач из неполных данных и качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Разработчик алгоритмов и программного обеспечения для КТ объектов с ограниченным углом обзора и небольшим числом проекций. Разработчик оболочечных методов реконструкции изображений кусочно-однородных объектов, имеющих конечное число различных однородных частей. Разработчик новых параллельных алгоритмов с использованием графических процессоров и использованием системы MPI для реконструкции изображений.

E-mail: sergei.zolotarev@gmail.com.



Савеня Павел Сергеевич. Автор научных публикаций с докладами в материалах университетских конференциях. Область научных интересов: искусственный интеллект, компьютерная графика и визуализация, мониторинг строительных конструкций.
E-mail: savenia@iaph.bas-net.by.



Жуков Константин Андреевич. Автоматизация технических процессов, реконструктивная томография, базы данных и базы знаний, компьютерная графика и визуализация.
E-mail: kosty.zhukov.2011@gmail.com.



Седнина Марина Александровна. Автор двух научных публикаций с докладами в материалах университетской, республиканской и международной конференциях. Область научных интересов: системный анализ, ERP-системы.
E-mail: sednina@bntu.by.

К. С. КУРОЧКА, В. И. ТОКОЧАКОВ, Е. А. КАРАБЧИКОВА, К. А. ПАНАРИН

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6–10 кВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь

В настоящее время при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем особое внимание уделяется прогнозированию возникновения аварийных ситуаций и минимизации потерь в случае их появления. Наиболее распространённым методом исследования перенапряжений являются применение имитационных моделей в специализированных прикладных пакетах, что накладывает дополнительные квалификационные требования на энергетика-проектировщика.

Авторами предлагается технологии моделирования и программное средство для моделирования и исследования перенапряжений, возникающих в распределительных сетях 6–10 кВ при однофазных замыканиях на землю, включающее методику визуального проектирования распределительной сети посредством применения информационных технологий и автоматизированную генерацию математической модели для её дальнейшего исследования с целью анализа перенапряжений.

Введение

В настоящее время при проектировании и эксплуатации электроэнергетических систем особое внимание уделяется прогнозированию возникновения аварийных ситуаций и минимизации потерь в случае их появления.

В Республике Беларусь протяженность линий электропередач напряжением 6–10 кВ составляет более 123 тыс. км (45% от суммарной протяженности всех линий электропередач). Повреждаемость 5 случаев в год на 100 км. Основные причины износ материалов и атмосферные воздействия – до 80% [1]. Наиболее серьёзные повреждения вызываются однофазными замыканиями на землю, сопровождающиеся горением дуги, и приводят к большим кратностям перенапряжений [2], пробоям изоляции электрооборудования и электрических машин, а само воздействие дуги приводит к разрушению изоляции и других конструкций электрооборудования и сетей.

Значительно снизить финансовые потери и вероятность возникновения повреждений возможно на этапах проектирования новых подстанций или их реконструкции, если воспользоваться информацией о возможных кратностях перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

Наиболее распространённым методом исследования перенапряжений являются применение имитационных моделей, реализованных в специализированных математических программных пакетах или отдельных программных средств [3, 4].

Имитационное моделирование процессов, возникающих в распределительных сетях электроэнергетических систем при однофазных замыканиях на землю, позволяет получить достаточно достоверную картину изменения токов и напряжений на элементах сети [5]. Однако их практическое применение затруднено необходимостью составления имитационной модели в специализированном прикладном пакете, что накладывает дополнительные квалификационные требования на энергетика-проектировщика. От которого требуются знания не только в области электроснабжения, но и быть квалифицированным математиком и серьёзным специалистом в сфере информационных технологий. Как правило, подобные специалисты широкого профиля на рынке труда практически отсутствуют.

Таким образом актуальной является задача разработки технологии моделирования и соответствующих программных средств для исследования перенапряжений в распределительных сетях 6–10 кВ при однофазных

замыканиях на землю доступных широкому спектру инженеров-электриков.

Данная технология должна включать методику визуального проектирования распределительной сети посредством применения информационных технологий, автоматизированную генерацию математической модели и её дальнейшее исследование с целью анализа перенапряжений.

Решение указанной задачи невозможно без применения компьютерного моделирования на основе системного подхода [6].

Построение математической модели перенапряжений распределительной сети напряжением 6–10 кВ

На практике для описания распределительной сети (рис. 1) используют специальные средства функционального моделирования. К сожалению, задача построения математической модели на основе функциональной схемы является весьма сложной и в настоящее время формализована только для определённого класса систем [7, 8].

Т.о. требуется решить задачу автоматизации построения аналитической или численно-аналитической математической модели сложной системы, представляющей собой распределительную сеть с точки зрения моделирования перенапряжений.

Для этих целей адаптируем подход, предложенный в [7], и в результате чего представим решение задачи в виде реализации следующих этапов:

1. построение функциональной модели распределительной сети 6–10 кВ, включая обоснование некоторых допущений или ограничений для модели;
2. автоматизированное построение численно-аналитической модели распределительной сети 6–10 кВ;
3. численное моделирование и исследование влияния возникающих перенапряжений на функционирование всех элементов сети.

При исследовании системы воспользуемся микроподходом [6]. Выделим элементы системы, представляющие собой взаимодействующее различное электроэнергетическое оборудование (рис. 1).

Каждому элементу системы поставим в соответствие элемент функциональной модели. Построим математическую модель для i -го элемента системы в виде

$$\Phi_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, t) = 0, \quad (1)$$

где Φ_i – функционал связи элементов математической модели; $\mathbf{x}$ – вектор входных переменных, $\mathbf{x} = \{x_1(t), x_2(t) \dots x_n(t)\}$; $\mathbf{y}$ – вектор выходных переменных, $\mathbf{y} = \{y_1(t), y_2(t) \dots y_m(t)\}$; $\mathbf{z}$ – вектор внешних воздействий, $\mathbf{z} = \{z_1(t), z_2(t) \dots z_r(t)\}$; t – время. Функционал связи Φ_i , как правило, представляет собой решение дифференциального уравнения [9].

Система интегральных и дифференциальных уравнений, составленных в соответствии с законами Кирхгофа или методом контурных токов [9], может быть сведена путем

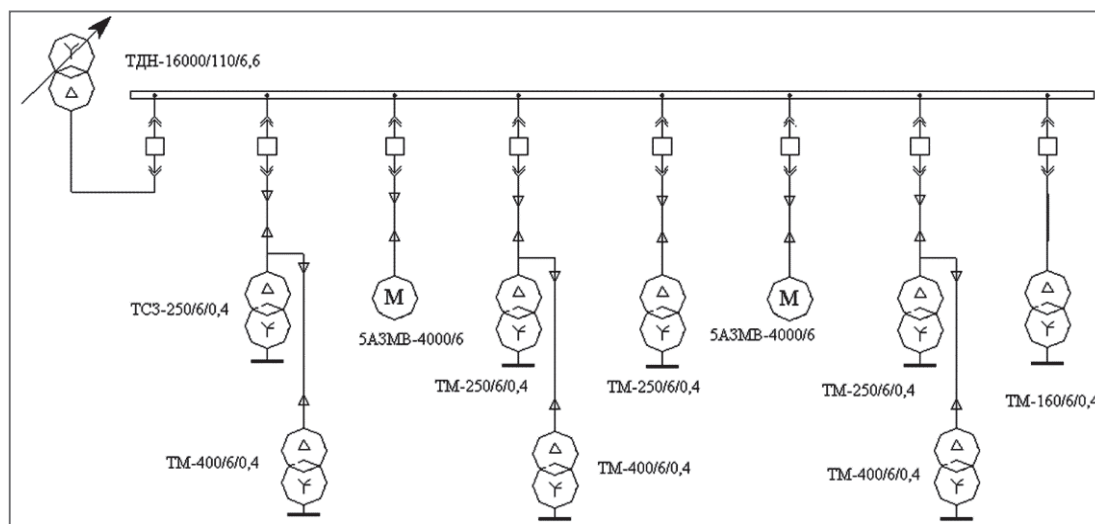


Рисунок 1 – Схема распределительной сети 6–10 кВ предприятия

подстановки к одному дифференциальному уравнению, которое используется для составления характеристического уравнения.

Порядок дифференциального и характеристического уравнения зависит от числа реактивных элементов приведенной схемы. Главная трудность в решении задачи классическим методом для уравнений высоких порядков состоит в отыскании корней характеристического уравнения и постоянных интегрирования. Поэтому для решения уравнений порядка выше второго применяют другие методы, в частности операторный метод [9], основанный на применении преобразования Лапласа и исключающий трудоемкую процедуру отыскания постоянных интегрирования.

Определим иерархические связи между элементами функциональной модели. Введём понятие уровня (слоя) в функциональной модели. Таким образом, элементы могут располагаться на различных уровнях модели. Уровни между собой взаимодействуют последовательно, т.е. пока не выполняются все элементы нижнего уровня, переход к элементам следующего уровня невозможен. Элементы одного уровня функциональной модели могут выполняться совместно (параллельно).

Выделим две основные группы элементов: воздушные и кабельные линии электропередач и трансформаторы двухобмоточные. Внутри каждой группы можно выделить ряд элементов [9], характеризующихся своими физическими характеристиками, алгоритмами функционирования и обозначениями на схеме.

Воздушные и кабельные линии электропередач – описываются соотношениями:

$$\begin{cases} R_{\text{л}} = r_0 L, \\ X_{\text{л}} = x_0 L, \\ B_{\text{л}} = b_0 L, \\ Q_b = U^2 b_0 L = U^2 B_{\text{л}}, \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$ – активное и индуктивное сопротивление линии, Ом; r_0 – удельное активное сопротивление, Ом/км; x_0 – удельное индуктивное сопротивление, Ом/км; L – длина линии, км; b_0 – удельная емкостная проводимость линии, См/км; $B_{\text{л}}$ – емкостная проводимость линии, См; Q_b – зарядная мощность линии, Мвар; U – междуфазное напряжение, кВ.

Трансформаторы двухобмоточные – описываются соотношениями (3).

$$\begin{cases} R_{\text{т}} = \frac{\Delta P_k U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}^2}, \\ Z_{\text{т}} = \frac{10 U_k U_{\text{н}}^2}{S_{\text{н}}^2}, \\ X_{\text{т}} = \sqrt{Z_{\text{т}}^2 - R_{\text{т}}^2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{\text{т}}$ и $X_{\text{т}}$ – активное и индуктивное сопротивление трансформатора, Ом; $Z_{\text{т}}$ – полное сопротивление трансформатора, Ом; ΔP_k – потери короткого замыкания трансформатора, кВт; U_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; $S_{\text{н}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВа; $U_{\text{н}}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ.

Рассмотрим процесс однофазного замыкания на землю. Предположим, что в месте замыкания имеется активное (переходное) R_3 и индуктивное сопротивления X_3 . Появление сопротивления X_3 может быть обусловлено повреждением обмоток электрических машин потребителей. Если считать, что ток замыкания на землю в основном определяется емкостной проводимостью, то можно условно трехфазную схему замещения привести к однофазной схеме (рис. 2) [10]. В схеме замещения R общее активное сопротивление сети относительно земли, C – суммарная емкость сети относительно земли.

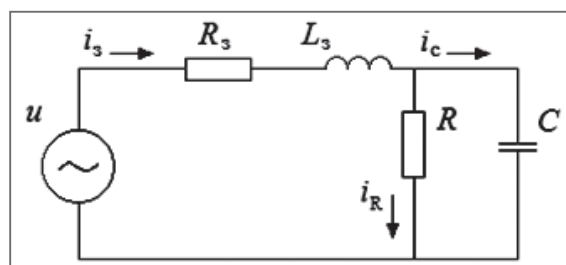


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения

Модель переходного процесса в пространстве состояний будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{di_3}{dt} = -\frac{R_3}{L_3} i_3 - \frac{1}{L_3} u_c + \frac{1}{L_3} u; \\ \frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{C} i_3 - \frac{1}{RC} u_c. \end{cases} \quad (4)$$

Данная модель в векторно-матричной форме можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dX(t)}{dt} &= FX(t) + Gu(t) = \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{R_3}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_3}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_3} \\ 0 \end{bmatrix} u(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Данный подход, примененный к упрощенной схеме (4)–(5), возможно использовать к более сложным схемам – записать систему уравнений первого и второго закона Кирхгофа, выделить переменные состояния (токи через индуктивности и напряжения на емкостях). Привести систему уравнений к нормальной форме Коши, задать начальные условия с учетом предыдущего режима – постоянство напряжений на емкостях и постоянство тока в индуктивностях.

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = k_{11}x_1 + k_{12}x_2 + \dots + k_{1n}x_n + g_1(t) \\ \frac{dx_2}{dt} = k_{21}x_1 + k_{22}x_2 + \dots + k_{2n}x_n + g_2(t) \\ \dots \\ \frac{dx_n}{dt} = k_{n1}x_1 + k_{n2}x_2 + \dots + k_{nn}x_n + g_n(t) \end{cases} \quad (6)$$

Интегрирование дифференциальных уравнений, представленных в форме Коши, выполняется методом Рунге-Кутты [11].

Для практических целей при анализе переходных процессов в любой схеме предлагается следующий алгоритм.

1. Рассчитать установившийся режим при $t \rightarrow \infty$. Определить принужденные токи и напряжения.

2. Рассчитать режим до коммутации. Определить токи в ветвях с индуктивностью и напряжения на конденсаторах. Значения этих величин в момент коммутации являются независимыми начальными условиями.

3. Составить дифференциальные уравнения для свободного процесса ($E = 0$) в схеме после коммутации по законам Кирхгофа или по методу контурных токов. Алгебраизировать данные уравнения, получить характеристическое уравнение и найти его корни. Существуют приемы, упрощающие операцию отыскания корней характеристического уравнения,

например, приравнивание нулю входного операторного сопротивления цепи, которое получается путем замены в выражении комплексного сопротивления цепи множителя « $j\omega$ » на оператор « p ».

4. Записать общие выражения для искомых напряжений и токов в соответствии с видом корней характеристического уравнения.

5. Переписать величины, полученные в п. 4, и производные от них при $t = 0$.

6. Определить необходимые зависимые начальные условия, используя независимые начальные условия. Время замыкания на землю фазы A задается равным 0,005 с.

7. Подставив начальные условия в уравнения п. 5, найти постоянные интегрирования.

8. Записать законы изменения искомых токов и напряжений. Кратности перенапряжений в фазах B и C рассчитываются по максимальной по модулю величине амплитуды напряжения. Например, амплитудные значения напряжения фазы B рассчитываются по формуле [2]:

$$u_b(t) = e_b(t) + u_{0\text{уст}}(t) - \Delta U_{0\text{уст}} e^{-t/\tau} \cos \omega' t, \quad (7)$$

где $e_b(t)$ – вынужденная составляющая напряжения фазы B ; $u_{0\text{уст}}(t)$ – установившаяся составляющая напряжения в нейтрали сети; $\Delta U_{0\text{уст}}$ – начальная амплитуда колебаний переходной составляющей напряжения; τ – постоянная времени переходного процесса; ω' – частота колебательного контура.

При программной реализации воспользуемся объектно-ориентированным подходом. Создадим иерархию классов, для хранения информации и методов каждого функционального элемента. На вершине иерархии определим абстрактный класс, описывающий общую структуру элемента системы. От него будем наследовать классы, определяющие группы элементов распределительной сети. Внизу иерархии будут находиться «экземплярные» классы, определяющие конкретные элементы системы.

Для реализации графического интерфейса и определения связей между элементами воспользуемся структурным шаблоном «декоратор» [12]. Создадим базовый абстрактный класс, предназначенный для осуществления визуализации произвольного элемента. Физические и функциональные свойства

каждого конкретного элемента схемы определим как «декорации» согласно шаблона проектирования.

Кроме того, определим интерфейс *IConnector*, определяющий собой коннектор элемента, необходимый для создания соединения и интерфейс *IConnection*, описывающий конкретные соединения между элементами.

Таким образом, вся распределительная сеть будет храниться в одной типизированной коллекции, которую для визуализации будут обрабатывать классы, реализующие интерфейс пользователя, а для исследования математической модели – специальный класс-решатель, содержащий набор математических методов и средств.

Построение математической модели перенапряжений распределительной сети 6–10 кВ осуществляется на основании функциональной модели по следующему алгоритму.

1. Выбираются элементы модели первого уровня.

2. Извлекаются математические модели каждого элемента и формируется общая модель уровня:

$$\begin{cases} \Phi_1(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0, \\ \Phi_2(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0, \\ \dots \\ \Phi_N(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, t) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

3. Учитываются известные значения векторов входных переменных и векторов внешних воздействий и решается система (7).

4. Сохраняются результаты решения и осуществляется переход на следующий уровень функциональной модели.

5. Проводится проверка на предмет рассмотрения всех уровней. В случае отрицательного ответа осуществляется переход на шаг 2.

Апробация предлагаемой методики построения математической модели

Согласно предложенной методике было разработано средствами С# настольное приложение и проведена его апробация на примере исследования перенапряжений распределительной сети напряжением 6–10 кВ.

Проведём верификацию разработанного программного обеспечения. Рассмотрим

возникновение однофазного замыкания на землю в распределительной сети 6–10 кВ небольшого промышленного предприятия (рис. 3), для которой известно численное решение с использованием специального средства функционального моделирования (рис. 4).

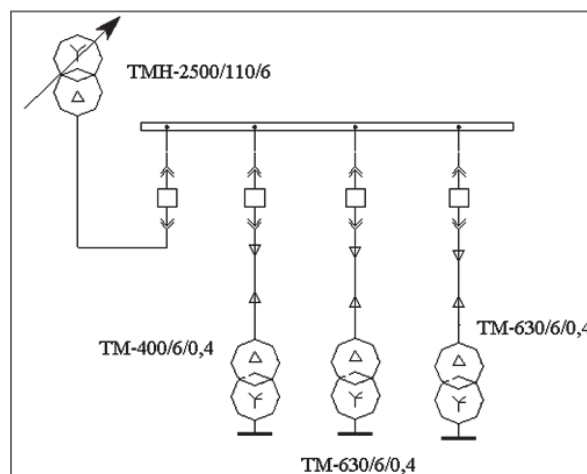


Рис. 3. Распределительная сеть 6–10 кВ промышленного предприятия малой мощности

С помощью разработанного программного обеспечения создадим виртуальную функциональную модель сети (рис. 5) и проведём исследование.

В результате получим графики (рис. 6), отражающие напряжение на фазах в точке замыкания относительно земли.

Как видно из результатов моделирования (рис. 4 и 6) кратности перенапряжений в фазах полученные с помощью разработанного программного комплекса отличаются не более чем на 5%. Кроме этого переходной процесс в среде функционального моделирования проходит в течении 0,005 с, а в разработанной программе – 0,05 с.

Выводы

1. Предлагаемая методика построения математических моделей может применяться для исследования перенапряжений в распределительной сети напряжением 6–10 кВ.
2. В связи с отличием времени переходного процесса в ходе проверки математической модели, следует провести дополнительные исследования и найти факторы, влияющие на частоту переходного процесса.

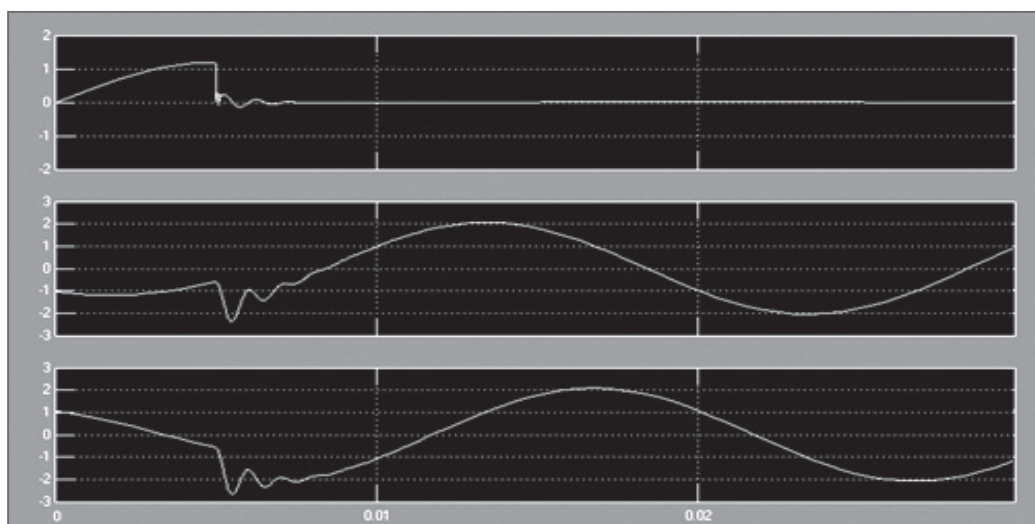


Рис. 4. Кратности перенапряжений в фазах в среде моделирования

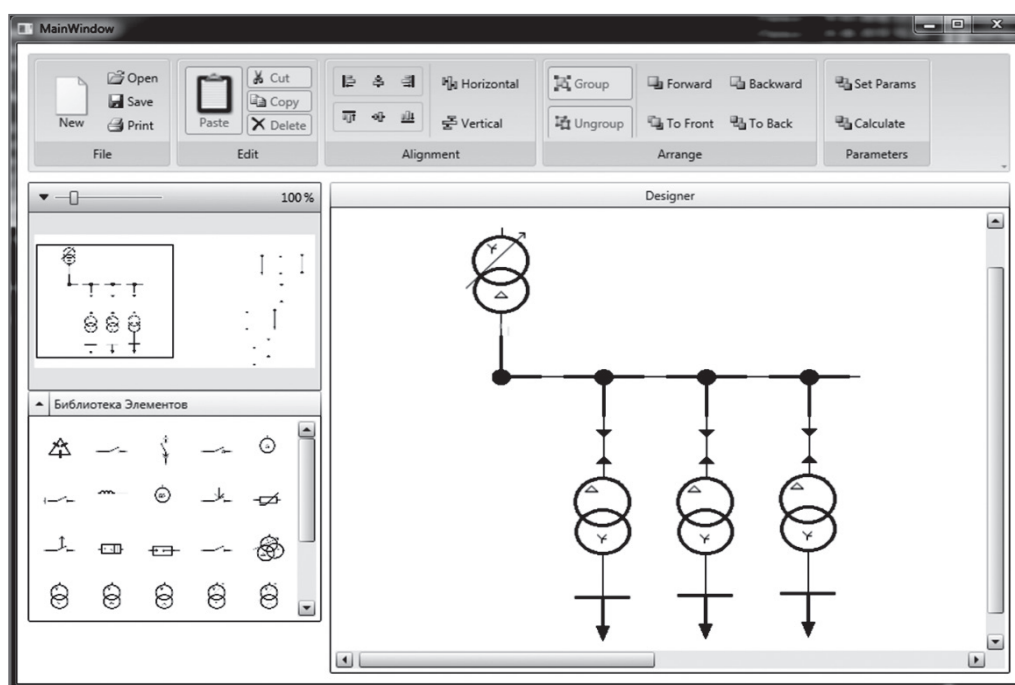


Рис. 5. Построение задачи в разработанной среде моделирования

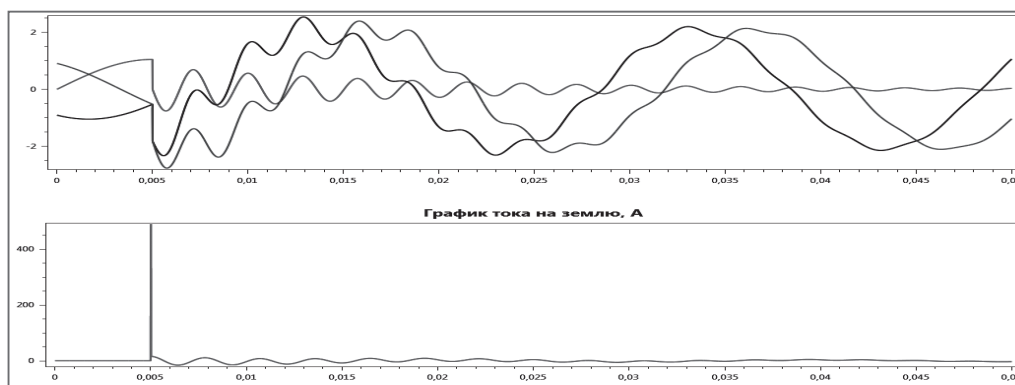


Рис. 6. Напряжения на фазах при переходном процессе

ЛИТЕРАТУРА

1. Концепция перспективного развития распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ Белорусской энергосистемы на ближайшую перспективу. – Минск: БелЭСП, 2014.
2. **Халилов, Ф. Х.** Классификация перенапряжений. Внутренние перенапряжения. / Ф. Х. Халилов. – Санкт-Петербург: Издание НОУ “Центр подготовки кадров энергетики”, 2012. – 80 с.
3. **Аверилл М. Лоу** Имитационное моделирование / Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. – СПб: Питер, 2004. – 848 с.
4. **Ощепков В. А.** Определение уровня перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов. / В. А. Ощепков, А. О. Шепелев, Н. С. Капитонов. // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 89–93.
5. **Кротенок, В. В.** Повышение эффективности ограничения перенапряжений в распределительной сети при дуговых замыканиях на землю: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / В. В. Кротенок. – Минск: БНТУ, 2010. – 25 с.
6. **Максимей И. В.** Математическое моделирование больших систем: Учебное пособие для спец. «Прикл. матем.» / И. В. Максимей. – Мн.: Выш. шк., 1985.
7. **Курочка К. С.** Об одном подходе к построению математической модели сложной системы по ее формальному описанию / К. С. Курочка, Н. А. Курочка // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2008. № 1 (32).
8. **Курочка, К. С.** Исследование математических моделей в ГРИД-средах / К. С. Курочка // Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. 2008. № 5. Ч. 1. С. 69–73.
9. **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник для бакалавров. / Л. А. Бессонов – М.: Юрайт-Издат, 2012. – 701 с.
10. **Голубева, Н. В.** Математическое моделирование систем и процессов: Учебное пособие. / Н. В. Голубева. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 192 с.
11. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
12. **Тепляков, С. В.** Паттерны проектирования на платформе.NET. – СПб.: Издательство «Питер», 2016. – 320 с.

REFERENCES

1. The concept of prospective development of 0.4–10 kV electrical distribution networks of the Belarusian energy system in the near future. – Minsk: BelESP, 2014.
2. **Halilov, F. H.** Overvoltage classification. Internal overvoltage. / F. H. Halilov. – Sankt-Peterburg: Izdanie NOU “Centr podgotovki kadrov jenergetiki”, 2012. – 80 p.
3. **Averill M. Lou** Simulation modeling / Аверилл М. Лоу, В. Дэвид Кельтон. Averill M. Lou, V. Djevid Kel'ton. – SPb: Piter, 2004. – 848 p.
4. **Oshhepkov V. A.** Determination of overvoltage level in networks with compensation of capacitive currents. / V. A. Oshhepkov, A. O. Shepelev, N. S. Kapitonov. // Omskij nauchnyj vestnik. 2016. № 5 (149). pp. 89–93.
5. **Krotенок, V. V.** Increasing the efficiency of overvoltage limiting in the distribution network with arc earth faults: Avtoref. Ph.D. thesis: 05.14.02 / V. V. Krotенок. – Minsk: BNTU, 2010. – 25 p.
6. **Maksimej I. V.** Mathematical Modeling of Large Systems: A Textbook for Specialists. «App. Math.» / I. V. Maksimej. – Mn.: Vysh. shk., 1985.
7. **Kurochka K. S.** On one approach to the construction of a mathematical model of a complex system according to its formal description / K. S. Kurochka, N. A. Kurochka // Vestnik GGTU im. P. O. Suhogo. 2008. № 1 (32).
8. **Kurochka K. S.** Study of mathematical models in GRID environments / K. S. Kurochka // Izvestija Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny. 2008. № 5. Ch. 1. pp. 69–73.
9. **Bessonov, L. A.** Theoretical basics of electrical engineering. Electrical circuits: Textbook for Bachelors. / L. A. Bessonov – M.: Jurajt-Izdat, 2012. – 701 p.
10. **Golubeva, N. V.** Mathematical modeling of systems and processes: A training manual. / N. V. Golubeva. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2016. – 192 p.
11. **Bronshtejn, I. N.** Mathematics handbook for engineers and university students. / I. N. Bronshtejn, K. A. Semendjaev. – M.: Nauka, 1986. – 544 p.
12. **Tepljakov, S. V.** Design Patterns on the.NET Platform. / S. V. Tepljakov, – SPb.: Izdatel'stvo «Piter», 2016. – 320 p.

Поступила
01.08.2020

После доработки
10.08.2020

Принята к печати
01.09.2020

KUROCHKA K. S., TOKOCHAKOV V. I., KARABCHIKOVA E. A., PANARYN K. A.

COMPUTER SIMULATION OF OVERVOLTAGES IN 6–10 kV DISTRIBUTION NETWORKS FOR SINGLE-PHASE GROUND FAULTS

Nowadays, when designing and operating electric power systems, special attention is paid to predicting emergency situations and minimizing losses in case they occur. The most common method of overvoltage investigations is the use of simulation models in specialized application packages, which imposes additional qualification requirements on the electrical engineer.

The authors propose modeling technologies and a software tool for modeling and research of overvoltages that occur in 6–10 kV distribution networks at single-phase ground faults, including the method of visual design of the distribution network through the use of information technology and automated generation of mathematical model for its further study to analyze overvoltages.



Курочка Константин Сергеевич, к.т.н, доцент, зав. кафедрой информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование, нейронные сети, программирование.

Kurochka Konstantin Sergeevich. Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling, neural networks, programming.

E-mail: kurochka@gstu.by.



Токочаков Владимир Иванович, к.т.н, доцент кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование физических систем.

Tokochakov Vladimir Ivanovich. Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling of physical systems.

E-mail: tokochakov@gstu.by.



Карабчикова Екатерина Анатольевна. Ассистент кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: нейронные сети, программирование.

Karabchikova Ekaterina Anatolievna. Assistant of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: neural networks, programming.

E-mail: catharine-diva@gstu.by.



Панарин Константин Александрович. Аспирант, инженер-программист кафедры информационных технологий ГГТУ им. П. О. Сухого, Область научных интересов: мат. моделирование, нейронные сети, программирование.

Panaryn Konstantin Aleksandrovich. Postgraduate, Software Engineer of the Department of Information Technology of GSTU, Area of scientific interests: mat. modeling, neural networks, programming.

E-mail: Logran2@gmail.com.

В. В. НАПРАСНИКОВ, Ю. В. ПОЛОЗКОВ, А. В. БОРОДУЛЯ, Д. П. КУНКЕВИЧ

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ В ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУРАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ

Белорусский национальный технический университет

При создании ячеистых структур одной из задач является исследование течений жидкостей в полостях структур, с целью получения данных о скоростях, давлениях и особенностях линий токов. Свойства ячеистых структур зависят от геометрии полостей и их взаимного расположения.

В статье приводится описание последовательности этапов моделирования течения жидкости в полостях ячеистых структур и результаты вариантных расчетов для различных видов таких структур.

Ключевые слова: геометрическая модель ячеистой структуры, этапы моделирования, течение жидкости в полостях.

Введение

При создании ячеистых структур одной из задач является повышение фильтрующих свойств таких структур.

Качество ячеистых структур зависит от геометрии полостей, таким образом, необходимо иметь возможность получения результатов виртуальных испытаний ячеистой структуры на предмет исследования течения жидкости в этой структуре.

Задачи работы:

- сформулировать этапы подготовки конечно-элементной модели ячеистой структуры, предназначенной для расчета скоростей, давлений и особенностей линий токов;
- выполнить постановку граничной задачи для определения скоростей и давлений в жидкости внутри полостей ячеистой структуры;
- для ячеистых структур различной геометрии выполнить вариантные расчеты для определения скоростей и давлений в жидкости внутри полостей структуры.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим движения несжимаемой вязкой жидкости с неизменными физическими свойствами. Поток ламинарный. Уравнения, описывающие движение несжимаемой вязкой жидкости, выражают сохранение массы и количества движения [1]:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{v} + \frac{1}{2} \nabla (\bar{v} \cdot \bar{v}) + (\nabla \times \bar{v}) \times \bar{v} + 2\bar{\Omega} \times \bar{v} + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \bar{F} - \nu \nabla \times (\nabla \times \bar{v}) \quad (2)$$

Здесь $\bar{v}$ – скорость частицы, измеряемая в системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\bar{\Omega}$; $\bar{r}$, t , P , ν , $\bar{F}$, ρ представляют соответственно радиус-вектор частицы, время, давление, плотность, кинематическую вязкость, массовую силу, отнесенную к единице массы и плотность. Массовая сила предполагается консервативной $\bar{F} = \nabla A$, так что ее вместе с центробежной силой и P можно записать в форме редуцированного давления

$$p = P + \rho A - \frac{1}{2} \rho (\bar{\Omega} \times \bar{r}) \cdot (\bar{\Omega} \times \bar{r}). \quad (3)$$

Это упрощает уравнение (2)

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{v} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} + 2\bar{\Omega} \times \bar{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nu \nabla \times (\nabla \times \bar{v}). \quad (4)$$

1. Этапы подготовки конечно-элементной модели

Соответствие этих этапов среде ANSYS CFX представлено на рис. 1 (сверху), а пример расчетной схемы проточной части внутренности структуры, состоящей из одной цепочки пакета полостей с учетом взаимного проникновения отдельных ячеек, на рис. 1 (внизу). Стрелками обозначены направления и интенсивность приложенных давлений на входе и выходе.

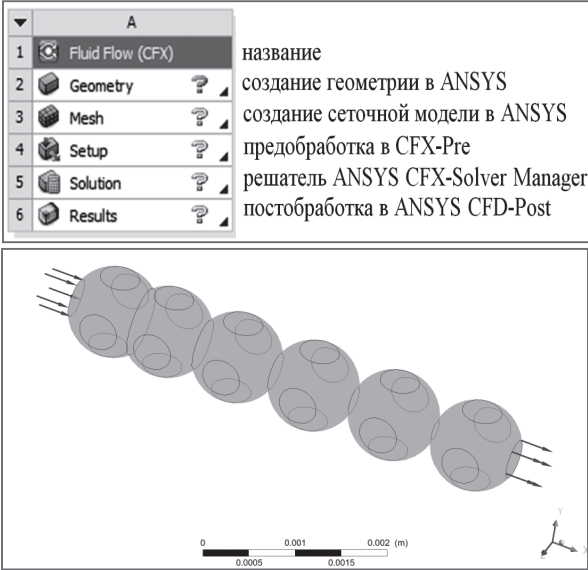


Рис. 1. Структура Fluid Flow (CFX) (сверху), пример расчетной схемы проточной части (внизу).

**Создание геометрической модели
в ANSYS DesignModeler**

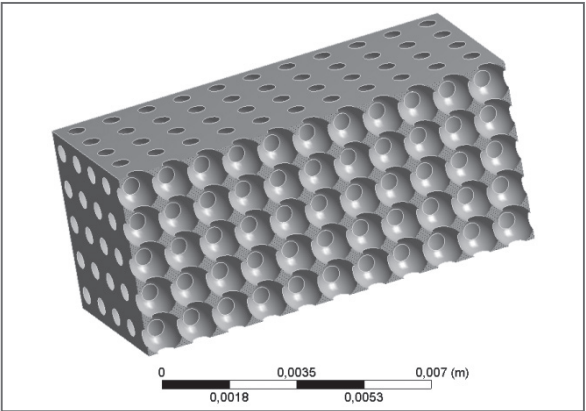
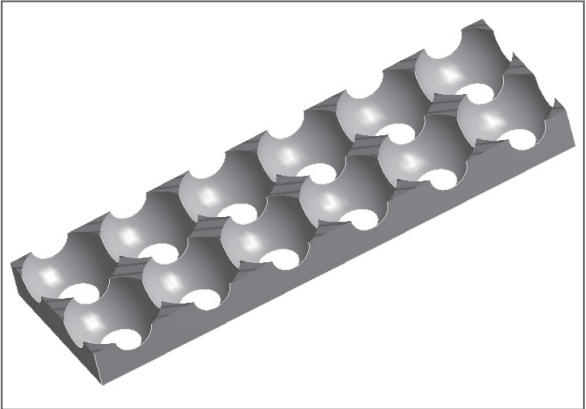
Построение геометрии для расчетов является ответственным и достаточно творческим процессом. От выполнения данного этапа моделирования во многом зависит качество и корректность расчета.

В статье [2] подробно обсуждается вопрос построения конфигурации ячеистых структур, некоторые примеры которых представлены на рис. 2, при этом использовалась среда инструмента Design Modeler, который предлагается как один из встроенных в пакет ANSYS Workbench. Этот современный пакет конечно-элементного моделирования в настоящее время активно используется для решения различных инженерных задач [3–10].

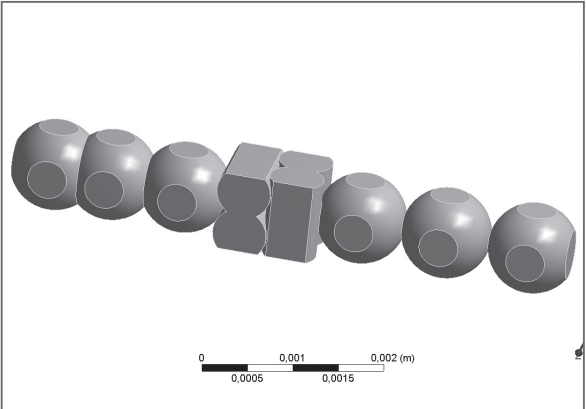
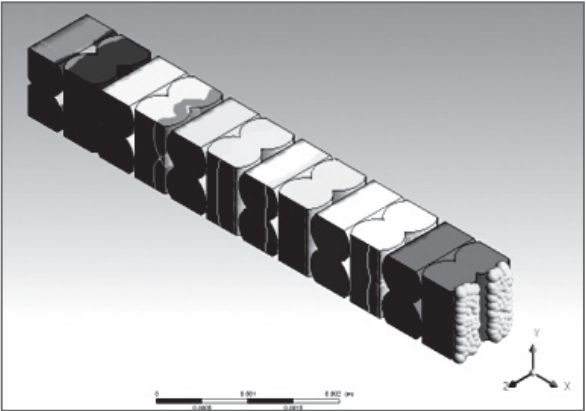
**Создание сеточной модели
в ANSYS Meshing**

Для создания новой сеточной модели следует выбрать «Mesh» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX) (рис. 3). В открывшейся программе Meshing в «Outline» выбрать «Mesh» – в нижней части программы «Details of Mesh» появятся опции для работы с сеткой.

Инструменты для создания сетки позволяют генерировать сеточные модели для разных типов анализа. Во вкладке «Defaults» выбираем метод вычислительной гидродинамики «CFD», решатель «CFX».



a



б

Рис. 2. Ячеистые структуры. Контейнеры (а) и внутренность полостей (б).

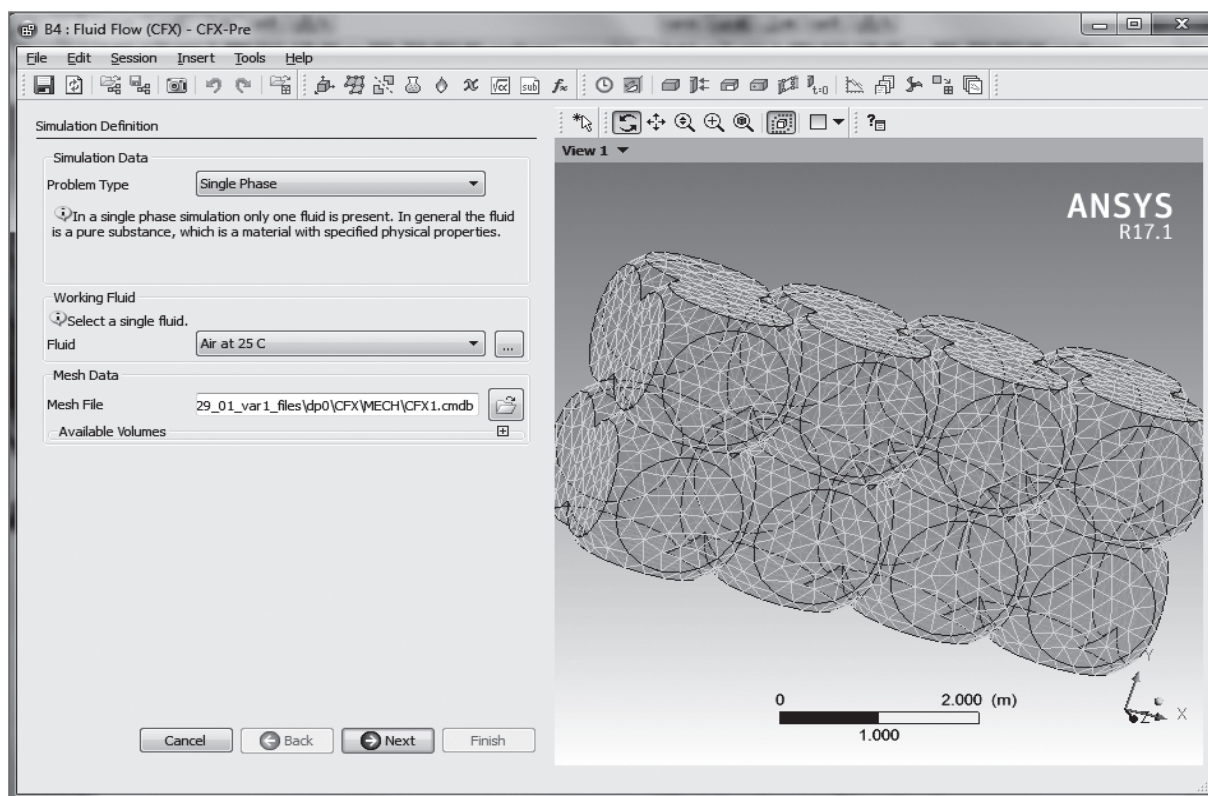


Рис. 3. Пример построения сетки.

Качество сеточной модели влияет на точность, сходимость и скорость получения решения на результаты. ANSYS Meshing позволяет задавать особые настройки сетки в требуемой зоне модели используя команду Mesh Control → Sizing. Во вкладке «Statistics» можно посмотреть полученные числа узлов и элементов.

2. Задание предварительных настроек и граничных условий

После генерации сетки можно переходить к заданию граничных условий, то есть, запустить препроцессор решателя. Задавать граничные условия проще всего при помощи стандартной формы быстрой настройки.

Настройка через Quick Setup Mode предусматривает прохождение через несколько этапов. На первом этапе определяется, сколько типов жидкостей находятся в домене и что это за жидкости. В данном случае в графе Problem Type остается Single Phase, так как в порах присутствует только одна жидкость. А в графе Fluid ставим Water и задаем давление и скорость (рис. 4).

На следующем этапе задаются границы домена. Стандартно все границы домена заданы как «стена» (Wall) – граница, через которую не втекает и не вытекает жидкость.

На следующем этапе задаются граничные условия на входе – Inlet. В этом примере он

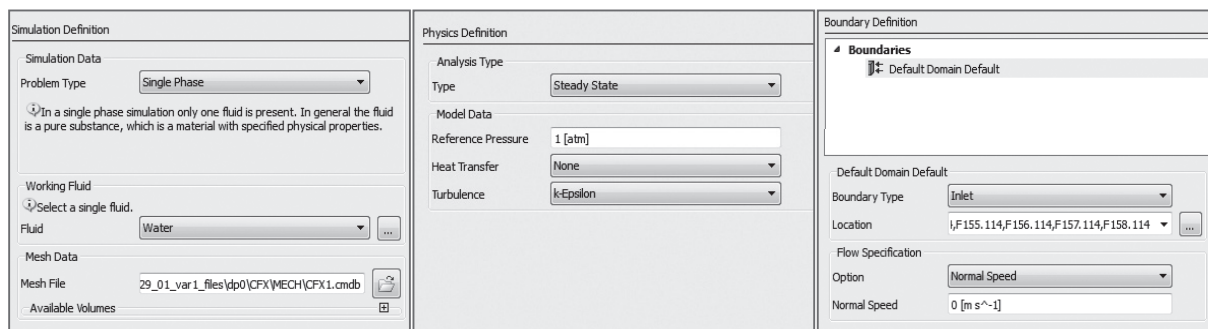


Рис. 4. Настройка для однофазной среды (слева), настройки давления и скорости.

переименован в Istocnik. В графе входного параметра задаем давление (Total Pressure), например 70 атмосфер. На следующем этапе задаются граничные условия на выходе – Outlet. На этой границе в графе Option задаем Average Static Pressure, например со значением в одну атмосферу (рис. 5).

3. Запуск решения в ANSYS CFX-Solver Manager

CFX-Solver Manager представляет собой графический интерфейс пользователя, который позволяет задавать параметры для вычислений: управлять процессом решения CFX-Solver в интерактивном режиме, определять входные данные файла решателя, запускать или приостанавливать CFX-Solver, контролировать процесс решения задачи, устанавливать решатель для проведения параллельных вычислений.

Чтобы открыть его, в окне Workbench следует выбрать «Solution» в структурной схеме модуля Fluid Flow. Можно закрывать

CFX-Solver Manager и переходить к обработке данных в CFD-Post.

4. Постобработка в ANSYS CFD-Post

ANSYS CFD-Post – это программа, предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения задачи посредством ANSYS CFX-Solver. Для этого используются следующие средства:

- визуализация геометрии и исследуемых областей;
- векторные графики для визуализации направления и величины потоков;
- визуализация изменения скалярных величин внутри исследуемой области.

Графики, изображения и видео, полученные в результате анализа решения задачи можно сохранить в виде отдельных файлов.

Чтобы открыть CFD-Post для просмотра результатов, в окне Workbench следует выбрать «Results» в структурной схеме модуля Fluid Flow (CFX), как, например, на рис. 6.

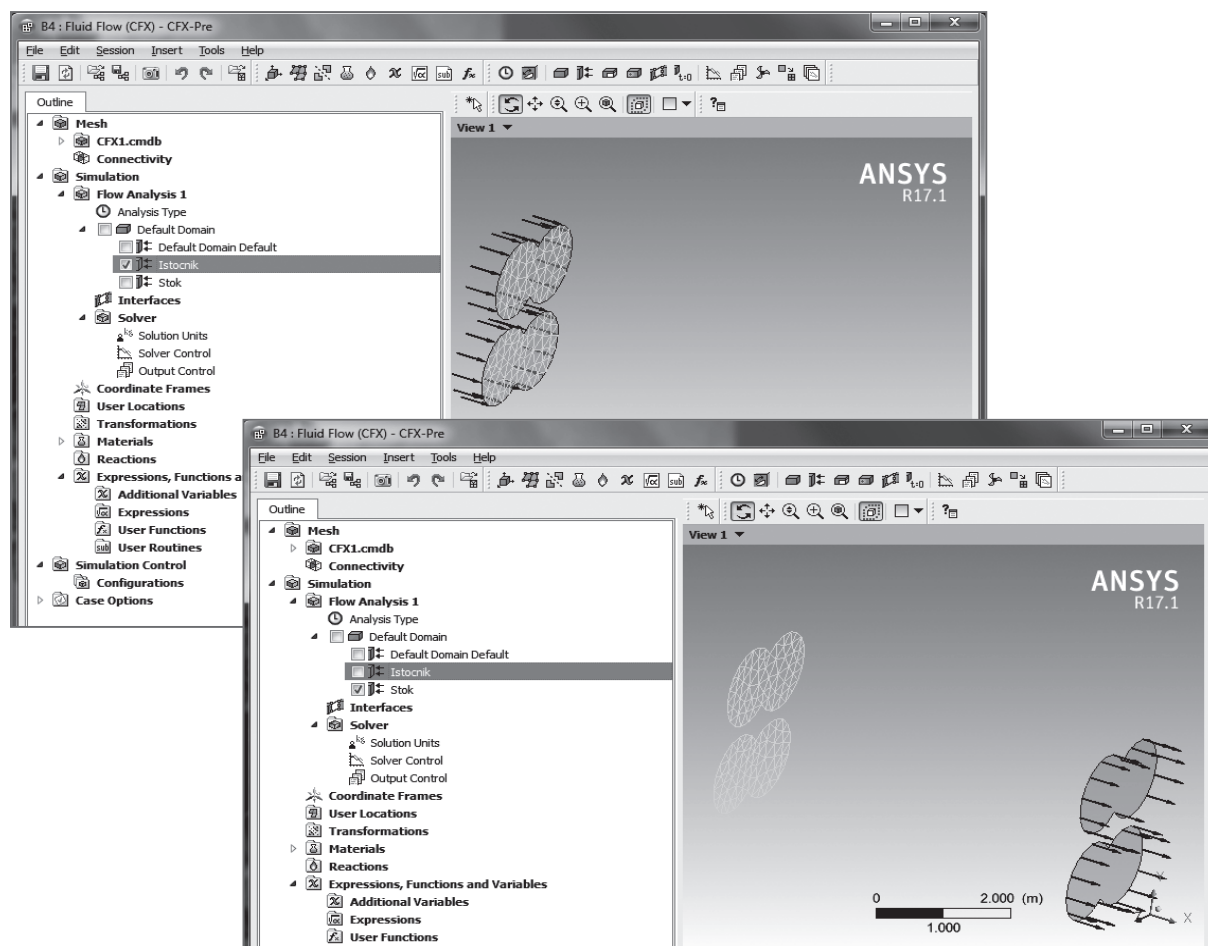


Рис. 5. Отображение граничных условий на входе и выходе.

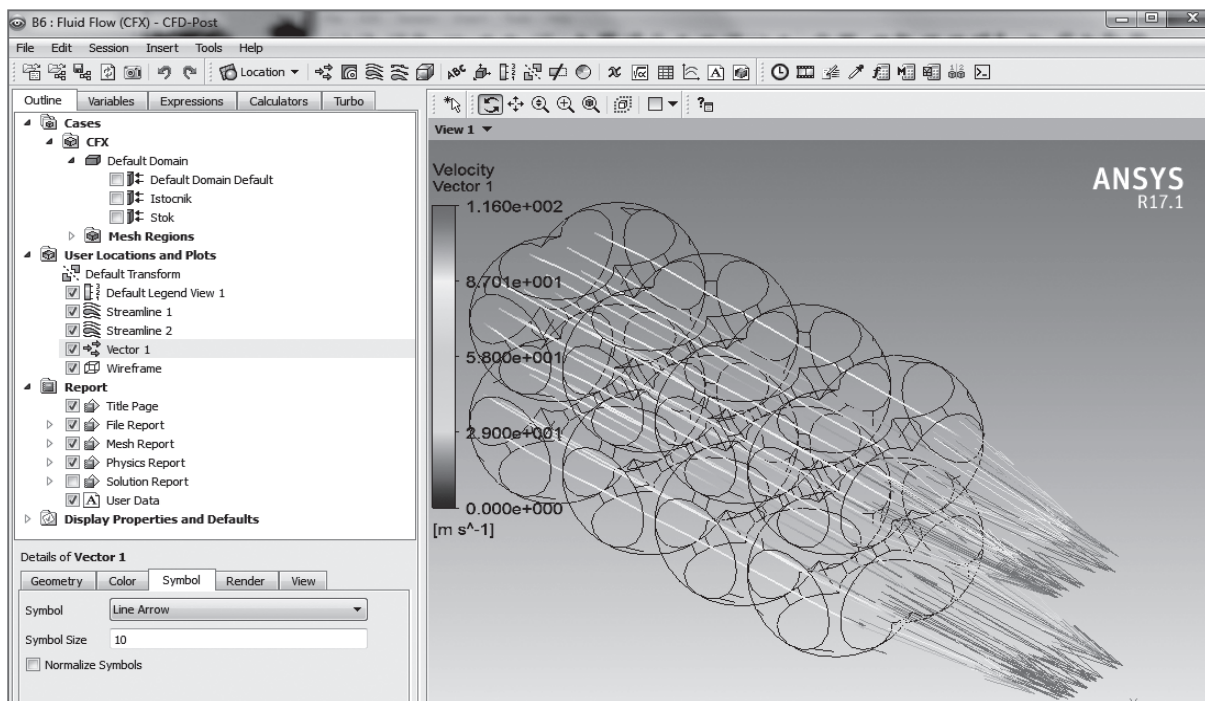


Рис. 6 Картина направления и величины скоростей на линиях токов.

5. Некоторые результаты вариантного моделирования

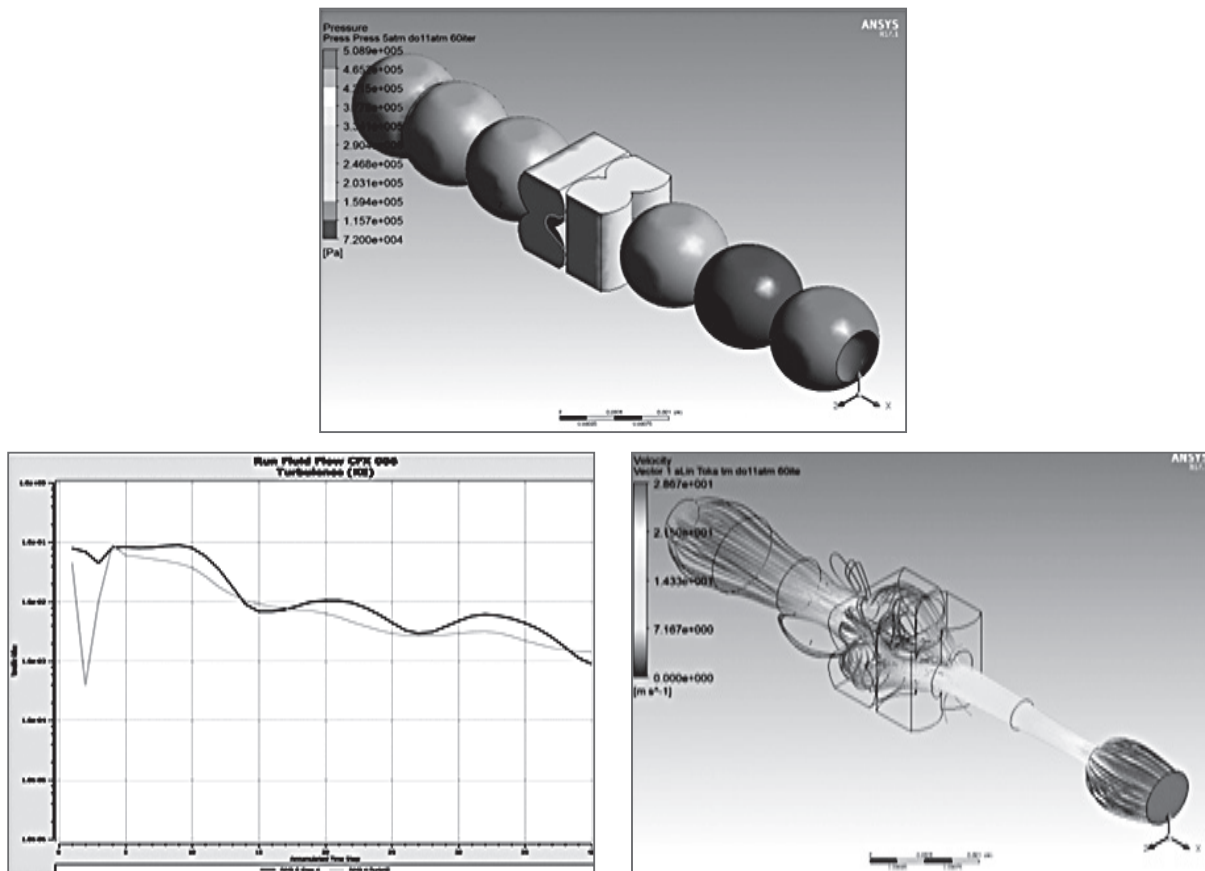


Рис. 7. Вариант только со сферами. На входе 2 atm на выходе 1 atm.
Вход на «широком» конце (на рисунке начало линий тока отобрано шариками).

Вход на «широком» конце (на рисунке начало линий тока отображено шариками).

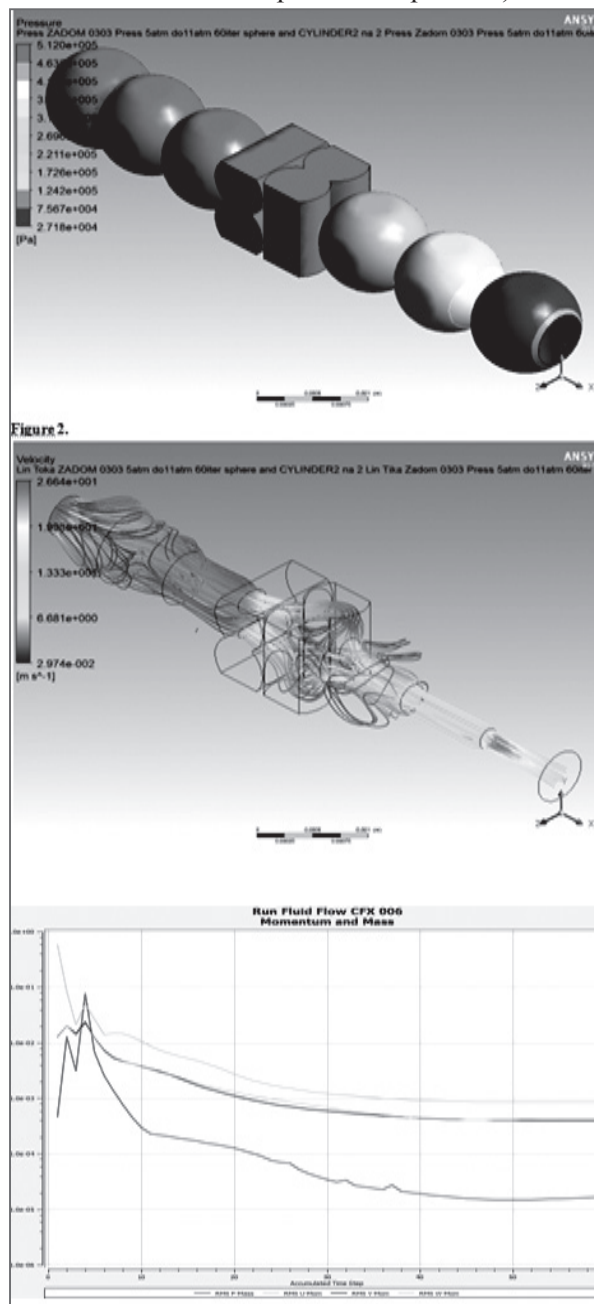


Рис. 8. Вариант для полостей в виде сфер и цилиндров. На входе давление 5 атмосфер на выходе 1.1 атмосферу.

Заключение

В результате выполнения работы решены следующие задачи:

- сформулированы этапы подготовки конечно-элементной модели ячеистой структуры при решении поставленной задачи. На первом этапе необходимо разработать параметрическую модель геометрии структур ячеистой. На втором этапе следует выбрать

Вход на «узком» конце (на рисунке начало линий тока отображено шариками).

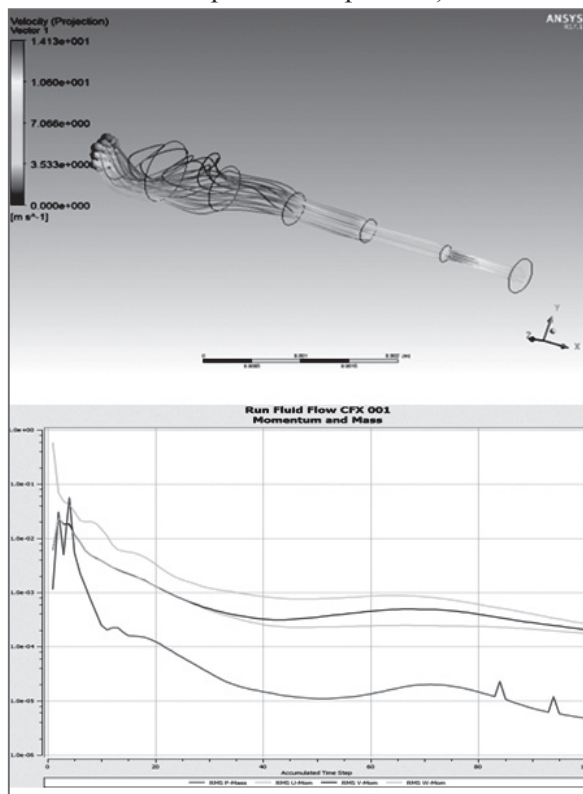


Рис. 9. Вариант со сферами и цилиндрами. На входе 5 atm на выходе 1.1 atm.

параметры жидкости внутри полостей. На третьем этапе должны быть определены условия непроницаемости на соответствующих границах полостей и заданы скорости и давления. На следующем этапе следует задать настройки решателя, которые определяют сходимость процесса. На этапе визуализации результатов следует выбрать настройки, позволяющие наилучшим образом отобразить поля скоростей и давлений а также линии токов.

- выполнена постановка граничной задачи для определения скоростей и давлений в жидкости внутри полостей различной геометрии ячеистой структуры (сферы и цилиндры, сферы с взаимным проникновением с уплотнением и без уплотнения) с различными значениями давление на входе и выходе;

- для пористых структур различной геометрии выполнены варианты расчеты для определения скоростей и давлений в жидкости внутри ячеистых структур.

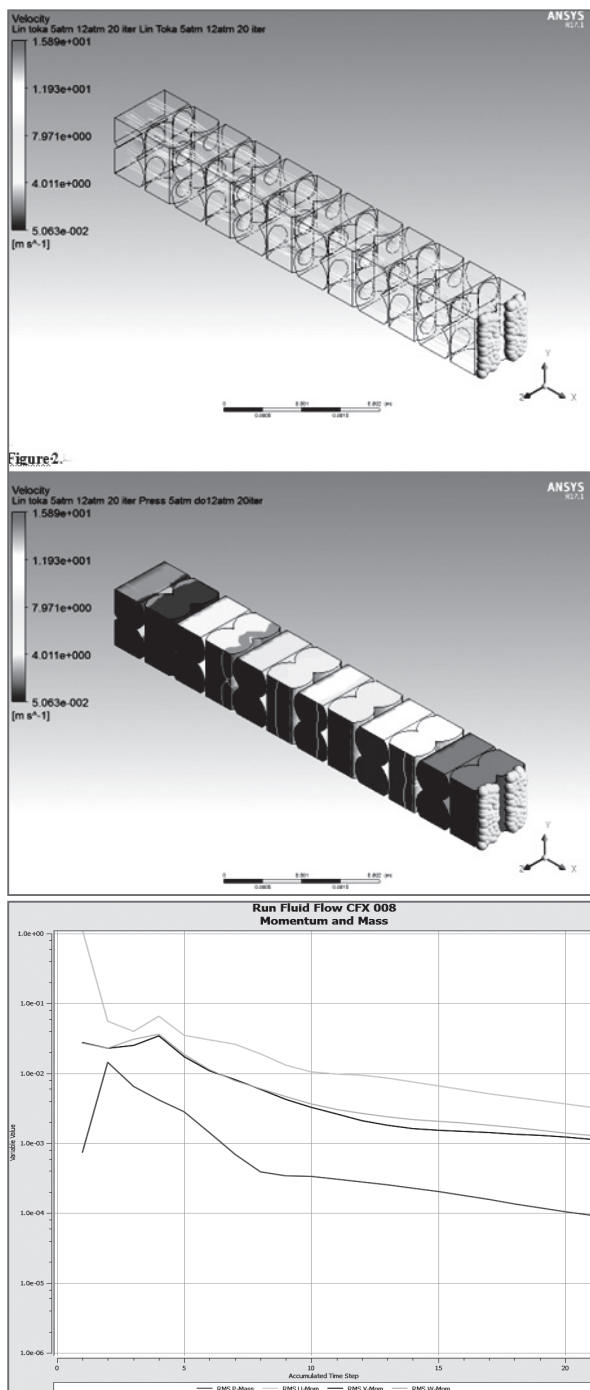


Рис. 10 Вариант только с цилиндрами.
На входе 5 atm на выходе 1.5 atm. (на рисунке начало
линий тока отображено шариками), 20 итераций.

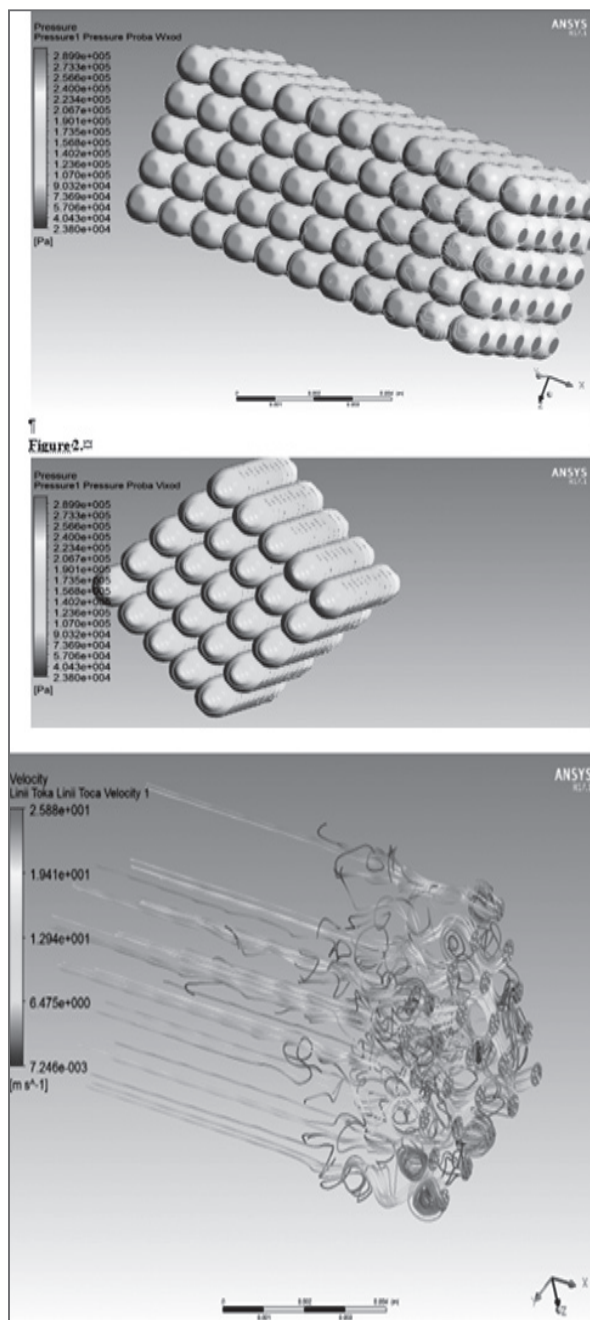


Рис. 11. Вариант только со сферами.
(Пакет 10 на 4 на 4) без уплотнения.
На входе 2 atm на выходе 1 atm (на рисунке начало
линий тока отображено шариками).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
2. Напрасников В. В., Полозков Ю. В., Кункевич Д. П., Бородуля А. А. Особенности использования специализированных языков для построения геометрических моделей ячеистых объектов при конечно-элементном моделировании и оптимизационных расчетах. «Системный анализ и прикладная информатика». 2019;(3):14–20. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2019-3-14-20>
3. Напрасников В. В., Полозков Ю. В., Бородуля А. В., Кункевич Д. П. Построение геометрической части конечно-элементной модели одного вида пористых структур. «Системный анализ и прикладная информатика». 2019;(4):55–61. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2019-4-55-61>

4. **Бородуля А. В., Кункевич Д. П., Напрасников В. В., Полозков Ю. В.** APDL-моделирование ячеистых конструктивных элементов деталей для аддитивного формообразования. Материалы НТК «Аддитивные технологии, материалы и конструкции», Гродно, 5–6 октября, 2016, с. 146–152.
5. **Напрасников В. В., Красновская С. В.** Влияние упрощающих предположений в конечноэлементных моделях компрессорно-конденсаторных агрегатов на спектр собственных частот. «Системный анализ и прикладная информатика». 2014;(1–3):51–55
6. **Лукашов С. И., Напрасников В. В., Богачук А. М.** Исследование робототехнической конструкции с большими перемещениями на основе конечно-элементного подхода. «Системный анализ и прикладная информатика». 2015;(3):10–14.
7. **Бородуля А. В., Соловьев А. Н., Напрасников В. В., Мирзаванд М. А.** Построение спектра конечно-элементных моделей для принятия рациональных инженерных решений при ремонте морских платформ. Весті нацыянальнай акадэміі навук беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук (Мінск) № 4, 2013, с. 101–107 ISSN: 1561–8358
8. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Basic Solver Capability Theory. Governing Equations. Flow in Porous Media. Turbulence and Wall Function Theory. Eddy Viscosity Turbulence Models, 402 s.
9. **Напрасников В. В., Красновская С. В.** Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов. Весті НАН Беларусі, серыя фізіка-тэхнічных навук, № 2, 2016, с. 92–99.
10. **Шабаров В. В.** Применение системы ANSYS к решению гидрогазодинамических задач. Нижний Новгород, 2006, 108 с.

REFERENCES

1. **Loytsyanskiy L. G.** Mekhanika zhidkosti i gaza. – M.: Drofa, 2003. – 840 s.
2. **Naprasnikov V. V., Polozkov Yu. V., Kunkevich D. P., Borodulya A. A.** Osobennosti ispol'zovaniya spetsializirovannykh yazykov dlya postroyeniya geometricheskikh modeley yacheistyykh ob'yektov pri konechno-elementnom modelirovani i optimizatsionnykh raschetakh. «Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika». 2019;(3):14–20. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2019-3-14-20>
3. **Naprasnikov V. V., Polozkov Yu. V., Borodulya A. V., Kunkevich D. P.** Postroyeniye geometricheskoy chasti konechno-elementnoy modeli odnogo vida poristyykh struktur. «Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika». 2019;(4):55–61. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2019-4-55-61>
4. **Borodulya A. V., Kunkevich D. P., Naprasnikov V. V., Polozkov Yu. V.** APDL modeling of cellular structural elements of parts for additive shaping. Materials of NTK «Additive Technologies, Materials and Structures», Grodno, October 5–6, 2016, p. 146–152.
5. **Naprasnikov V. V., Krasnovskaya S. V.** The influence of simplifying assumptions in finite element models of condensing units on the spectrum of natural frequencies. «System analysis and applied informatics». 2014; (1–3): 51–55
6. **Lukashov S. I., Naprasnikov V. V., Bogachuk A. M.** The study of robotic design with large displacements based on the finite element approach. «System analysis and applied informatics». 2015; (3): 10–14.
7. **Borodulya A. V., Soloviev A. N., Naprasnikov V. V., Mirzavand M. A.** Building a spectrum of finite element models for making rational engineering decisions when repairing offshore platforms. Vestsi natsyyanalnay akademii Navuk Belarus. Gray physics-technical sciences (Minsk) No. 4; 2013, p. 101–107 ISSN: 1561–8358
8. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Basic Solver Capability Theory. Governing equations. Flow in Porous Media. Turbulence and Wall Function Theory. Eddy Viscosity Turbulence Models, 402 s.
9. **Naprasnikov V. V., Krasnovskaya S. V.** Obzor vozmozhnostey optimizatsionnykh algoritmov pri modelirovani konstruktsiy kompressorno-kondensatornykh agregatov metodom konechnyykh elementov. Vestsi NAN Belarusi, seryya fizika-tekhnichnykh navuk, № 2, 2016, s. 92–99.
10. **Shabarov V. V.** Application of the ANSYS system to the solution of hydrodynamic problems. Nizhny Novgorod, 2006, 108 p.

Поступила
01.06.2020

После доработки
07.06.2020

Принята к печати
01.09.2020

NAPRASNIKOV V. V., POLOZKOV Yu. V., KUNKEVICH D., BORODULYA A.

RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF FLOWS IN CELLULAR STRUCTURES OF VARIOUS SPECIES

When creating cellular structures, one of the tasks is to study the flows of liquids in the cavities of structures in order to obtain data on the velocities, pressures, and features of the current lines. The properties of cellular structures depend on the geometry of the cavities and their relative position.

The article describes the sequence of stages of modeling fluid flow in the cavities of cellular structures and the results of variant calculations for various types of such structures.

Keywords: geometric model of the cellular structure, modeling stages, fluid flow in the cavities.



Напрасников Владимир Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – конечно-элементное моделирование, компьютерные средства инженерного анализа технических систем.

Naprasnikov Vladimir Vladimirovich, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on finit-element computer aided engineering.

Email: n_v_v@tut.by.



Полозков Юрий Владимирович, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация проектирования объектов и процессов аддитивного производства, оцифровка описаний поверхностей объектов, информационные технологии в образовании.

PolozkovYury Vladimirovich, PhD, head of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of the objects of additive production, surfaces digitization, information technologies in the education.

Email: polozkov_yury@mail.ru.



Кункевич Дмитрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация конструкторско-технологического проектирования и инженерного анализа механических систем.

Kunkevich Dmitry, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of mechanical systems.

Email: kunkevichd@gmail.com.



Бородуля Алексей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – CALS – технологии.

Borodulya Aleksei, PhD, associate Professor of the Software for Information technologies and systems Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on CALS-technologies.

Email: alexius_@msn.com.

ОТ РЕДАКЦИИ

Уважаемые авторы!

Общими критериями для публикации статей в журнале являются актуальность, новизна материала и его ценность в теоретическом и/или прикладном аспектах.

С целью приведения элементов данных, содержащихся в журнале, в соответствие международным требованиям зарубежных аналитических информационных систем (индексов цитирования), используемых для оценки деятельности учреждений образования при расчете показателей в международных рейтингах университетов, редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции приближения к унифицированной системе цитирования научных публикаций SCOPUS,

С 2016 г. Редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции.

Правила для авторов

1. Общие требования

Материалы статей представляются на бумажном носителе (в двух экз.) по адресу: 220013, Минск, ул. Ф. Скорины, 25/3, корп. 20, каб. 508 (Петренко Юрий Николаевич) и в электронном виде e-mail: SA_PI@bntu.by. Телефон для справок: (017) 266 26 58.

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, почтовый адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание, должность. При наличии нескольких авторов должен быть указан автор, ответственный за переписку.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются.

При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

Редакция не принимает статьи, опубликованные ранее в других журналах или научных изданиях.

Гонорар автору за публикацию статьи не выплачивается. Материалы, присланные в редакцию, авторам не возвращаются.

2. Правила оформления статей

2.1. Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

- для оригинальной статьи – 7 страниц (не более 8 иллюстраций);
- для краткого сообщения – 3 страниц (не более 2 иллюстраций).

Статья должна быть набрана с помощью текстового редактора Microsoft Word 2007.

Параметры страницы: формат A4 (высота 29,7 см., ширина – 21 см.); отступ для левого поля и поля сверху – 25 мм, правого и нижнего – 20 мм; нумерация страниц сверху в колонтитуле, со второй страницы, с выравниванием по правому краю.

Текст набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 12 мм.

2.2. Индекс УДК набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по правому краю.

2.3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже, должность, ученая степень и ученое звание печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

2.4. Название статьи набирается шрифтом Arial, 12 пт, жирный, все прописные, выравнивание – по центру.

2.5. Полное название организации (организаций), в которой работает (учится) автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру. После названия организации пропускается две строки, далее следует адрес (адреса) электронной почты, пропускается две строки.

2.6. Аннотация и ключевые слова (объем 200–250 слов на русском (англ.) языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, межстрочный интервал 1,15 пт, курсив, выравнивается по центру. Аннотация должна содержать (рекомендованная структура): цель и задачи работы, методы исследований, результаты, выводы. Аннотация должна быть пригодна для опубликования отдельно от статьи. Английский

вариант не должен быть механическим переводом русского текста, а обеспечивать понимание сути работы для иностранных читателей. После аннотации пропускается одна строка.

2.7. Текст статьи (набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, с абзацем, выравнивание – по ширине) должен содержать следующие элементы:

1) *введение* (может содержать: краткий обзор литературы по проблеме исследования, перечисление нерешенных ранее вопросов, постановку проблемы, цель исследований). Слово «Введение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2) *основная часть исследования* (возможно деление на подразделы), включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии), при этом таблицы и рисунки не должны дублировать друг друга. Название каждого подраздела статьи печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

3) *Заключение* (формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ по сравнению с аналогами). Слово «Заключение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2.8. *Литература*. Список литературы оформляется шрифтом TimesNewRoman, 12 пт в соответствии с Инструкцией по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением президиума Государственного высшего аттестационного комитета Республики Беларусь 24.12.1997 № 178 (в редакции постановления ВАК Беларуси от 22.02.2006 № 2). www.edu.grsu.by/files/liter.doc.

Слово «Литература» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по левому краю.

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]).

В статьях на русском языке должно быть до 10 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. В англоязычных статьях должно быть до 30 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. Обзорные статьи должны включать до 50 ссылок, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования.

Список источников должен оформляться на русском и английском языках.

С целью повышения цитирования авторов в журнале проводится транслитерация русскоязычных источников с использованием официальных кодировок в следующем порядке: имена авторов транслитерируются латиницей, название статьи – смысловой транслитерацией (перевод на английский язык), название источника, где опубликована работа, транслитерируется латиницей, если у источника (журнала) нет официального названия на английском языке).

Для удобства транслитерации возможно использование онлайн-сервисов: <http://www.translit.ru>.

Все русскоязычные источники литературы должны быть представлены в транслитерированном варианте. За правильность приведенных в списке литературы данных ответственность несут автор(ы). В списке должны иметь место ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

2.9. После *списка литературы* на русском и английском языках в статье на русском (англ.) языке должно следовать название статьи, список авторов, сведения о них и аннотация на английском (русском) языке.

Далее указывается: грант, гос. программа, тема госбюджетной НИР (№ Гос. регистрации) или иной документ, в рамках которой выполнена работа (или инициативная).

2.10. *Резюме авторов* (шрифтом TimesNewRoman, 10 пт.) сопровождается фотографией (3×4 см.), JPG.

2.11. *Оформление формул*. Только сложные формулы должны быть набраны с помощью встроенного в MS Word редактора формул Equation. Просто буквы с индексами могут быть набраны без использования формульного редактора с помощью средств оформления MS Word. Латинские символы должны быть набраны курсивом, как в формулах, так и на рисунках, и в тексте, а русские и греческие – обычным текстом.

В редакторе формул должен быть установлен следующий размер символов: обычный символ – 11 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 17 пт., мелкий символ – 12 пт. Формулы выравниваются по центру страницы. При необходимости делать ссылки на формулы их следует нумеровать арабскими цифрами, помещенными в круглые скобки, в порядке упоминания. Номера формул выравниваются по правому краю страницы.