

## Краткие сообщения

УДК 681.51

### ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ДЕЙСТВИЙ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА ЛИНЕЙНЫМИ МОДЕЛЯМИ

*А.А. Абросимов, П.М. Зуев*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматриваются результаты исследований по оценке точности идентификации передаточной функции человека-оператора в режиме преследующего слежения с применением линейных моделей. Рассмотрены три линейные модели, проведены экспериментальные исследования процедуры идентификации на выборке испытуемых. По результатам экспериментальных исследований найдены численные оценки точности идентификации по двум показателям: модулю среднего отклонения и модулю максимального отклонения. Выявлена возможность объединения рассматриваемых моделей. Установлено, что точность идентификации по модулю среднего отклонения выше, чем точность идентификации по модулю максимального отклонения. Монотонные переходные процессы идентифицируются более точно, чем колебательные. Сформулированы предложения для повышения точности идентификации колебательных переходных процессов.*

**Ключевые слова:** человек-оператор, режим преследующего слежения, передаточная функция, линейные модели, точность идентификации, показатели точности, численные оценки.

Несмотря на очень широкое применение систем автоматического управления, которые решают поставленную задачу без непосредственного участия человека, существуют системы, в контуре управления которых присутствует человек-оператор. Для решения задач анализа и синтеза таких систем управления необходимо знать динамические характеристики человека-оператора.

Известны различные типы моделей, применяемых для описания управляющих действий человека-оператора [1]. Каждый тип модели способен учитывать лишь некоторые черты реального поведения человека-оператора в процессе работы в составе системы управления.

В [2] приведен анализ показателей качества структур с человеком-оператором в контуре управления с применением линейной модели человека-оператора при выполнении им управляющей деятельности в режиме преследующего слежения. Особенностью рассмотренной модели является то, что расчет параметров модели проводился по переходной функции, которая является результатом усреднения по десяти реализациям [3]. В результате усреднения

---

*Альберт Александрович Абросимов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».*

*Павел Михайлович Зуев, магистрант.*

переходная функция получается монотонной или малоколебательной и хорошо соответствует последовательному соединению линейного звена второго порядка и звена с запаздыванием.

В реальных условиях у человека-оператора наблюдается значительный разброс управляющих реакций на предъявление возмущающего воздействия. Один и тот же человек-оператор может реагировать различным образом, включая реакции с большим перерегулированием. В таких условиях усредненная переходная функция может существенно отличаться от единичной реакции. Поэтому была поставлена задача синтеза и экспериментальной проверки модели, дающей наилучшее приближение не к усредненной, а к единичной реакции человека-оператора.

Были рассмотрены три линейные модели [4].

Модель № 1 имеет передаточную функцию

$$W_1(p) = \left( k_1 + \frac{k_2}{p} + \frac{k_3 p}{Tp + 1} \right) e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты передачи;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – время запаздывания.

Модель № 2 имеет передаточную функцию

$$W_2(p) = \left( \frac{1}{Tp + 1} + k \frac{p}{Tp + 1} \right) e^{-p\tau}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – время запаздывания.

Модель № 3 имеет передаточную функцию

$$W_3(p) = \left[ k \left( \frac{1}{T_1 p + 1} + k_1 + \frac{k_2 p}{T_2 p + 1} \right) + \frac{k_3}{p} \right] e^{-p\tau}, \quad (3)$$

где  $k, k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты передачи;  $T_1, T_2$  – постоянные времени;  $\tau$  – время запаздывания.

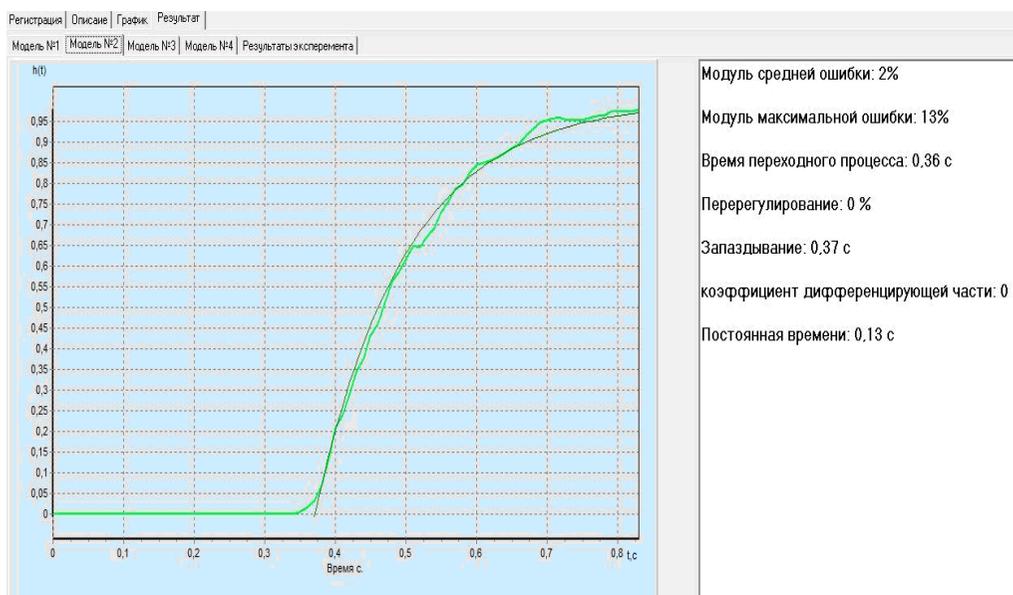
Во всех моделях присутствует звено запаздывания, последовательно соединенное с линейной частью, которая представляет собой параллельно соединенные типовые звенья первого порядка.

Параметры моделей рассчитывались методом Гаусса – Зайделя по минимуму среднего модуля отклонения аналитической переходной функции от экспериментальной переходной функции, зарегистрированной как управляющие действия человека-оператора на предъявление единичного ступенчатого воздействия в режиме преследующего слежения [2]. Аналитическая переходная функция определяется по передаточной функции соответствующей модели.

Первая и третья модели содержат интегрирующее звено, поэтому с их применением идентификацию можно проводить только на ограниченном интервале времени, в качестве которого принято время переходного процесса.

Разработано программное обеспечение, позволяющее определять параметры передаточной функции методом активной компьютерной идентификации [4], причем одна и та же реакция человека-оператора обрабатывается по всем трем моделям. Пример результата идентификации представлен на рисунке.

По каждой модели рассчитываются все параметры передаточной функции, прямые показатели качества процесса управления и два показателя точности идентификации – модуль средней ошибки (МСО) и модуль максимальной ошибки (ММО) в переходном процессе. Из примера, представленного на рисунке, видно, что максимальная ошибка наблюдается в течение короткого времени.



Пример идентификации и ее результаты

С применением разработанной программы выполнены экспериментальные исследования по определению статистических оценок параметров приведенных выше моделей на выборке из 41 испытуемого по указанным выше показателям точности [5].

В табл. 1 приведены числовые характеристики показателей качества переходных процессов, полученные в результате статистической обработки результатов эксперимента.

Таблица 1

**Числовые характеристики показателей качества переходных процессов**

Тип величины	Время запаздывания, с	Время регулирования, с	Перерегулирование, %
Минимальные	0,24	0,15	0
Максимальные	0,43	0,95	56
Средние	0,3	0,42	6

В табл. 2, 3, 4 приведены числовые характеристики показателей точности идентификации соответственно для первой, второй и третьей модели.

По данным таблиц видно, что по средней величине модуля среднего отклонения наибольшей точностью обладают модели № 1 и № 3, модель № 2 имеет несколько меньшую точность. По средней величине модуля максимального отклонения наибольшей точностью обладает модель № 3. Нетрудно выполнить сравнение точности идентификации моделей и по минимальным и максимальным величинам модулей среднего и максимального отклонений. В целом модель № 3 имеет лучшие показатели по сравнению с моделями № 1 и № 2 по средним величинам модулей среднего и максимального отклонений.

Таблица 2

**Числовые характеристики показателей точности идентификации и параметров передаточной функции модели № 1**

Тип величин	МСО, %	ММО, %	$K_1$	$K_2, 1/c$	$K_3, C$	$T, c$
Минимальные	2	5	0,92	-0,12	-0,35	0,31
Максимальные	18	57	1,18	0	-0,018	0,02
Средние	5	18	1,08	-0,17	-0,12	0,11

Таблица 3

**Числовые характеристики показателей точности идентификации и параметров передаточной функции модели № 2**

Тип величин	МСО, %	ММО, %	$K$	$T, c$
Минимальные	2	9	0,005	0,02
Максимальные	25	131	1,2	0,36
Средние	7	40	0,08	0,13

Таблица 4

**Числовые характеристики показателей точности идентификации и параметров передаточной функции модели № 3**

Тип величины	МСО, %	ММО, %	$K$	$K_1$	$K_2, c$	$K_3, 1/C$	$T_1, c$	$T_2, c$
Минимальные	1	5	0,66	-0,1	0,01	0	0,01	0,001
Максимальные	25	74	1,34	-0,1	0,123	0	0,233	0,187
Средние	4,95	11,66	1,06	-0,1	0,026	0	0,086	0,025

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что в одной реализации величины модулей среднего и максимального отклонений зависят от типа переходного процесса: для монотонных процессов они меньше, для колебательных процессов больше. Поэтому все экспериментально полученные переходные процессы были разбиты на три типа: монотонные, переходные процессы с малой колебательностью, у которых величина перерегулирования не более 5 %, и колебательные переходные процессы, у которых величина перерегулирования более 5 %. Для каждого типа переходных процессов были определены оба показателя точности для всех моделей.

В табл. 5, 6, 7 приведены числовые характеристики показателей точности идентификации исследуемых моделей для указанных типов переходных процессов. По данным этих таблиц можно сделать следующие выводы.

1. Точность идентификации у всех моделей по показателю модуля среднего отклонения выше, чем по показателю модуля максимального отклонения.

2. Для монотонных переходных процессов минимальная величина модуля среднего отклонения составляет 1–2 %, максимальная величина составляет 8–11 %, средние величины этого показателя составляют 3–6 %. По этому показателю наилучшие результаты наблюдаются у модели № 3. Для этих же процессов аналогичные величины модуля максимального отклонения составляют соответ-

ственно 5–9 %, 26–50 % и 11–24 %, наилучшие результаты наблюдаются у модели № 3.

3. Для малоколебательных переходных процессов минимальная величина модуля среднего отклонения составляет 2–3 %, максимальная величина составляет 4–7 %, средние величины этого показателя составляют 4–6 %, по всем этим величинам наилучшие результаты наблюдаются у модели № 3. Аналогичные величины модуля максимального отклонения составляют соответственно 6–17 %, 17–54 % и 14–31 %, наилучшие результаты наблюдаются у модели № 3.

4. Для колебательных переходных процессов минимальная величина модуля среднего отклонения составляет 2–7 %, максимальная величина составляет 18–25 %, средние величины этого показателя составляют 8–12 %, по совокупности этих величин предпочтительнее является модель № 1. Аналогичные величины модуля максимального отклонения составляют соответственно 6–30 %, 57–131 % и 24–74 %, и по совокупности этих величин предпочтительнее является модель № 1, близкие показатели наблюдаются у модели № 3.

5. В целом точность идентификации колебательных переходных ниже по сравнению с точностью идентификации двух других типов процессов, точность идентификации монотонных и малоколебательных процессов приблизительно одинакова.

Таблица 5

**Числовые характеристики показателей точности идентификации монотонных переходных процессов**

Модель	№ 1			№ 2			№ 3		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
МСО, %	2	9	3,93	2	11	5,93	1	8	3,29
ММО, %	5	26	13,57	9	50	23,79	5	29	10,71

Таблица 6

**Числовые характеристики показателей точности идентификации малоколебательных переходных процессов**

Модель	№ 1			№ 2			№ 3		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
МСО, %	2	6	4,69	3	7	5,63	2	4	3,5
ММО, %	6	29	18,06	17	54	31,38	6	17	13,88

Таблица 7

**Числовые характеристики показателей точности идентификации колебательных переходных процессов**

Модель	№ 1			№ 2			№ 3		
	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.
МСО, %	3	18	7,64	7	25	12,27	2	25	9,18
ММО, %	9	57	24,27	30	131	74,36	6	74	28,27

В целом по проделанной работе можно сделать следующие выводы.

1. Получены численные оценки точности идентификации управляющих действий человека-оператора с применением трех линейных моделей.

2. Целесообразно упрощение модели № 3 с одновременным ее объединением с моделью № 2, для чего в модели № 2 необходимо иметь различные постоянные времени инерционного и реального дифференцирующего звеньев.

3. Установлено, что монотонные и малоколебательные управляющие действия применяемыми типами моделей идентифицируются с более высокой точностью, чем колебательные. Для повышения точности идентификации колебательных переходных процессов целесообразно применение линейных звеньев более высоких порядков.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Современная теория систем управления / Под ред. К.Т. Леондеса. Пер. с англ. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
2. *Абросимов А.А.* Моделирование динамических характеристик человека-оператора // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 4 (27). – С. 6–9.
3. *Цибулевский И.Е.* Человек как звено системы управления. – М.: Наука, 1981. – 197 с.
4. *Транцев С.С.* Алгоритмическое и программное обеспечение оценки характеристик человека-оператора: выпускн. ... квал. раб. инжен.: 220201: защищена 20.06.14 / Транцев Сергей Сергеевич. – Самара, 2014. – 169 с.
5. *Зуев П.М.* Исследование показателей качества управляющих действий человека-оператора: выпускн. ... квал. раб. бакал.: 220400: защищена 26.06.15 / Зуев Павел Михайлович. – Самара, 2015. – 53 с.

*Статья поступила в редакцию 25 марта 2016 г.*

## IDENTIFICATION ACCURACY OF CONTROLLED MAN-OPERATOR ACTIONS BY LINEAR MODELS

*A.A. Abrosimov, P.M. Zuev*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The research results on the evaluation of identification accuracy of transmitting man-operator functions are considered with the use of linear models. Three linear models are given. Experimental researches by checking the tested operators are offered. Two parameters are found: medium deflection and maximum deflection modules. The possibility of joining these models is revealed. The accuracy of identification on medium module is higher than that of the maximum deflection module. Monotonous transient processes are indented more accurate than irrational. The suggestions for rising the identification accuracy of irrational and transient processes are formulated.*

**Keywords:** *human operator, transmission function, linear models, identification accuracy, precision indicators, numerical estimates.*

---

*Albert A. Abrosimov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.  
Pavel M. Zuev, Graduate Student.*

УДК 621.365.5

**ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ<sup>1</sup>****А.С. Егиазарян, Л.С. Зимин**Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассматриваются особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов, которые являются проблемными для нагрева путем электромагнитной индукции. Приводится сравнение с электрическими печами сопротивления. Даются рекомендации по выбору методики расчета индукторов, рассматриваются возможности учета продольного и поперечного краевых эффектов. Раскрываются энергетические особенности трехфазных индукторов. Указывается, что по величине мощности, потребляемой отдельными катушками трехфазного индуктора, нельзя однозначно судить о средней температуре заготовки, расположенной в этой катушке. В зависимости от значений коэффициентов взаимной индуктивности и от углов сдвига между токами в каждом индукторе потребление мощности каждым из индукторов может быть различным, а также положительным или отрицательным. Указывается, что максимальный к.п.д. будет иметь однофазная катушка индуктора.*

**Ключевые слова:** деформация, скорость нагрева, трехфазный индуктор, равномерность нагрева, краевой эффект.

Широко распространенные в различных отраслях промышленности процессы обработки металлов, в частности алюминиевых сплавов, методом горячего пластического деформирования неразрывно связаны с технологией нагрева металла, где перспективно применение индукционного нагрева. Поэтому при повышении эффективности металлургического производства встает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металлов давлением (ОМД)» [1, 2].

Если с точки зрения конструкции ИНУ и особенностей индукционного нагрева ограничиться основными формами нагреваемых заготовок – прямоугольной и цилиндрической, то из наиболее распространенных видов горячей ОМД в металлургическом производстве целесообразно рассмотреть прокатку (слябинг) и прессование. При современном состоянии производства производительность прессового оборудования достигает 4–5 т/час на прессах средней мощности к 10–15 т/час на крупных прессах, а производительность современных крупных прокатных станов достигает 50 и более т/час. Из приведенных цифр видно, что даже современные электрические печи сопротивления с принудительной циркуляцией не в состоянии достичь указанной производительности и что для обеспечения нормальной работы крупного оборудования приходится уста-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

Александра Сергеевна Егиазарян (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

навливать до 4–5 многокамерных крупногабаритных нагревательных печей сопротивления.

Исследования в области скоростного нагрева алюминиевых слитков показали, что пределом увеличения скорости нагрева является внутренний температурный перепад по сечению слитка ( $\Delta t$ ). Для твердых алюминиевых сплавов рекомендуется температурный перепад не более 20 °С, для мягких сплавов  $\Delta t = 40$  °С и для чистого алюминия  $\Delta t = 60$ –80 °С и более. Повышение скорости нагрева в несколько десятков раз стало возможным только при индукционном нагреве, когда вся энергия, идущая на нагрев, передается индукционно непосредственно в слитки без участия внешней среды.

В последние годы значительно повысился интерес к разработке методов проектирования индукторов [3, 4]. Это объясняется двумя причинами: во-первых, вследствие существенного расширения области промышленного применения индукционного нагрева возросли потребности в расчетах такого рода, во-вторых, коренным образом изменились возможности их реализации благодаря быстрому развитию компьютерных технологий.

Расчет индукторов для нагрева металлических заготовок и деталей в переменном электромагнитном поле преследует двоякую цель: 1) найти распределение выделяемой в металле энергии; 2) согласовать параметры источника питания и нагрузки. Для расчета индуктора наиболее наглядным является использование системы трансформатора, уравнения которого основаны на известной связи двух или нескольких линейных контуров тока. Основная трудность в данном случае связана с четким обоснованием разделения магнитного полезного потока. Теория поля обходит эти трудности, используя связи электрического и магнитного полей через уравнения Максвелла для дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных [5]. При исследовании известных способов расчета необходимо объединить теорию поля и трансформатора. Теория поля в случае однородного поля может служить для выяснения принципиальных связей, тогда как искривление неомогенности поля необходимо учитывать как отрицательный фактор в формулах для бесконечно длинных пустотелых линейных контуров тока. Равномерность нагрева заготовки в аксиальном направлении зависит в основном (если пренебречь влиянием тепловых потерь) от распределения напряженности магнитного поля, а именно аксиальной ее составляющей. Поэтому задача равномерного нагрева заготовки по длине может быть сведена к задаче получения равномерной картины поля по длине индуктора. В прямоугольных индукторах надо учитывать явление поперечного краевого эффекта [6].

В данном исследовании распределение аксиальной составляющей напряженности магнитного поля определялось как с помощью расчета, так и экспериментально. В случае индукционного нагрева, особенно на промышленной частоте, электромагнитное поле, поле векторов электрической и магнитной напряженности, можно рассматривать как квазистационарное (потенциальное), т. к. длина волны в зазоре ( $\lambda = \text{скорость света} / \text{частота тока}$ ) много больше размеров воздушных зазоров в системе «индуктор – металл». Фаза тока при этом одинакова по всей длине индуктора, т. е. система рассматривается как участок цепи с сосредоточенной самоиндукцией. В свою очередь, тепловое действие электромагнитного поля определяется вектором Пойтинга.

В случае плоскопараллельного поля поверхность заготовки будет поверхностью уровня потенциала, т. е. выделяемая мощность определяется только гео-

метрическими и физическими параметрами заготовки, но совершенно не зависит от положения и формы индуктора.

Повышение энергетических, технологических и эксплуатационных показателей ИНУ возможно применение трехфазного тока промышленной частоты [7, 8, 9]. С увеличением веса заготовок и производительности индукционных нагревателей промышленной частоты мощность однофазных индукторов, даже при условии компенсации их реактивности, часто оказывается довольно значительной. При этом их подключение к трехфазными сетям становится нежелательным или вообще недопустимым. Поэтому индукционные установки большой мощности целесообразно выполнять в трехфазном исполнении. В трехфазных электрических машинах все фазы расположены симметрично, т. е. имеют равные значения взаимных индуктивностей. При симметричной системе напряжений получается полностью симметричная система тока, поэтому бывает достаточно исследовать процессы только в одной фазе, чтобы получить представление о соотношениях в трехфазной системе.

При индукционном нагреве пространственная асимметрия является причиной неравенства коэффициентов взаимной индуктивности даже в том случае, если все три катушки индуктора имеют одинаковые параметры.

Падения напряжений на каждой катушке трехфазного индуктора обусловлены активными и индуктивными составляющими. Причем та часть падения напряжения, которая вызвана ЭДС взаимной индукции, может быть также разложена на активную и реактивные составляющие, совпадающие по направлению или перпендикулярные току рассматриваемого индуктора. Наличие активных составляющих падения напряжения, обусловленных взаимной индуктивностью, оказывает влияние на потребление активной мощности каждым индуктором. Поскольку коэффициенты взаимной индукции между индукторами не равны между собой, то, как следствие, не будет равенства и в потреблении активной мощности каждой фазой. В зависимости от значений коэффициентов взаимной индуктивности и от углов сдвига между токами в каждом индукторе потребление мощности каждым из индукторов может быть различным, а также положительным или отрицательным, так как одиночные индукторы могут обмениваться мощностью как с сетью, так и друг с другом. Как правило, при углах сдвига между токами, близких к  $120^\circ$ , мощности крайних катушек в сумме дают удвоенное значение мощности средней катушки. При углах, отличающихся от  $120^\circ$ , значения мощностей в каждой фазе могут быть различными.

Неравномерное потребление мощности разными катушками не означает такого же неравномерного распределения напряженности магнитного поля и, как следствие, неравномерного нагрева. Таким образом, потребление мощности отдельными катушками не находится в однозначной связи с индуктированной в заготовке мощностью и с мощностью, превращенной в тепло в катушке. Чем больше отношение диаметра катушек к длине, тем сильнее сказывается их взаимное индуктивное влияние на электрический режим индуктора.

Поэтому в индукторе, состоящем из нескольких катушек, расположенных рядом по одной оси так, что они влияют друг на друга, сумма мощностей, передаваемых в заготовку, будет тем больше по сравнению с суммой потребляемых мощностей, чем меньше взаимный сдвиг фаз напряжений, питающих отдельные катушки. Это объясняется следующим:

– чем больше сдвиг фаз между питающими напряжениями, тем больше их размагничивающее влияние;

– наличие значительной радиальной составляющей поля индуктора на границах катушек вызывает неблагоприятное распределение тока в меди катушек в этих районах, что также вызывает дополнительные потери в индукторе.

Приведенные выше рассуждения предполагали, что по всем виткам первичной катушки течет ток  $I$ , а по всем виткам вторичной – ток  $I_1$ , так что плотность тока неизменна по всей длине. Для индуктора в общем случае это справедливо. Но в заготовке, которая представляет собой целый ряд лежащих рядом закороченных и включенных параллельно витков, плотность тока по длине ни в коем случае не будет равномерной. У трехфазного индуктора к краевому эффекту катушек добавляется влияние стыков соседних фаз, которое тем больше, чем более сдвиг фаз полей соприкасающихся катушек. При таком рассмотрении однофазная катушка представляет собой идеальный граничный случай отдельных катушек, поля которых имеют одинаковую фазу. Такая катушка будет иметь наивысший к.п.д. Для трехфазного индуктора эта одинаковость фаз недостижима. Однако и в этом случае надо стремиться к возможному выравниванию фаз по времени, т. е. по соображениям к.п.д. предпочтение следует отдать несимметричной схеме включения катушек.

Следует также обратить внимание на то, что эффективное сопротивление обмотки индуктора зависит от формы поля. Вытеснение тока в обмотке происходит в сторону магнитных силовых линий. На концах катушек могут возникать дополнительные потери от вытеснения тока за счет радиальной составляющей магнитного поля. Деформация поля на стыках зависит от сдвига фаз, так что и по этой причине следует стремиться к несимметричной схеме включения катушек.

Для мощных цилиндрических и прямоугольных ИНУ часто применяют профиль трубки со смещенным отверстием, толщина прямоугольной части которой равна 1,0 см (глубина проникновения в медь на частоте 50 Гц). Характер зависимостей электрического к.п.д. индуктора от коэффициента заполнения, профиля сечения трубки и схемы соединения можно объяснить образованием витковых локальных полей, определяющих проявления эффекта близости, поверхностного, катушечного и других эффектов, которые в конечном итоге определяют действительное активное сопротивление переменному току.

### **Выводы**

1. Индукционный нагрев не только позволяет исключить из процесса теплопередачи внешнюю среду, но и уменьшить внутреннее термическое сопротивление слитка до 50 % за счет объемного распределения источника тепла.

2. Тепловые потери от нагреваемого слитка в окружающую среду дополнительно снижают внутренний перепад температуры.

3. При слабо выраженном поверхностном эффекте возможен перегрев внутреннего слоя, смещенного к центру слитка, на величину перепада температуры между поверхностью и центром заготовки.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев. – № 22. – СПб.: КОМЛИЗ-ПОЛИГРАФИЯ, 2012. – С. 41–43.
2. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63–67.

3. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Особенности индукционного нагрева под деформацию // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3 (47). – С. 128–135.
4. Егиазарян А.С. Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 194–198.
5. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
6. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7 (28). – С. 231–233.
7. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 74–76.
8. Егиазарян А.С., Зимин Л.С., Федотов М.Е. Электромагнитная совместимость систем электроснабжения с индукционными установками // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Спец. выпуск. – С. 75.
9. Егиазарян А.С., Зимин Л.С. Оптимизация электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Спец. выпуск. – С. 34.

*Статья поступила в редакцию 2 марта 2016 г.*

## FEATURES OF INDUCTION HEATING OF ALUMINIUM ALLOYS

*A.S. Yeghiazaryan, L.S. Zimin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The features of induction heating of aluminum alloys which are problematic for heating by electromagnetic induction are discussed. Comparison with electric resistance furnaces is provided. Recommendations for selection of calculation methods of the inductors are given. The possibility of accounting for the longitudinal and transverse edge effects is considered. Energy features of three-phase inductors are revealed. The magnitude of the power consumed by the individual coils of a three-phase inductor does not correspond to the average temperature of the billet located in the coil. Depending on the values of the coefficients of mutual inductance and the phase current in each inductor the power consumption of each of the inductors may be different, as well as positive or negative. A single-phase coil of the inductor will have a maximum efficiency.*

**Keywords:** *deformation, heating rate, the three-phase inductor, the uniformity of heating, edge effect.*

УДК 544.015

## ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОВЕРКИ АДЕКВАТНОСТИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

**С.Б. Коньгин**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрены вопросы разработки программного продукта, позволяющего проанализировать адекватность моделей, используемых для расчета свойств газовых и жидких сред. Созданный продукт позволяет провести сравнение расчетных значений плотности, энтальпии, теплопроводности, вязкости и поверхностного натяжения с экспериментальными значениями, содержащимися в базе данных. Также имеется возможность проверки расчетных условий наступления фазовых переходов. Данная программа может помочь разработчику технологического процесса выбрать модели фазовых равновесий и свойств газов и жидкостей для каждого конкретного случая. В качестве примера приведены результаты сравнительного анализа результатов расчета плотности пропана с помощью уравнения Пенга – Робинсона со справочными данными.*

**Ключевые слова:** свойства газов и жидкостей, фазовые равновесия, уравнения состояния.

В настоящее время при проектировании технологических процессов нефтегазовой и химической промышленности широко используются различные программные продукты [1]. В основе расчетных алгоритмов, реализованных в данных программах, обычно лежат всевозможные уравнения состояния и корреляционные зависимости, позволяющие определить параметры фазовых равновесий и свойства фаз [2–5]. Однако в каждом конкретном случае перед проектировщиком встает вопрос о выборе расчетных моделей, позволяющих адекватно описать свойства перерабатываемых сред. В этой связи специалисту целесообразно иметь в своем распоряжении программный продукт, который наряду с расчетными методиками содержал бы базу данных по свойствам компонентов и фазовым равновесиям при различных температурах и давлениях [6].

Для решения указанной задачи был разработан программный продукт, основное окно которого представлено на рис. 1. Он позволяет выбрать из базы данных химический компонент, указать интересующее свойство и сравнить результаты расчетов с помощью указанной модели с имеющимися в программе экспериментальными данными. К основным свойствам, представляющим практический интерес для проектирования технологических процессов, отнесены плотность, энтальпия, теплопроводность, вязкость и поверхностное натяжение. Сравнение свойств может быть выполнено для газовой и жидкой фаз как для докритических значений температур и давлений, так и в сверхкритических условиях. Кроме того, программа может автоматически определять фазовое состояние компонента и сравнивать условия наступления фазового перехода с их реальными значениями.

---

Сергей Борисович Коньгин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

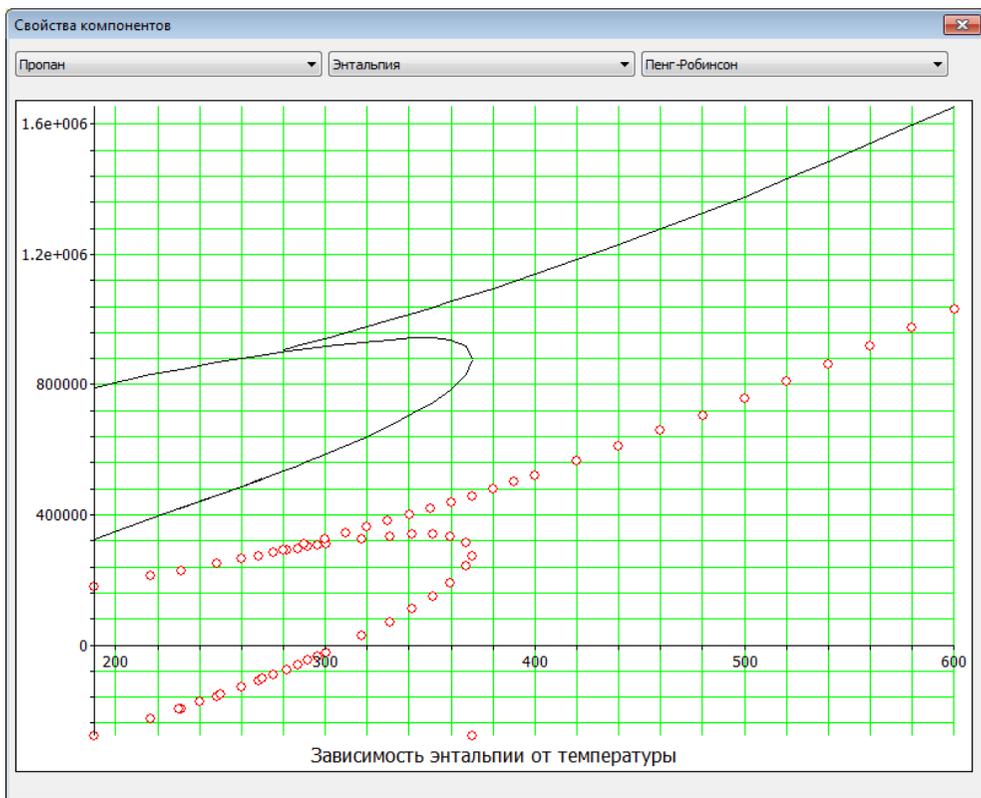


Рис. 1. Окно разработанной программы

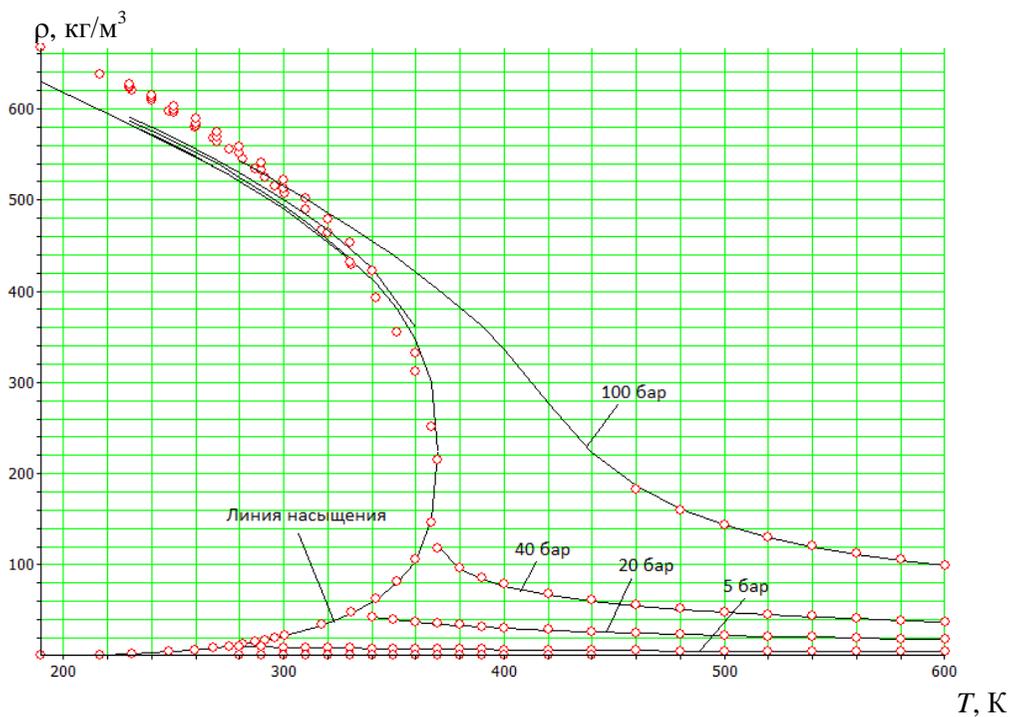


Рис. 2. Результаты анализа плотности пропана  
(сплошные линии – экспериментальные зависимости [6], точки – расчетные данные)

T, К

В качестве примера работы программы на рис. 2 представлена зависимость плотности пропана от температуры и давления. Линии соответствуют экспериментальным данным [6], точками обозначены результаты расчетов с помощью уравнения состояния Пенга – Робинсона [3, 4]. Из рассмотрения указанного рисунка пользователь программы может сделать выводы, что уравнение состояния Пенга – Робинсона:

- хорошо описывает плотность газа в широком диапазоне термодинамических условий;
- хорошо описывает плотность сверхкритической фазы;
- имеет высокие погрешности при расчете плотности жидкой фазы (причем как положительные, так и отрицательные в зависимости от приведенной температуры).

Кроме графического представления сравнительные данные могут иметь вид таблиц с указанием значений погрешности расчетов.

Проводя аналогичные сравнения для других компонентов, присутствующих в технологическом процессе, проектировщик может сделать вывод о целесообразности использования той или иной модели для расчета свойств фаз.

В качестве дальнейшего развития программы рассматривается возможность сравнения экспериментальных и расчетных данных по фазовому равновесию для бинарных систем. К основным параметрам, по которым будет проводиться сравнение, отнесены составы паровой и жидкой фаз.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коньгин С.Б., Крючков Д.А.* Моделирование и расчет процессов и аппаратов (МиР ПиА). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015613176.
2. *Коньгин С.Б.* Модификация алгоритма определения доли отгона при расчете газожидкостного равновесия // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2015. – № 4(48). – С. 135–139.
3. *Уэйлес С.* Фазовые равновесия в химической технологии. Т. 2. – М.: Мир, 1987. – 300 с.
4. *Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И.* Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойства газоконденсатных смесей. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
5. *Термодинамика равновесия жидкость – пар /* Под. ред. А.Г. Морачевского. – Л.: Химия, 1989. – 344 с.
6. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Старс, 2006. – 720 с.

*Статья поступила в редакцию 21 марта 2016 г.*

## SOFTWARE FOR CHECKING MODELS THAT USING FOR GAS AND LIQUID PROPERTIES CALCULATION

*S.B. Konygin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*This paper is devoted to create software that allows check the correctness of gas and liquid properties models. This software can compare calculated values of density, enthalpy, thermal conductivity, viscosity and surface tension with available experimental data. Also it can check phase transition conditions. This software can help the process developers to choose models for specific case. Also this paper contains an comparison example of calculated propane density with experimental values.*

**Keywords:** *gas and liquid properties, phase equilibrium, equation of state.*

---

*Sergey B. Konygin, Doctor of Technical Sciences, Head of Department.*

УДК 681.391:543/545

## НЕПРЕРЫВНОЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИАЛЬНОГО БАЗИСА

*Р.Т. Сайфуллин*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Предложен метод вейвлет-обработки данных аналитических приборов с использованием радиальных базисных функций (РБФ). Вейвлет-преобразование (ВП) осуществляется в два этапа. На первом этапе производят интерполяцию отсчетов исходного дискретизированного сигнала с помощью РБФ. На втором этапе, зная весовые множители базисных функций, аналитическое выражение непрерывного ВП для конкретной базисной функции и вейвлета, на основе свойства линейности ВП восстанавливают непрерывное ВП исходного сигнала.*

**Ключевые слова:** вейвлет, вейвлет-преобразование, радиальная базисная функция, обработка сигналов аналитических приборов.

Вейвлет-анализ является одним из наиболее мощных и гибких средств исследования и цифровой обработки сигналов. Наряду с задачами фильтрации и сжатия сигналов анализ в базисе вейвлет-функций позволяет решать задачи идентификации, моделирования, аппроксимации стационарных и нестационарных процессов, исследовать вопросы наличия разрывов в производных и т. д.

Непрерывное вейвлет-преобразование (ВП) сигнала  $f(t)$  определяется соотношением

$$W_{\psi}(a, b)f = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

где функция  $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$  называется вейвлетом;  $a, b$  – параметры соответственно

масштаба и сдвига. Множитель  $a^{-\frac{1}{2}}$  обеспечивает единичную норму для любой функции  $\psi_{ab}(x) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ .

Коэффициенты  $W_{\psi}(a, b)f$  содержат комбинированную информацию как об исследуемом вейвлете, так и об анализируемом сигнале. Каждый вейвлет имеет характерные особенности во временном и частотном пространстве, поэтому с помощью разных вейвлетов можно полнее выявить или подчеркнуть те или иные свойства анализируемого сигнала. Таким образом, вейвлет-анализ сигнала благодаря изменению масштаба вейвлет-функций способен выявить различия в характеристиках сигнала на различных шкалах, а посредством сдвига можно

проанализировать свойства сигнала в различных точках на всем исследуемом интервале.

В качестве вейвлетов очень часто используются производные функции Гаусса:

$$\psi_n(x) = (-1)^{n+1} \frac{d^n}{dx^n} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

При этом наибольшее применение находят гауссовы вейвлеты небольших порядков:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= -xe^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_2(x) &= (1-x^2)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_3(x) &= (x^3-3x)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_4(x) &= (-x^4+6x^2-3)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_5(x) &= (-x^5+10x^3-15x)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_6(x) &= (-6x^6+15x^4-45x^2+15)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_7(x) &= (-x^7+21x^5-105x^3+105x)e^{-\frac{x^2}{2}}; \\ \psi_8(x) &= (-x^8+28x^6-210x^4+420x^2-105)e^{-\frac{x^2}{2}}. \end{aligned} \tag{2}$$

Присутствие экспоненциального множителя в вейвлетах обеспечивает их локальность. Из определения гауссовых вейвлетов следует, что производная от вейвлета  $\psi_n(x)$  совпадает (с точностью до знака) с вейвлетом  $\psi_{n+1}(x)$ :

$$\frac{d\psi_n(x)}{dx} = -\psi_{n+1}(x).$$

Численная реализация непрерывного ВП сигналов аналитических приборов во временной области на основе выражения (1) рассмотрена в работе [2]. В данной работе с целью расширения функциональных возможностей вейвлет-обработки сигналов для реализации непрерывного ВП предлагается использовать радиальный базис. При этом вейвлет-преобразование осуществляется в два этапа.

На первом этапе производится интерполяция отсчетов исходного дискретизированного сигнала с помощью выбранных радиально-базисных функций [3]. В результате получают разложение исходного сигнала в виде взвешенной суммы базисных функций.

На втором этапе, зная весовые множители базисных функций, полученные на первом этапе, и аналитическое выражение непрерывного ВП для конкретных базисных функций и вейвлета, используя свойство линейности вейвлет-преобразования, восстанавливают ВП исходного сигнала. Таким образом, по коэффициентам разложения исходного сигнала в выбранной системе базисных функций можно достаточно просто восстановить вейвлет-преобразование этого сигнала. Для этого достаточно заранее получить аналитические выражения непрерывного ВП выбранной базисной функции и интересующих вейвлетов.

Рассмотрим более подробно каждый этап.

**Этап I. Интерполяция с помощью радиально-базисных функций.** Для выходного сигнала аналитического прибора дискретизированные отсчеты представляются рядом участков, каждый длиной  $n$ . Внутри участков используются локальные координаты. Для каждого из участков находится интерполяция отсчетов исходного сигнала непрерывной функцией вида

$$f(x) = \sum_{i=1}^n p_i e^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\beta^2}}, \quad (3)$$

где  $\beta$  – параметр ширины РБФ-функций;  $p_i$  – неизвестные коэффициенты (веса). Элементам суммы соответствуют центры РБФ-функций в точках  $x_i$ .

Для каждого участка получают систему из  $n$  линейных уравнений (число неизвестных  $p_i$  также равно  $n$ ):

$$\sum_{i=1}^n e^{-\frac{(x_j-x_i)^2}{2\beta^2}} \cdot p_i = f(x_j), \quad j = \overline{1, n}$$

или в матричном виде:

$$E \cdot P = F, \quad (4)$$

где матрица  $E$  состоит из элементов  $e^{-\frac{(x_j-x_i)^2}{2\beta^2}}$  со столбцами  $i = \overline{1, n}$  и строками  $j = \overline{1, n}$ . Если  $\Delta$  – интервал равномерной дискретизации сигнала, то матрица  $E$  будет иметь вид

$$E = \begin{pmatrix} 1 & e^{-\frac{\Delta^2}{2\beta^2}} & \dots & e^{-\frac{(n\Delta)^2}{2\beta^2}} \\ e^{-\frac{\Delta^2}{2\beta^2}} & 1 & \dots & e^{-\frac{[(n-1)\Delta]^2}{2\beta^2}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{-\frac{(n\Delta)^2}{2\beta^2}} & e^{-\frac{[(n-1)\Delta]^2}{2\beta^2}} & \dots & 1 \end{pmatrix}.$$

Вектор  $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$ , вектор  $F = (f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n))^T$ ,  $T$  – знак транспонирования. Длина участка  $n$  и параметр ширины  $\beta$  РБФ функций подбираются экспериментально.

Полученная система уравнений (4) из-за плохой обусловленности матрицы  $E$  не всегда может иметь решение

$$P = E^{-1} \cdot F.$$

В этом случае необходимо применять методы регуляризации – например, использовать расчет псевдообратной матрицы  $P = E^+ \cdot F$  ( $E^+$  – псевдообратная матрица) либо регуляризацию по А.Н. Тихонову [4]. В результате исходный дискретизированный сигнал может быть представлен соотношением (3).

**Аналитическое вычисление непрерывного ВП базисной функции.** Пусть

используется гауссова базисная функция  $s(x) = pe^{-\frac{(x-x_i)^2}{2\beta^2}}$  с параметрами веса  $p$  и ширины  $\beta$ . Вейвлет-образ этой базисной функции при использовании гауссовых вейвлетов (2) может быть вычислен аналитически и представлен в виде [5]

$$W_{\psi_n}(a, b)s = \frac{p\sqrt{\pi}\beta a^{(n+1)}}{\tau^{n+1}}\psi_n(z),$$

где  $z = \frac{x_i - b}{\tau}$ ,  $\tau = \sqrt{a^2 + \beta^2}$ .

Например, формулы вейвлет-коэффициентов второго и четвертого порядков имеют вид:

$$W_{\psi_2}(a, b)s = \frac{\sqrt{\pi}p\beta a^3}{\tau^3} \left[ 1 - \frac{(x_i - b)^2}{\tau^2} \right] e^{-\frac{(x_i - b)^2}{2\tau^2}}; \quad (5)$$

$$W_{\psi_4}(a, b)s = \frac{\sqrt{\pi}p\beta a^5}{\tau^5} \left[ 6\left(\frac{x_i - b}{\tau}\right)^2 - \left(\frac{x_i - b}{\tau}\right)^4 - 3 \right] e^{-\frac{(x_i - b)^2}{2\tau^2}}. \quad (6)$$

**Этап 2. Восстановление непрерывного ВП сигнала.** Пусть требуется произвести вейвлет-преобразование сигнала с использованием гауссового вейвлета второго и четвертого порядков. В каждой точке  $x_i$  дискретизированного сигнала известен весовой множитель  $p_i$  базисной функции (получен на первом этапе). Для конкретной базисной функции и вейвлета имеем аналитическое выражение для непрерывного ВП. Для гауссовой базисной функции и гауссового вейвлета второго и четвертого порядков это соотношения (5) и (6). Используя свойство линейности ВП, записываем требуемые непрерывные ВП для исходного сигнала, представленного в виде (4):

$$W_{\psi_2}(a, b)f = \sum_{i=1}^n p_i \frac{\sqrt{\pi}\beta a^3}{\tau^3} \left[ 1 - \frac{(x_i - b)^2}{\tau^2} \right] e^{-\frac{(x_i - b)^2}{2\tau^2}};$$

$$W_{\psi_4}(a, b)f = \sum_{i=1}^n p_i \frac{\sqrt{\pi}\beta a^5}{\tau^5} \left[ 6\left(\frac{x_i - b}{\tau}\right)^2 - \left(\frac{x_i - b}{\tau}\right)^4 - 3 \right] e^{-\frac{(x_i - b)^2}{2\tau^2}}.$$

Таким образом, благодаря использованию заранее полученных аналитических формул для непрерывного вейвлет-преобразования базисных функций и вейвлетов удастся построить быстрые вычислительные алгоритмы вейвлет-обработки, что в сочетании с их высокой эффективностью является значительным достоинством метода.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малашкевич И.А. Вейвлет-анализ сигналов. Теория и практика. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. – 224 с.
2. Сайфуллин Р.Т., Наумов А.А. Численная реализация непрерывного вейвлет-преобразования во временной и частотных областях // Информационно-измерительные и управляющие системы: сб. науч. статей.– Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2016. – Вып. 2(14). – С. 90–95.
3. Акимов А.В., Дрюченко М.А., Сирота А.А. Модели и алгоритмы внесения деформирующих искажений на изображениях с использованием радиально-базисных функций // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – № 1. – С. 130–137.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
5. Сайфуллин Р.Т., Наумов А.А. Обработка выходных сигналов аналитических приборов на основе вейвлет-преобразования // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. – Самара: Самар. гос. тех. ун-т, 2015. – Вып. 1 (11). – С. 108–113.

*Статья поступила в редакцию 1 апреля 2016 г.*

## CONTINUOUS WAVELET SIGNALS TRANSFORMING IN ANALYTICAL INSTRUMENTS WITH RADIAL BASIS USING

***R.T. Saifullin***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, Russia, 443100, Russian Federation

*In this paper we propose a method of wavelet data processing in analytical instruments by radial basis function (RBF) using. The wavelet transform (VT) is carried out in two stages. On the first stage the interpolation of the initial signal samples by RBF using is carried. On the second stage is reduced continuously VT of the original signal with using of the linearity property of the wavelet transform and with knowing of the weight coefficients of the basis functions, the analytical expression for a continual VT and wavelet basis function.*

***Keywords:*** *wavelet, wavelet transform, radial basis function, data acquisition in the analytical instrumentation.*