

УДК 629.7.023

В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский, М.Е. Харченко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ
УГЛЕСОТОПЛАСТА ПРИ ПОМОЩИ МКЭ-ПОДДЕРЖКИ**

При помощи МКЭ-поддержки оценено влияние различных схем армирования наполнителя углепластиковых сотов на его приведенные физико-механические характеристики. Приведены результаты серии численных экспериментов виртуальных образцов углесотопласта, имитирующих натурные испытания на поперечное растяжение и сдвиг параллельно и перпендикулярно клеевым полосам. Показано, что максимальные величины модулей упругости при поперечном растяжении углесотопласта соответствует схеме армирования $[\pm 75^\circ]$, а при сдвиге – $[\pm 45^\circ]$. Определена рациональная схема армирования углесотопласта $[\pm 64^\circ]$, обеспечивающая одновременно высокий уровень всех физико-механических характеристик. Выявлено снижение физико-механических характеристик углесотопласта от его высоты.

УГЛЕСОТОПЛАСТ, ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ВИРТУАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, СХЕМА АРМИРОВАНИЯ.

Одним из приоритетных направлений по выбору рациональной конструктивно-силовой схемы для конструкций современной аэрокосмической техники является широкое применение трехслойных конструкций, элементы которых состоят из двух несущих слоев (НС) и заполнителя различной конфигурации между ними [1]. Одним из наиболее распространенных типов заполнителя является сотовый с ячейкой правильной шестигранной формы. Такой сотовый заполнитель (СЗ) технологичен, обладает высокими удельными жесткостными и прочностными характеристиками [2, 3]. В качестве его основы обычно служит алюминиевая фольга, полимерная бумага или стеклопластик [2 – 5].

В настоящее время все шире используются соты на основе углеволокон, что позволяет в значительной мере повысить прочность и жесткость сотовых конструкций, а также увеличить ресурс их работы. Углесотопласт (УСП), имея максимальные абсолютные и удельные показатели прочности и жесткости при сдвиге и сжатии

© Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В.,
Сливинский В.И., Харченко М.Е., 2012

[4, 5], обладает минимальным коэффициентом линейного расширения, что в сочетании с углепластиковыми несущими слоями (НС) позволяет создать химически однородные размеростабильные конструкции, которые широко применяются в аэрокосмической отрасли [6].

Расчетами и испытаниями установлено, что для СЗ основными упругими физико-механическими характеристиками (ФМХ) являются модуль упругости в направлении, перпендикулярном НС – E_z и модули сдвига в плоскостях граней сотов параллельно и перпендикулярно клеевым полосам соответственно – G_{xz} и G_{yz} [2 – 3]. Величины остальных модулей упругости и сдвига пренебрежимо малы и в расчетах обычно не учитываются. В большинстве случаев в зависимости от степени ответственности трехслойных сотовых конструкций заключение о величинах его приведенных ФМХ производятся только по результатам обработки натуральных испытаний сотов, которые являются весьма дорогостоящими, особенно при использовании для сотов углеродного наполнителя.

Учитывая выше сказанное, представляется обоснованным применение программного комплекса метода конечных элементов (МКЭ) для проведения серии численных экспериментов, имитирующих натурные испытания [2, 3].

Нами ранее в работе [7] при помощи МКЭ-поддержки оценено влияние различных схем армирования наполнителя углепластиковых сотов на приведенные модули сдвига и показано, что их максимальные величины, соответствующих схеме $[\pm 45^\circ]$, больше минимальных, соответствующих схеме армирования $[0^\circ; 90^\circ]$, более чем в 5 раз.

Ниже приводятся результаты поиска рациональной схемы армирования наполнителя УСП, которая одновременно обеспечивала бы высокий уровень для всех приведенных ФМХ – модуля упругости E_z и сдвига G_{xz} и G_{yz} .

Принятые для дальнейших численных экспериментов в программном комплексе МКЭ ФМХ углеродного наполнителя для УСП представлены в табл. 1.

Таблица 1

Принятые для дальнейших численных экспериментов
ФМХ углеродного наполнителя УСП

Марка углепластика	Толщина препрега (монослоя), t , мм	Модуль упругости вдоль волокон, E_1 , ГПа	Модуль упругости поперек волокон, E_2 , ГПа	Модуль сдвига G_{12} , ГПа	Коэффициент Пуассона, μ_{12}

КМУ-4Э	0,1	115	28,3	5,5	0,25
--------	-----	-----	------	-----	------

Для определения модулей упругости при сдвиге УСП с правильной шестигранной ячейкой в программном комплексе МКЭ имитировались испытания на сдвиг сдвоенных образцов методом растяжения по ОСТ 101188-92) [2, 3]. Моделирование произведено для 162 полных ячеек сотов. При определении модуля сдвига в плоскости ХОZ (параллельно клеевым полосам) образец был сориентирован сдвоенными гранями по направлению нагружения, которое произведено по средней накладке усилием 90Н (по 10Н в 9 точках) (рис. 1, а). Для определения модуля сдвига в плоскости ХОУ (перпендикулярно клеевым полосам) моделирование произведено на той же модели МКЭ, но нагружение проводилось изведем в другом направлении по средней накладке усилием 200Н (по 10Н в 20 точках) (рис. 1, б). Закрепление моделей МКЭ произведено по боковым ненагруженным накладкам по всем линейным перемещениям. В качестве материала для внешних пластин моделей МКЭ испытательного приспособления при сдвиге УСП принята сталь ($E_{накл} = 210 \text{ ГПа}$); толщина центральной пластины равна 10мм, краевых – 5мм.

Для определения модуля упругости УСП при поперечном растяжении E_z моделирование было произведено на единичном образце описанной выше модели МКЭ. Нагружение проводилось по внешней накладке давлением 0.1МПа, а закрепление по другой накладке на все линейные перемещения (рис. 1, в).

На рис. 1 представлены сгенерированные конечно-элементные модели образцов для определения модулей упругости УСП и соответствующие им граничные условия.

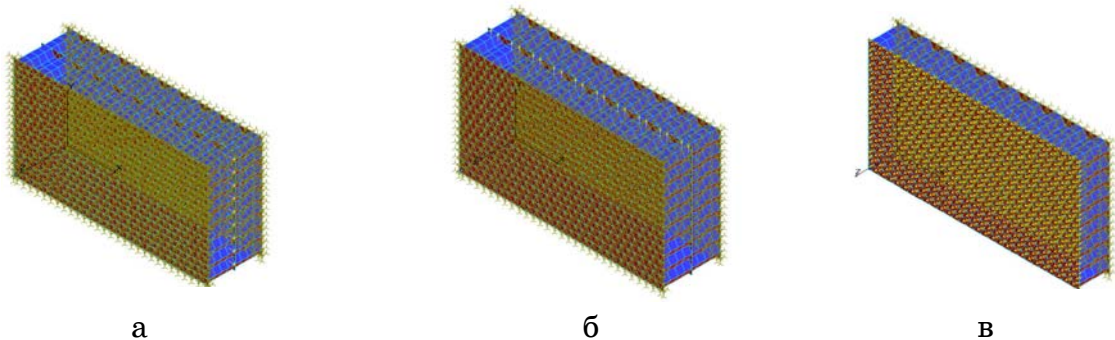


Рис.1. Сгенерированная конечно-элементная модель образцов УСП высотой 20 мм:

а – для определения модуля сдвига G_{xz} ;

б – для определения модуля сдвига G_{yz} ;

в – для определения модуля упругости при поперечном растяжении E_z

На рис. 2 представлены полученные в результате численного эксперимента деформированные состояния виртуальных образцов УСП.

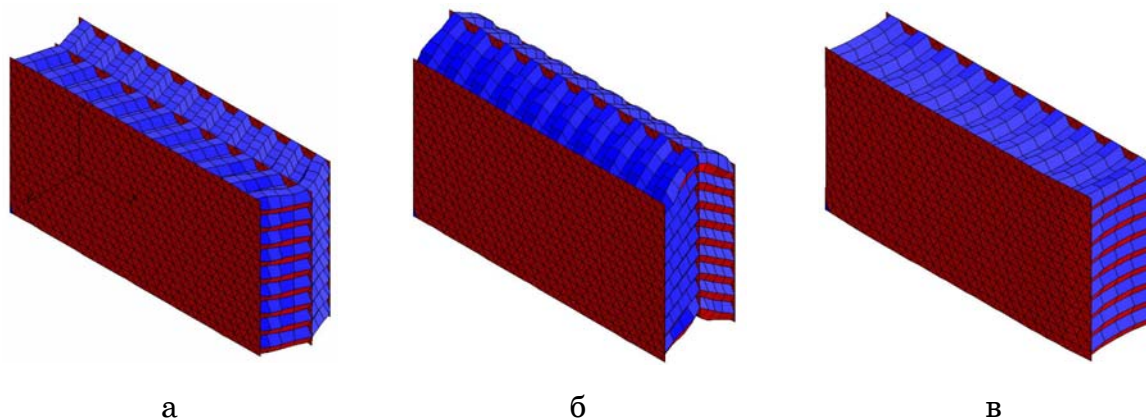


Рис. 2. Деформированные состояния моделей МКЭ виртуального образца УСП высотой 20 мм:

а – при определении модуля сдвига G_{xz} ;

б – при определении модуля сдвига G_{yz} ;

в – при определении модуля упругости при поперечном растяжении E_z

Как известно, решение краевой задачи линейной теории упругости возможно в постановке перемещений и напряжений. При нахождении величин приведенных ФМХ УСП в качестве граничных условий были использованы картины перемещений. Учитывая, что наличие краевых эффектов делает эти картины неравномерными, то в качестве расчетных были использованы осредненные по всем узлам величины перемещений. При этом величины модулей упругости определились по стандартным методикам для рассматриваемых схем испытаний [2, 3].

В табл. 2 представлены полученные результаты реализации серии численных экспериментов в программном комплексе МКЭ по нахождению модулей упругости УСП для рассматриваемых схем армирования наполнителя различной высоты.

На рис. 3 представлена система координат, принятая для отсчитывания различных углов армирования $\pm\varphi$ УСП.

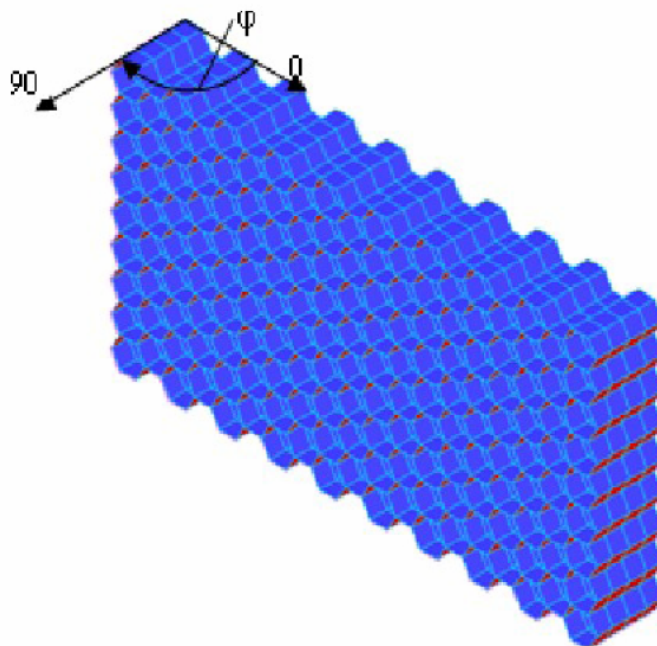


Рис. 3. Система координат, принятая для отсчитывания различных углов армирования УСП

Таблица 2

Зависимость ФМХ УСП от схемы армирования УСП и его высоты

Размер грани ячейки СЗ a_c , мм	Схема армирования УСП	Высота УСП в образцах $h_{сз}$, мм	Модуль упругости при поперечном растяжении E_z , МПа	Модуль упругости при сдвиге параллельно клеевым полосам G_{xz} , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП перпендикулярно клеевым полосам G_{yz} , МПа
5	[0°; 90°]	10	4520	235	201
		20	4511	221	165
		30	4505	211	149
	[±15°]	10	1712	478	354
		20	1688	447	310
		30	1671	427	289
	[±30°]	10	1808	962	678
		20	1699	900	611
		30	1624	858	565
	[±45°]	10	2679	1210	842
		20	2423	1137	770
		30	2269	1083	714
	[±60°]	10	4488	979	690
		20	4270	931	639
		30	4141	895	602
	[±75°]	10	6425	488	369
		20	6367	468	333
		30	6328	451	312

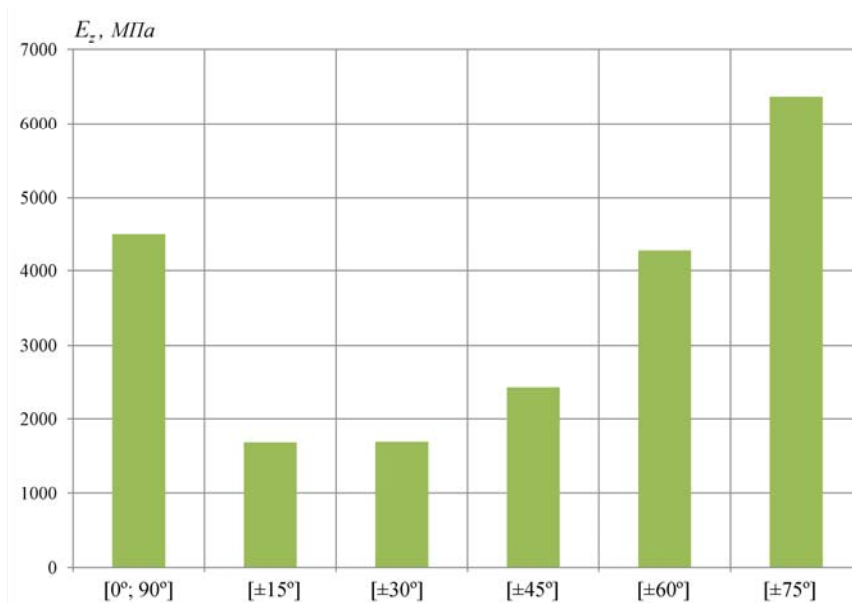


Рис. 4. Гистограмма зависимости модуля упругости УСП при поперечном растяжении от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{cz}=20$ мм

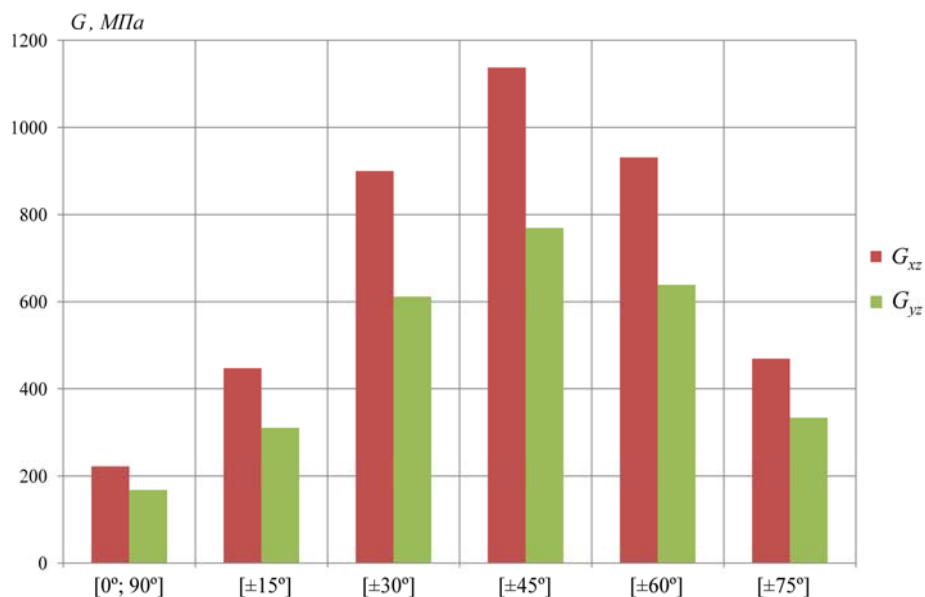


Рис. 5. Гистограмма зависимости модулей упругости УСП при сдвиге от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{cz}=20$ мм

Полученные результаты свидетельствуют о том, что максимальные приведенные модули упругости УСП при растяжении и сдвиге обеспечивают различные схемы армирования сотов. Так, при схеме армирования [±45°] УСП имеет максимальные приведенные ФМХ при сдвиге, а при схеме [±75°] – при растяжении. Также наблюдается некоторое снижение ФМХ УСП с ростом его высоты.

Для определения рациональной схемы армирования УСП, обеспечивающей одновременно высокий уровень приведенных ФМХ при растяжении и сдвиге, построим график зависимости следующих относительных ФМХ УСП

$$\bar{E}_z = \frac{E_z}{E_z^{\max}}, \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}} \quad (1)$$

от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя (рис. 6).

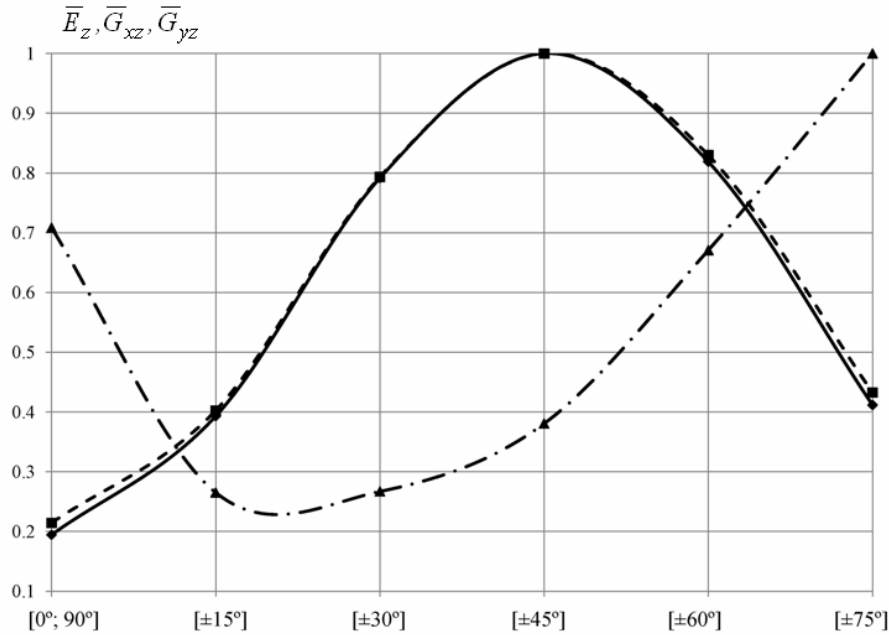


Рис. 6. График зависимости относительных приведенных ФМХ УСП от схемы армирования сотов при фиксированной высоте заполнителя $h_{c3}=20\text{мм}$

$$\text{—} \blacksquare \text{—} - \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \text{---} \blacksquare \text{---} - \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}}, \text{-} \blacktriangle \text{-} \cdot \text{-} - \bar{E}_z = \frac{E_z}{E_z^{\max}}$$

Анализ полученных результатов свидетельствуют о том, что одновременно высокий уровень ФМХ УСП при поперечном растяжении и сдвиге возможен только для схем армирования сотов, лежащих в диапазоне $\pm 60^\circ \dots \pm 70^\circ$.

В табл. 3 представлены результаты реализации серии численных экспериментов в программном комплексе МКЭ по нахождению ФМХ УСП для близких к рациональной схем армирования сотов при $h_{c3}=20\text{мм}$.

Учитывая, что величины относительных ФМХ УСП при сдвиге \bar{G}_{xz} , \bar{G}_{yz} практически совпадают (см. рис. 6), то при определении

рациональной схемы армирования сотов будем ориентироваться только на модули упругости при поперечном растяжении E_z и сдвиге параллельно клеевым полосам G_{xz} .

Таблица 3
Зависимость ФМХ УСП от схем армирования сотов, близких к рациональной

Размер грани ячейки СЗ a_c , мм	Высота УСП в образцах h_{c3} , мм	Схема армирования сотов	Модуль упругости при поперечном растяжении E_z , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП параллельно клеевым полосам G_{xz} , МПа	Модуль упругости при сдвиге УСП перпендикулярно клеевым полосам G_{yz} , МПа
5	20	$[\pm 60^\circ]$	4270	931	639
		$[\pm 65^\circ]$	5026	784	542
		$[\pm 70^\circ]$	5746	622	435

График зависимости относительных модулей упругости при поперечном растяжении и сдвиге от схем армирования УСП, близких к рациональной, при фиксированной высоте заполнителя представлен на рис. 7.

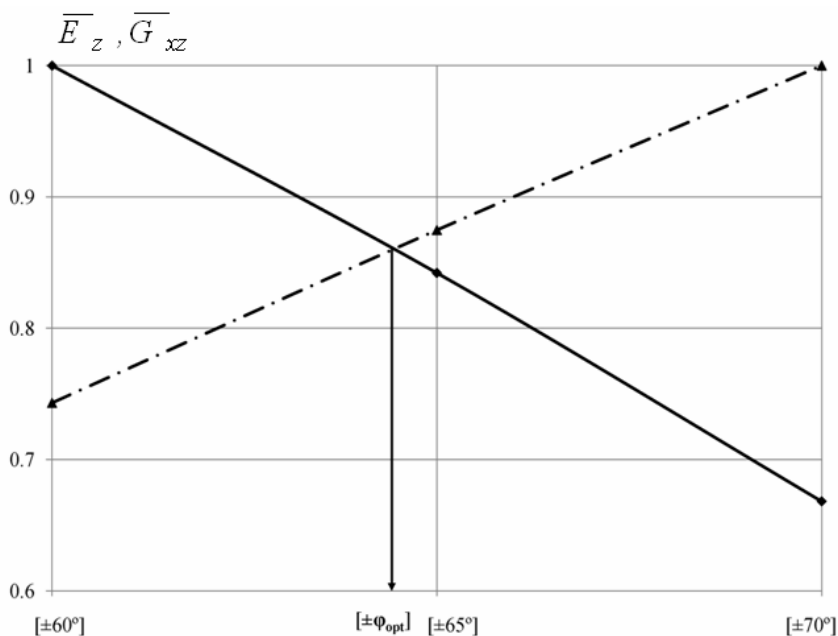


Рис. 7. График зависимости модулей упругости и сдвига параллельно клеевым полосам от схем армирования сотов, близких к рациональной при фиксированной высоте заполнителя $h_{c3}=20$ мм

$$\text{—} \bullet \text{—} - \bar{G}_{xz} = \frac{G_{xz}}{G_{xz}^{\max}}, \quad \text{—} \blacksquare \text{—} - \bar{G}_{yz} = \frac{G_{yz}}{G_{yz}^{\max}}$$

Анализ полученных результатов свидетельствуют о том, что одновременно достаточно высокий уровень ФМХ УСП при поперечном растяжении и сдвиге обеспечивает схема армирования $\pm 64^\circ$.

Выводы

Проанализировав полученные выше результаты, можно сделать следующие выводы.

1. Схема армирования УСП существенным образом влияет на его ФМХ. Так, к примеру, для высоты сотов $h_{сз}=20$ мм величины максимальных модулей сдвига УСП, соответствующих схеме армирования $[\pm 45^\circ]$, превосходят минимальные при схеме армирования $[0^\circ; 90^\circ]$ более чем в 5 раз. Максимальный модуль упругости УСП при поперечном растяжении, соответствующий схеме армирования $[\pm 75^\circ]$, превосходит минимальный при схеме армирования $[\pm 15^\circ]$ более чем в 3 раза.

2. Для обеспечения одновременно высокого уровня модулей упругости при растяжении и сдвига УСП, необходимо ориентироваться на схему армирования $\pm 64^\circ$.

3. Наблюдается снижение значений ФМХ УСП от его высоты. Так при схеме армирования основы сотов $[\pm 45^\circ]$ для модуля сдвига параллельно клеевым полосам снижение модуля сдвига составляет $\Delta G_{xz}(h_{сз}) \approx 10\%$, а перпендикулярно – $\Delta G_{yz}(h_{сз}) \approx 15\%$ относительно этих значений при высоте СЗ $h_{сз}=10$ мм. При поперечном растяжении снижение модуля упругости для схемы армирования $[\pm 75^\circ]$ соответственно равно $\Delta E_z(h_{сз}) \approx 2\%$.

Список литературы

1. Иванов А.А. Трехслойные конструкции с заполнителем в современной технике / А.А. Иванов, Ю.Л. Вильницкая. – М. : ЦНТИ «Поиск», 1987. – 154 с.
2. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем / В.Ф. Панин. – М.: Машиностроение, 1980. – 228 с.
3. Ендогур А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.

4. Сотовые наполнители в конструкциях авиационно-космического назначения / В.И. Сливинский, В.С. Зевако, Г.В. Ткаченко, О.А. Карпикова // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т.14. – №3. – С. 101 – 107.
5. Легкий и прочный конструкционный материал для ракетно-космической техники / В.И. Сливинский, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, А.И. Алямовский // Композиционные материалы в промышленности: сб. материалов 31 междунар. конф. 6-10 июня 2010г / Украинский информационный Центр «Наука. Техника. Технология». – Киев, 2011. – С. 407 – 410.
6. Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV междунар. науч.-практич. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – 200 с.
7. Оценка физико-механических характеристик углесотопласта различной схемы армирования при помощи МКЭ-поддержки / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.И. Сливинский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2011. – С. 54- 59.

УДК 681.876.2

А.И. Гуда, А.И. Михалев

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИ СИНТЕЗЕ КРИТЕРИЯ
АДАПТИВНО-ПОИСКОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОРЕНСА**

В статье показаны физические основы при создании работоспособного критерия идентификации нелинейной хаотической системы Лоренса. Проведены исследования свойств полученного критерия. Создана и проверена модель системы идентификации на основе полученного критерия.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА, КРИТЕРИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ, НЕЛИНЕЙНАЯ СИСТЕМА ЛОРЕНСА.

Введение

Системы хаотической динамики являются одними из самых сложных объектов для методов идентификации. Даже системы адаптивно-поисковой идентификации [2], демонстрирующие работоспособность для широкого класса задач, в чистом виде оказываются непригодными для идентификации хаотических систем. В этих случаях, для построения эффективной системы идентификации требуется синтез специального критерия, отображающего интересующие свойства динамики системы.

При синтезе данного критерия на эмпирических принципах [9], возможно создание работоспособной системы идентификации, но, как правило, скорость и точность работы полученной системы будут посредственными. Лучшие результаты достигаются, как правило, при синтезе критерия идентификации, основанного на физических свойствах рассматриваемой системы [4, 10].

Динамическая система Лоренса [1] является одной из наиболее изученных хаотических систем. При этом, существует множество физических систем, для описания которых применима модель Лоренса. Это дает определённые основания предполагать, что синтез критерия идентификации, основанного на физических принципах, для данной системы будет успешным.

© Гуда А.И., Михалев А.И., 2012

Постановка задачи

Динамика системы Лоренса описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x); \\ \dot{y} = x(r - z) - y; \\ \dot{z} = xy - bz. \end{cases} \quad (1)$$

где x, y, z – переменные состояния системы, σ, r, b – параметры.

Наиболее важным параметром, определяющим режим работы системы, является r . Как следствие, идентификация данного параметра представляет наибольший интерес.

Система проявляет хаотическую динамику в широком диапазоне параметров. Помимо этого, спектр данной системы в хаотическом режиме довольно широк (см. рис. 1), и не имеет доминирующих частот, что не характерно для многих систем динамического хаоса.

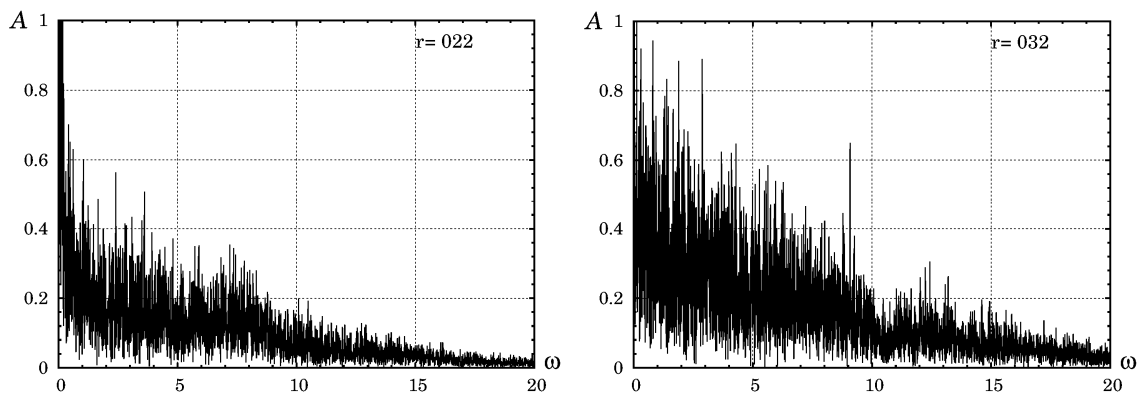


Рис 1. – Спектры системы (1) при $r = 23$, $r = 32$, $b = 2.667$ и $\sigma = 10$

Только при высоких значениях параметра r , когда система демонстрирует сложно-периодическое движение, в спектре проявляются характерные пики (рис. 2)

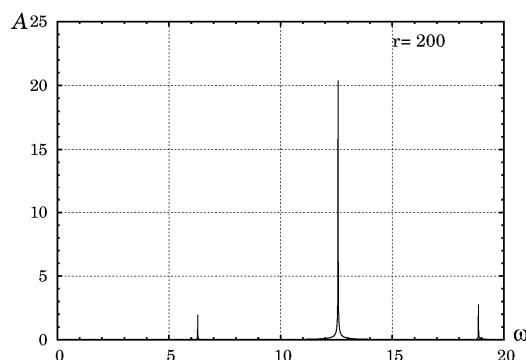


Рис 2. – Спектры системы (1) при $r = 200$, $b = 2.667$ и $\sigma = 10$

Синтез критерия идентификации

Для синтеза критерия идентификации параметра r системы (1), рассмотрим набор физических систем, для моделирования которых применяется система Лоренса.

Исторически первой такой системой, рассмотренной самим Лоренсом, является задача о тепловой конвекции жидкости в плоском слое. Исходная система уравнений гидродинамики имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(T \vec{v}) = \chi \Delta T; \\ \rho = \rho_0 (1 - \gamma(T - T_0)). \end{array} \right. \quad (2)$$

где \vec{v} – поле скоростей, T – поле температуры, T_0 и $T + \Delta T$ – температуры на верхней и нижней границе соответственно, ρ и p – поля плотности и давления, g – ускорение свободного падения, ν , χ и γ – коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности и теплового расширения.

При приближении системы (2) к виду (1), переменные и параметры системы Лоренса определяются следующим образом: x задаёт скорость вращения валов течения, y , z – соответствуют распределению температуры по горизонтали и вертикали. σ – число Прандтля (отношение коэффициентов кинематической вязкости и температуропроводности). Параметр b определяет отношения размеров ячейки. r – (идентифицируемый параметр) – приведённое число Релея, определяющее энергетические параметры конвекционного течения.

Из трёх переменных состояния проще всего наблюдению поддаётся переменная x . С другой стороны, так как параметр r определяет энергетические соотношения в системе, то и критерий качества должен представлять собой квадратичную форму от x , причём усреднённую на интервале времени, существенно большем, чем характерное время оборота жидкостного вала.

Другой системой, для моделирования которой применяется система Лоренса – это модель одномодового лазера. В этой модели

переменной x соответствует амплитуда поля в резонаторе, y – поляризации, z – инверсии заселённости квантовых уровней активной среды. Параметры σ , b определяются отношениями коэффициентов релаксации, а искомый параметр r определяется удельной мощностью накачки.

Как и в случае гидродинамической системы, наиболее просто наблюдаемым параметром является x – именно он определяет выходную интенсивность. И опять же, по аналогии – идентифицируемый параметр r определяет энергетику системы. При переходе от амплитуды к мощности совершенно аналогично следует использовать квадратичную зависимость.

Таким образом, информационный параметр Q для синтеза критерия идентификации имеет смысл определить следующим образом:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau}(x(t) - Q(t)) \quad (3)$$

Полученная в результате моделирования зависимость $Q(r)$ представлена на рис. 3.

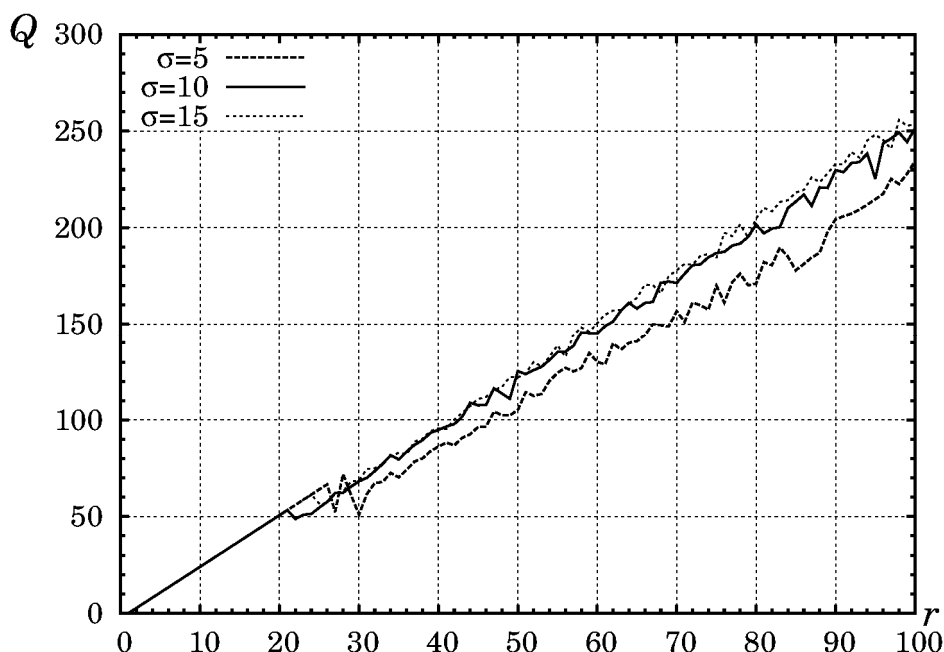


Рис. 3 – Зависимость $Q(r)$ для системы (1) при различных значениях σ

Из графика следует, что в исследуемом диапазоне значений параметра r эта зависимость имеет практически линейный характер. Не наблюдается никаких существенных отклонений при смене

режима динамики системы. Все это даёт основания полагать, что величина Q , определённая по (3) является хорошей основой при построении критерия идентификации.

Для масштабирования информационного параметра и приведения к критерию идентификации, используется стандартный приём адаптивно-поисковой идентификации:

$$F = \exp(-\gamma(Q_o - Q_m)^2). \quad (4)$$

где Q_o и Q_m – величины, определяемые (3) для модели и объекта соответственно, γ – чувствительность критерия.

Следует также отметить, что значения на графике рис. 3 были получены при $\tau \approx 3$, соответствующем приблизительно пяти-десяти характерным временам системы (1). Это даёт основания полагать, что система идентификации будет обладать хорошим быстродействием.

Моделирование процесса идентификации

Для моделирования процесса идентификации системы вида (1) адаптивно-поисковым методом с двумя УПК и предлагаемым критерием вида (3) была собрана соответствующая схема в программе qmо2 (рис. 4).

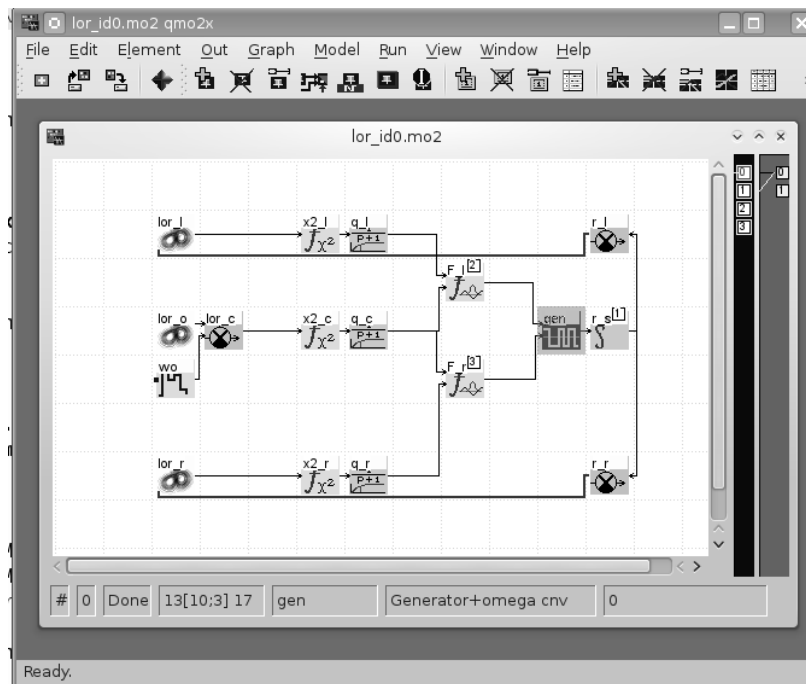


Рис. 4 – Моделируемая система идентификации в программе qmо2

Проводилось моделирование процесса идентификации с критерием, основанным на величине Q , определённой по (3).

Результаты моделирования процесса идентификации для различных начальных значений коэффициента r :

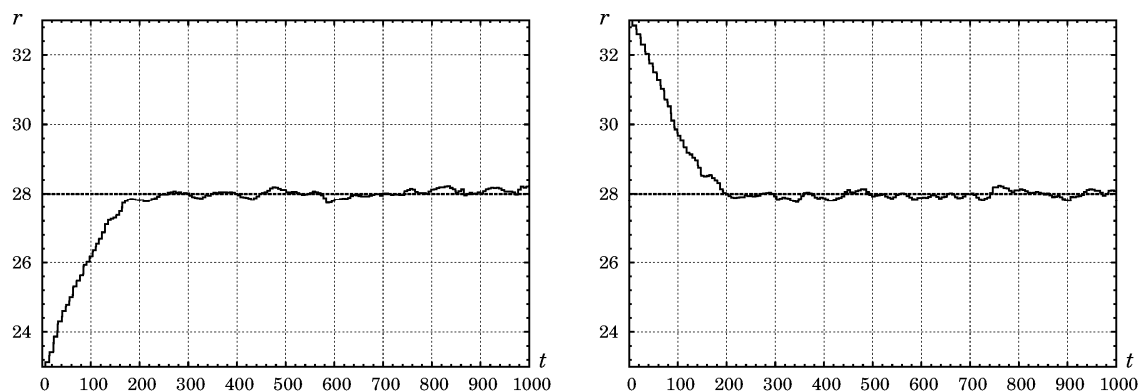


Рис. 5 – Результаты моделирования процесса идентификации параметра r при различных начальных значениях

Следует также отметить, что скорость поиска выше, чем для системы Чуа [10], и как минимум на порядок выше, чем для систем Ван-Дер-Поля [2, 8], Дuffинга [5] и Рёсслера [9]. Это подтверждает тезис о том, что правильный выбор физического обоснования критерия идентификации позволяет достичь лучших результатов, чем эмпирический подход.

Выводы

Результаты моделирования динамики нелинейной автоколебательной системы Лоренса позволяют сделать следующие выводы:

1. применение физических принципов при синтезе критерия идентификации для системы Лоренса показало хорошие результаты;
2. анализ различных физических объектов, описываемых моделью Лоренса, даёт одинаковые предпосылки для создания критерия;
3. скорость и точность работы полученной системы идентификации превосходят аналогичные параметры для системы Чуа, и практически не уступают соответствующим показателям систем идентификации нехаотических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов С.П. Динамический хаос (курс лекций). / С.П. Кузнецов – М.: Издательство Физико-математической литературы, 2001. – 296с.
2. Михалёв А.И. Выбор критерия при адаптивно-поисковой идентификации динамической системы Ван-Дер-Поля / А.И. Михалёв, А.И. Гуда // Адаптивные системы автоматического управления. – 2010. – № 16(36). – С. 154–160.
3. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах. / В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова, А.Б. Нейман, Г.И. Стрелкова, Л Шиманский-Гайер. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 544 стр.
4. Михалёв А.И. Синтез критерия идентификации нелинейных динамических систем на физических принципах / А.И. Михалёв, А.И. Гуда, Е.Ю. Новикова // Адаптивные системы автоматического управления. – 2007. – № 11(31). – С. 136–142.
5. Михалёв А.И. Адаптивно-поисковая идентификация хаотической динамической системы Дуффинга / А.И. Михалёв, А.И. Гуда // Адаптивные системы автоматического управления. – 2008. – № 12(32). – С. 166–171.
6. Магницкий Н.А. Новые методы хаотической динамики. / Н.А. Магницкий, С.В. Сидоров – М.: Едиториал УРСС, 2004 – 320 с.
7. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. / Ф. Мун – М.: Мир, 1990. – 312 с.
8. Гуда А.И. Исследование альтернативного критерия при адаптивно-поисковой идентификации динамической системы Ван-Дер-Поля / А.И. Гуда, А.И. Михалёв // Адаптивные системы автоматического управления. – 2010. – № 17(37). – С. 149–154.
9. Гуда А.И. Адаптивно-поисковая идентификация хаотической динамической системы Рёсслера / А.И. Гуда, А.И. Михалёв // Адаптивные системы автоматического управления. – 2009. – № 14(34). – С. 124–129.
10. Гуда А.И. Синтез критерия при адаптивно-поисковой идентификации динамической системы Чуа / А.И. Гуда, А.И. Михалев // Адаптивные системы автоматического управления. – 2011. – № 18(38). – С. 140 – 146.

УДК 004.93:681.32

А.П.Гожий

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЭВОЛЮЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СЦЕНАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ.

Рассмотрены многокритериальные эволюционные методы и алгоритмы. Проанализированы основные особенности реализации основных эволюционных алгоритмов. Рассмотрена и проанализирована возможность применения эволюционных алгоритмов в задачах сценарного планирования.

В последнее время развитие методов многокритериальной оптимизации и многокритериальных методов принятия решений в различных областях стимулировалось за счет появления быстродействующих вычислительных систем и моделей численного анализа для решения разнообразных инженерных проблем. Было предложено большое количество новых методов и алгоритмов для решения многокритериальных задач в разных отраслях. При этом значительное развитие приобрели вычислительные методы и алгоритмы, которые базируются на эволюционных принципах, они нашли широкое распространение, так как большинство инженерных задач характеризуются NP-сложностью, поэтому в большинстве случаев основным критерием эффективности является быстрое вычисление приближенных решений.

Эволюционные алгоритмы (ЭА) являются техниками адаптивного поиска, которые базируются на естественных принципах [2, 4]. Адаптивная природа ЭА используются для разработки алгоритмов оптимизации и принятия решений путем создания соответствующих операторов вариации и аппроксимированных функций оценивания. Кроме того следует выделить еще основные преимущества эволюционных методов и алгоритмов при решении многокритериальных задач [4, 7].

– Независимость от вида функции, включая поддержку неаналитического задания функции.

© Гожий А.П., 2012

– Независимость от области определения и типов критериев принятия решений и переменных оптимизации.

– Применение к широкому диапазону задач без модификации алгоритма.

– Высокая помехозащищенность и как следствие адекватная робастность (способность лишь постепенно снижать качество работы по мере приближения к границам допустимой надежности данных).

Наиболее распространенными эволюционными алгоритмами, являются генетические алгоритмы [5, 6]. Генетические алгоритмы (ГА) - это одна из эволюционных техник, которая может успешно использоваться в качестве инструмента оптимизации и принятия решений [8, 9, 10]. Как правило, ГА работает с популяцией (набором решений), а не с одним решением. Подход на основе популяции в ГА делает его стойким к преждевременному останову, то есть это мощный инструмент для работы с нелинейными и мульти-модальными функциями.

Следует выделить основные особенности генетических алгоритмов как инструмента технологии многокритериального принятия решений:

– Вместе с обычным чаще всего используется закодированное представление значений параметров задачи (как правило, в виде хромосомы).

– Выполняется одновременный анализ различных областей пространства решений, в связи с чем возможно нахождение новых областей с лучшими значениями целевой функции за счет объединения субоптимальных решений из разных популяций.

– Поиск осуществляется не из единственной точки, а из «популяции» точек.

– В процессе поиска используется значение целевой функции, а не ее приращения.

– Применяются вероятностные, а не детерминированные правила поиска и генерации решений.

– Специфика работы позволяет накапливать и использовать знания об исследованном пространстве поиска и следовательно проявлять способность к самообучению.

В этой статье основное внимание уделяется вопросам применения разнообразных эволюционных алгоритмов в задачах выбора эффективных решений в сценарном планировании.

Существуют два основных подхода к решению задач многокритериальной оптимизации и принятия решений. *Первый* заключается в сочетании индивидуальных целевых функций в единую композитную функцию или применении наборов ограничений в всех целей, кроме одной. В первом случае определение одной цели возможно при использовании таких методов, как теория полезности, метод взвешенной суммы, и т.п., но при этом необходимо правильно подобрать веса или функцию полезности для того, чтобы отразить требования лица, принимающего решения (ЛПР). На практике может быть очень сложно точно и верно определить эти веса, даже для эксперта, который разбирается в предметной области. Результатом этих недостатков является то, что взаимное масштабирования между целями и небольшие изменения веса приводят к различным решениям. Во втором случае задача состоит в применении наборов ограничений в целевых функций, и конечный результат может быть довольно неустойчив к значениям этих ограничений. В обоих случаях, метод оптимизации вычислит только одно решение, хотя было целесообразнее получить набор решений и выбрать компромиссный вариант. Именно по этой причине, ЛПР, часто предпочитают наборам возможных решений, полученных с учетом нескольких критериев.

Другим основным подходом является определение набора точек оптимальных решений по Парето или определенного подмножества решений. Фронт Парето - это набор оптимальных решений, которые не доминируют относительно друг друга. При перемещении от одного решения Парето к другому всегда присутствует определенный проигрыш в одной цели и выигрыш в другой. Набор оптимальных решений по Парето часто предпочитают, потому что они имеют практическую пользу в реальных задачах, ведь окончательное решение – это всегда компромисс. Наборы оптимальных решений по Парето могут быть любых размеров, но эти размеры обычно увеличиваются с увеличением количества целевых функций.

Как подход, основанный на популяциях, ГА хорошо подходит для решения задач многокритериальной оптимизации и принятия решений. Стандартный ГА можно модифицировать для поиска набора нескольких недоминирующих решений за один проход. Способность

ГА параллельно производить поиск решений делает возможным нахождение набора различных решений сложных задач с невыпуклыми, разрывными и мультимодальными областями решений. Оператор кроссовера в ГА позволяет обрабатывать структуры хороших решений с учетом различных целей для того, чтобы создавать новые недоминирующие решения в неисследованных областях множества Парето. К тому же, большинство многокритериальных ГА не требуют от пользователя установки приоритетов, масштабов и весов для целей. Поэтому подход на основе ГА стал самым популярным эвристическим подходом к решению задач многокритериальной оптимизации и проектирования. 90% всех подходов к решению многокритериальной оптимизации направлены на аппроксимацию истинного фронта Парето для основной задачи. Большинство из них используют мета-эвристическую технику, и 70% всех мета-эвристических подходов основаны на эволюционном подходе [3].

На рис.1 представлена классификация основных методов и алгоритмов многокритериального эволюционного поиска.

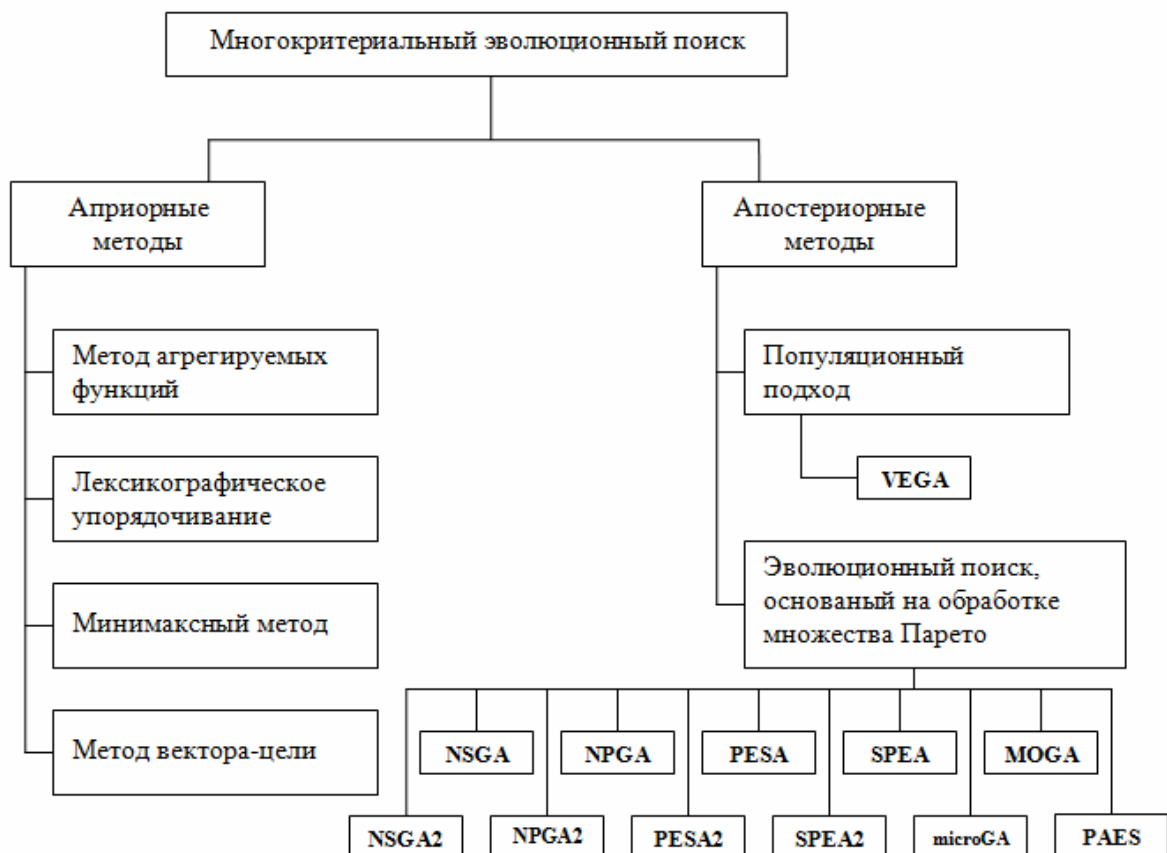


Рис.1 Методы многокритериального эволюционного поиска

Как видно из рис. 1 большинство эволюционных методов и алгоритмов для решения многокритериальных задач используют подход на основе обработки множества Парето. В таблице 1 приведены основные особенности многокритериальных эволюционных алгоритмов [3].

Таблица 1.

Особенности многокритериальных эволюционных алгоритмов

Алгоритм	Определение пригодности	Механизм разнообразия	Элитность	Внешняя популяция	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4	5	6	7
VEGA	Расчет для подмножеств популяции относительно разных целей	Нет	Нет	Нет	Первая простая реализация многокритериального ГА	Тенденция сходимости к крайним значениям целевых функций
MOGA	Ранжирование по Парето	Создание ниш для распределения по значениям пригодности	Нет	Нет	Простое расширение ГА с одной целью	Медленная сходимость. Проблемы параметра размера ниши
WPGA	Взвешенное среднее нормализованных целевых функций	Ниша. Наперед определенные веса	Нет	Нет	Простое расширение ГА с одной целью	Возникают проблемы с невыпуклыми областями значений функций целей
NPGA	Отсутствует назначение пригодности. Турнирный отбор	Вычисление ниш для разбиения узлов при турнирном отборе	Нет	Нет	Очень простой процесс турнирного отбора	Проблемы параметра размера ниши. Необходимость дополнительного параметра для турнирного отбора
RWGA	Взвешенное среднее нормализованных целевых функций	Присвоение случайных значений весам	Да	Да	Эффективная и простая реализация	Возникают проблемы с невыпуклыми областями значений функций целей
PESA	Отсутствует назначение пригодности	Плотность ячеек	Да	Да	Простая реализация. Быстрый алгоритм	Производительность зависит от размера ячеек. Необходима дополнительная предварительная информация о области решений

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
PAES	Используется доминирование для замещения родительской хромосомы если дочерняя доминирует	Ячеистая плотность для разделения узлов между дочерними и родительскими хромосомами	Да	Да	Специальная стратегия для случайной мутации. Простая реализация. Эффективность	Подход не базируется на популяциях. Продуктивность зависит от размера ячеек
NSGA	Ранжирование на основе не доминированной сортировки	Создание ниш для распределения по значению пригодности	Нет	Нет	Быстрая сходимость	Проблемы параметра размера ниши
NSGA-II	Ранжирование на основе не доминированной сортировки	Метод группового расстояния	Да	Нет	Единственный параметр. Проверенный и эффективный алгоритм	Групповое расстояние имеет смысл только в целевой области
SPEA	Ранжирование на основе внешнего сохранения недоминированных решений	Кластеризация для ограничения внешней популяции	Да	Да	Надежный алгоритм. Отсутствие параметра для кластеризации	Сложный алгоритм кластеризации
SPEA-2	Мощные доминанты	Плотность, которая рассчитывается на основе данных до k-ого соседа	Да	Да	Улучшенный SPEA. Гарантированно сохранение точек экстремума	Сложные с точки зрения вычислений процедуры расчета пригодности и плотности
RDGA	Задача сводится к задаче с двумя целями – ранжированием решений и плотностью	Ограничение локальной плотности ячеек	Да	Да	Динамическое обновление ячеек. Надежный по количеству целей	Сложен в реализации
DMOEA	Ранжирование на основе ячеек	Адаптивная плотность основе ячеек	Да (не-явно)	Нет	Содержит в себе эффективные техники смены плотности ячеек. Адаптивный подход к настройке параметров ГА	Сложен в реализации

Исходя из анализа представленных в таблице 1 методов и алгоритмов, возможен подбор и применение определенных эволюционных методов и алгоритмов в зависимости от типа задач сценарного планирования [1]. При этом необходимо исследовать и решить следующие методологические задачи:

- обоснование критериев для оценки эффективных решений при построении сценариев и распределение их по моделям;
- выбор семейства решений (альтернатив), которые наиболее эффективны для решения задачи построения сценариев при заданных внешних условиях;
- объединение решений в единый комплекс, для решения задач сценарного планирования, например для задачи многокритериального выбора структуры сценария;
- выбор метода или алгоритма решения многокритериальной задачи, при построении сценариев.

На рис. 2, представлена общая схема применения эволюционных алгоритмов и учет основных аспектов при эволюционном выборе эффективных по многим критериям решений, связанных с решениями задач сценарного планирования.



Рис. 2. Общая схема применения эволюционных алгоритмов в задачах сценарного планирования

Для реализации системы поддержки принятия решений, как составного элемента информационных технологий сценарного планирования [1], были реализованы следующие эволюционные алгоритмы: MOGA, ε -MOGA, AMGA, NSGA, NSGA-II, SPEA, SPEA-2. Программно-аналитический комплекс разрабатывался с помощью Qt-кроссплатформенного инструментария разработки на языке программирования C++. Среда разработки – Qt Creator. Qt Creator – среда разработки, предназначенная для создания кроссплатформенных приложений с использованием библиотеки Qt.

Тестирование проводилось на задаче построения сценариев управления энергетической системой. При этом решались следующие задачи: построение структуры сценария, генерация новых сценариев исходя из заданных требований по энергообеспечению, выбор оптимального сценария управления, исходя из требований по обеспечению необходимой мощности и загрузки элементов системы. Наиболее эффективными по вычислительной сложности оказались алгоритмы ε -MOGA и SPEA-2.

Применение эволюционных методов и алгоритмов при решении различных задач сценарного планирования эффективно с точки зрения решения задач и поиска оптимальной структуры и с точки зрения решения многокритериальных задач принятия решений. Реализованный программный комплекс может использоваться автономно, а может применяться в качестве подсистемы в системах поддержки принятия решений при решении задач сценарного планирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гожий А.П. Основные аспекты применения информационных технологий в задачах сценарного планирования // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили :Миколаїв, серія: Комп'ютерні технології.-Вип.148, Т.160 – с.158-167.
2. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Ітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
3. A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering and System Safety 91 (2006) 992-1007.
4. J. Holland. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press; 1975.
5. D. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Reading, MA: Addison-Wesley; 1989.

6. J. Schaffer. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In: Proceedings of the international conference on genetic algorithm and their applications, 1985.
7. E. Zitzler, L. Thiele. Multi-objective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. IEEE Trans Evol Comput 1999; 3(4): 257–71.
8. H. Lu, G. Yen. Rank-density-based multi-objective genetic algorithm and benchmark test function study. IEEE Trans Evol Comput 2003; 7(4): 325–43.
9. D. Goldberg, J. Richardson. Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In: Genetic algorithms and their applications: proceedings of the second international conference on genetic algorithms, 28–31 July, 1987. Cambridge, MA, USA: Lawrence Erlbaum Associates; 1987.
10. C. Fonseca, P. Fleming Multiobjective genetic algorithms. In: IEE colloquium on ‘Genetic Algorithms for Control Systems Engineering’ (Digest No. 1993/130), 28 May 1993. London, UK: IEE; 1993.

УДК 669. 183. 012

А.П. Мешалкин, С.В. Пшигоцкий, Л.В. Камкина

**ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ЖИДКОЙ ВАННЫ АОД-КОНВЕРТЕРА НА
ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ ПРОДУВКИ**

Теоретически разработаны и опробованы на холодных моделях варианты глубинной продувки конвертерной ванны, обеспечивающие повышение интенсивности продувки и перемешивания жидкой ванны без увеличения выбросов жидкой фазы и изменения конструктивных параметров агрегата.

ГЛУБИННАЯ ПРОДУВКА, ГИДРОДИНАМИКА ВАННЫ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫБРОСЫ.

Введение

Совершенствование способов и схем подачи газов в конвертерную ванну и ковш при внепечной обработке стали с целью более эффективного использования энергии струи и всплывающих газовых объемов, улучшения теплового баланса плавки, усреднения расплава по химическому составу и температуре, снижения выноса и выбросов металла, оптимизации шлакового режима, увеличения стойкости фурм требует дальнейшего изучения гидродинамических особенностей продуваемой ванны. Рекомендации и теоретическое обоснование по оптимизации способов ввода дутья, конструкциям и размещению продувочных устройств противоречивы и немногочисленны.

Постановка задачи

Трудности в изучении процесса внедрения газовых струй в высокотемпературный железо-углеродистый расплав вызваны взаимосвязанными гидродинамическими, тепловыми, массообменными и другими процессами, происходящими в продуваемой ванне.

Ввод дутья, с точки зрения влияния на гидродинамику ванны и ход процесса в целом, должен производиться максимально рассредоточено по всему объему ванны. Анализ действующих

© Мешалкин А.П., Пшигоцкий С.В., Камкина Л.В., 2012

конвертеров свидетельствует о более или менее сосредоточенной подаче дутья через одну или несколько фурм.

Основное воздействие на гидродинамику продуваемой ванны оказывают газовая струя, истекающая из сопла продувочного устройства и всплывающие газовые объемы. Основным требованием к вводу кислородной струи в металл является максимальное усвоение кислорода и управление его распределением в объеме ванны. Из-за определенных ограничений для верхней продувки выполнить эти условия затруднительно. После снижения скорости струи в расплаве происходит перераспределение кинетической энергии струи и подъемных сил всплывающих газовых объемов. Возникающие циркуляционные контуры вовлекают за счет сил трения прилегающие к циркуляционному потоку новые слои металла, поставляя их к границам реакционных зон взаимодействия кислородных струй с металлом и границе шлак-металл.

Наиболее эффективно реализовать рассредоточенный подвод дутья, повысить степень усвоения кислорода с минимальным образованием пыли и брызгоуноса металла при увеличении интенсивности продувки позволяют глубинные способы продувки металлической ванны.

Основная часть

Интенсивность продувки при реализации глубинных способов продувки конвертерной ванны ограничивается различными технологическими факторами. При донной продувке эти ограничения связаны с явлением каналобразования (прострела или пробоя ванны). Радиальный метод размещения фурм в конвертерах с боковым подводом дутья под уровень также имеет ограничения по интенсивности продувки, связанные с наложением (слиянием) радиально направленных реакционных зон. Интенсивность продувки при верхней подаче дутья ограничена глубиной ванны конвертера, и максимальный расход газа определяется достижением отношения длины реакционной зоны к глубине ванны (L/H_v) величины 0,7-0,75, характерной для работающих кислородных конвертеров.

Подача донного или бокового дутья, имеющая место при реализации некоторых способов рафинирования стали, осуществляется через стационарные продувочные устройства – фурмы, находящиеся в футеровке агрегата. Это обуславливает осуществление подачи газов через фурмы в течение всей кампании, в том числе, в межпродувочные периоды. А в случае подачи через

донные фурмы окислительного газа при комбинированном способе продувки происходит усиленный износ околофурменной зоны футеровки конвертера. Указанные обстоятельства усложняют систему подачи и регулирования дутья, снижая надежность дутьевых устройств в эксплуатации, увеличивают продолжительность технологических простоев, приводят к увеличению расхода газа и снижению производительности процесса.

В связи с этим разрабатываются и проходят промышленные испытания различные конструкции верхних двухъярусных фурм, предназначенные для подачи окислительного, нейтрального газа и их смесей, обеспечивающие эффективное перемешивание ванны, быстрое формирование активного высокоосновного шлака, дожигание отходящих газов и др. Гидродинамика и перемешивание конвертерной ванны при использовании двухъярусных фурм изучена недостаточно.

Экспериментально на холодной модели конвертера верхнего дутья изучали гидродинамику и перемешивание ванны при использовании фурмы с подачей воздушного дутья через два яруса. Оси сопел ($n = 3$) нижнего яруса направлены перпендикулярно оси фурмы по радиусам диаметра ванны с углом между ними равным 120° . Угол наклона осей сопел верхнего яруса ($n = 3$) к вертикали составляет 25° . Этим достигается максимальное разведение зон взаимодействия струй верхнего и нижнего ярусов сопел, которое должно обеспечить максимальную интенсивность перемешивания и минимальную интенсивность выбросов жидкой фазы [1]. Внутренний радиус всех сопел равен 1,2мм, расстояние между срезами сопел верхнего и нижнего ярусов составляло 140 калибров, оси сопел нижнего яруса располагались на расстоянии 25-30 калибров от днища модели конвертера (рис. 1).

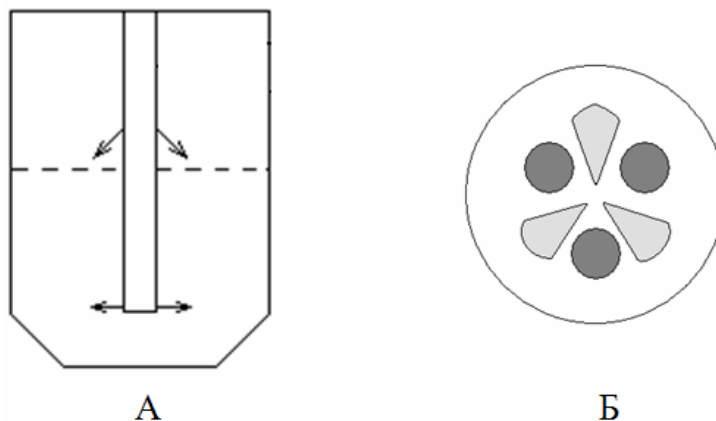


Рис. 1. Схема конструкции 2-х ярусной фурмы (А) и поперечное сечение ванны по оси боковых фурм (Б)

Исследовано два варианта продувки. В первом - основное дутье (компрессорный воздух) с удельным расходом на одно сопло $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$ подавалось через сопла верхнего яруса, а дополнительный расход воздуха через нижний ярус изменялся от минимального до $12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин}$ на одно сопло. Во втором варианте основное дутье подавалось через радиальные горизонтально расположенные сопла нижнего яруса, а дополнительное – через сопла верхнего яруса фурмы с соответствующими расходами.

Результаты исследования свидетельствуют о приблизительно одинаковой эффективности перемешивания конвертерной ванны при реализации обеих вариантов продувки через двухъярусную фурму (рис.2А). Минимальная высота всплесков жидкой фазы, определяющая количество выбросов металла и конструктивные параметры агрегата, достигается при боковой глубинной подаче основного дутья по второму варианту (рис.2Б). Эффективное использование погружаемых двухъярусных фурм в конвертерах и при внепечной обработке стали с вдуванием различных газов и порошкообразных материалов возможно при обеспечении их достаточной огнеупорности, термостойкости и шлакостойкости.

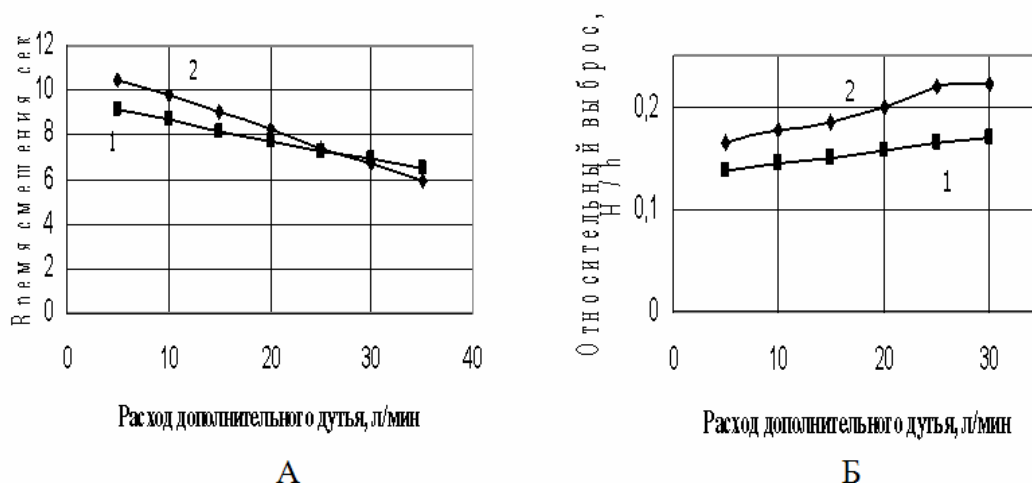


Рис.2. Зависимость времени полного смешения ванны (А) и величины выброса жидкой фазы (Б) от расхода дополнительного дутья (расход основного дутья 60 л/мин)

Сопоставление одиночных вариантов подачи дутья [1,2] показывает, что боковая глубинная продувка дает близкую по величине интенсивность перемешивания к донной продувке. Изучение влияния степени погружения боковой фурмы с горизонтально истекающей струей (рис.3), а, следовательно, и

глубины всплывания газовых пузырей, выявило эффективность этого мероприятия для ускорения смешения конвертерной ванны.

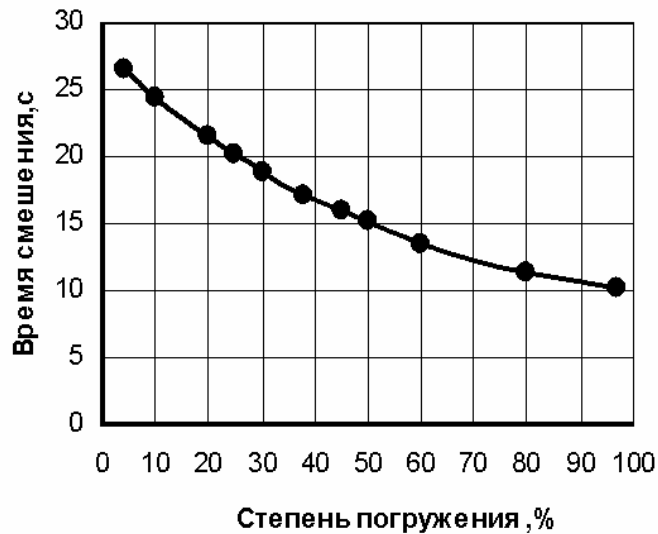


Рис. 3. Влияние степени погружения боковой фурмы на время полного смешения ванны. $H_B = 190$ мм, $D_B = 210$ мм

Исходя из установленного факта эффективности применения боковой глубинной продувки, разработана и опробована при холодном моделировании конструкция конвертера с боковым подводом дутья (рис.4), обеспечивающая увеличение интенсивности продувки и повышение скорости перемешивания ванны без увеличения потерь металла в результате его выноса через горловину агрегата.

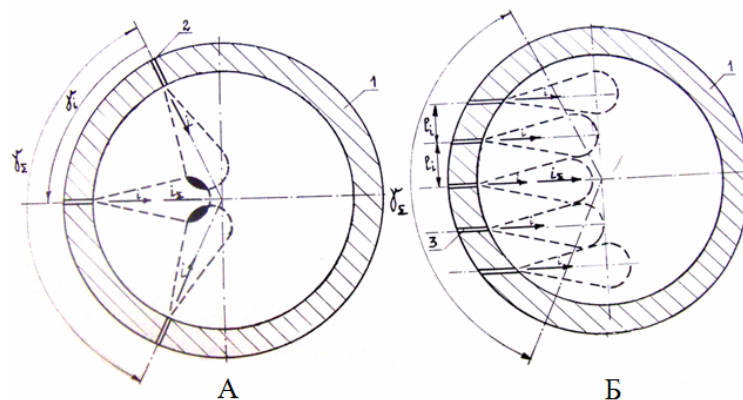


Рис. 4. Схема радиального (традиционного) - А и параллельного (исследуемого) - Б расположения фурм в конвертере бокового дутья (AOD)

Одним из основных недостатков конвертера с боковым подводом дутья типа малобессемеровского [3] является сравнительно низкая интенсивность перемешивания ванны, связанная с небольшим заглублением фурм в расплав. Для получения некоторых марок

стали, например, нержавеющей, используются конвертера с боковым дутьем под уровень металла [4]. Конструкция агрегатов предусматривает расположение фурм таким образом, что их продольные оси располагаются по радиусам поперечного сечения конвертера – радиальное размещение фурм 2 (рис.4А). Анализ такой конструкции агрегата показывает, что этот метод размещения фурм имеет следующие недостатки.

Интенсивность перемешивания ванны меньше максимально возможной при прочих равных условиях. Моделирование процесса вдувания газов в конвертер показало, что при радиальном размещении фурм импульсы отдельных струй i складываются по правилу

векторов. Вектор результирующего импульса $i_{\text{сум}}$, определяющего интенсивность перемешивания, направлен по биссектрисе угла между крайними фурмами $\gamma_{\text{сум}}$, а его величина равна $i_{\text{сум}} = i \cos \gamma_i$, где n – число складываемых векторов (число фурм); γ_i – угол между осью данного вектора (фурмы) и биссектрисой угла γ_i . Величина $i_{\text{сум}}$ таким образом меньше, чем максимально возможная, если бы достигалось арифметическое сложение векторов импульсов в случае одинаковой направленности, когда $i_{\text{сум}} = ni$.

Потери металла с выносом, снижающим выход годного металла, увеличивающие заметалливание горловины и запыленность отходящих газов, не меньше минимально возможных при одинаковых расходах газа. Анализ параметров действующих конвертеров показывает, что максимально допустимый расход дутья на одну фурму, определяющий высоту, на которую выносятся металл из зоны взаимодействия газовой струи с ванной, должен быть согласован с расстоянием от уровня ванны до горловины конвертера. Чем меньше это расстояние, тем ниже должна быть величина допустимого расхода дутья на одну фурму.

С другой стороны фурмы, размещаемые по периметру ванны, из конструктивных соображений должны располагаться лишь в пределах угла при вершине $\gamma_{\text{сум}}$ не превышающем 130° . При этом в плане между осями двух соседних фурм должен быть таким, чтобы первичные зоны взаимодействия дутья с металлом, имеющие длину L_1 , не сливались. В противном случае, как свидетельствуют

экспериментальные данные, при слиянии зон взаимодействия интенсивность выноса металла увеличивается.

При радиальном размещении фурм газовые струи, распространяясь в металле (на рис.4А границы струй показаны пунктирными линиями), движутся навстречу друг другу, что при существующем угле их раскрытия укорачивает расстояние от среза сопла фурмы до области их пересечения (слияния) (на рис.4А – затемненные участки). Во избежание этого на практике выбирают достаточно большой угол между соседними фурмами γ_1 , что при ограниченном $\gamma_{\text{сум}}$ ограничивает и количество фурм n . Это, в сочетании с максимально возможной интенсивностью подачи дутья на одно сопло, ограничивает общую интенсивность продувки. Вследствие этого конвертера бокового дутья, вероятно, и имеют максимальную удельную интенсивность продувки около $1 \text{ м}^3/(\text{т мин})$, что значительно ниже чем при верхней и донной продувке (до $3\text{-}5 \text{ м}^3/(\text{т мин})$).

Исходя из рассмотренных недостатков и ограничений конструкций действующих конвертеров бокового дутья разработана модель конструкции агрегата, обеспечивающая увеличение интенсивности продувки и эффективное перемешивание ванны без увеличения выноса металла. Конструкция предусматривает расположение фурм для продувки перпендикулярно плоскости продольного сечения конвертера, проходящей через оси цапф, (фурмы, расположенные перпендикулярно продольному сечению конвертера), а расстояние между осями соседних фурм определяется [1, 2] из соотношения:

$$l = (0,08 - 0,1) q_r^{0,4}$$

где l - расстояние между осями соседних фурм, м;

q_r – интенсивность подачи дутья на одну фурму, $\text{м}^3/\text{мин}$.

На рис. 4Б изображено поперечное сечение конвертера с боковым подводом дутья, состоящего из корпуса 1 с размещенными в нем фурмами 3, которые направлены перпендикулярно плоскости продольного сечения агрегата, проходящей через оси цапф конвертера.

При размещении фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера импульсы истекающих из них газовых струй складываются и $i_{\text{сум}} = n i$, что обеспечивает максимально возможное их использование для перемешивания конвертерной ванны.

При тех же параметрах конвертера, что и в случае радиального размещения фурм, в пределах дуги с величиной центрального угла между осями крайних фурм $\gamma_{\text{сум}} = 130^\circ$ становится возможным разместить большее число фурм, избежав при этом слияния первичных зон взаимодействия с металлом, истекающих из этих фурм газовых струй. При той же предельно допустимой интенсивности подачи дутья через одну фурму q_r , которая, как сказано выше, определяется расстоянием от уровня ванны до горловины конвертера, можно увеличить общую интенсивность продувки без увеличения интенсивности брызгоуноса металла из конвертера. Это позволит избежать потери металла, заметалливание горловины и увеличение запыленности отходящих газов. Величина суммарного импульса при этом возрастает прямо пропорционально увеличению количества фурм, глубина проникновения зон взаимодействия струй с металлом в конвертерную ванну увеличивается, что способствует интенсификации перемешивания ванны.

На водяной модели 130т конвертера АОД с боковым подводом дутья (масштаб 1:10) проведены эксперименты, сделан сопоставительный анализ работы агрегата с радиальным расположением фурм и с расположением фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера.

В случае радиального размещения фурм по периметру ванны в пределах дуги с центральным углом при вершине 130° расположилось три фурмы без наложения первичных зон взаимодействия истекающих из них газовых струй с ванной при интенсивности продувки $0,18\text{м}^3/\text{мин}$ на каждую фурму. Время полного смешения ванны для данной конструкции конвертера и дутьевого режима составило 9,8 секунд. При размещении фурм перпендикулярно продольному сечению конвертера в пределах дуги с тем же центральным углом при вершине 130° расположилось пять фурм без слияния первичных зон. При той же интенсивности подачи дутья на каждую фурму и расстоянии между средней и соседней фурмами 0,067м и между крайней и соседней фурмами 0,06м первичные зоны взаимодействия газовых струй с ванной не накладывались друг на друга. Время полного смешения для экспериментальной конструкции конвертера бокового дутья и соответствующего дутьевого режима

сократилось и составило 5,3 секунды. Интенсивность выноса, определяемая по величине сплошного всплеска жидкой фазы, при изменении конструкции агрегата практически не изменилась.

Выводы

Теоретически разработана и экспериментально на холодных моделях подтверждена возможность увеличения интенсивности продувки конвертерной ванны без увеличения выноса и выбросов жидкой фазы и существенных изменений в конструкции агрегата. Наиболее эффективным вариантом продувки при использовании двухъярусной фурмы является подача основного дутья горизонтально через глубинные фурмы нижнего яруса. Разработка конструкции фурмы с перемещающимися фурмами верхнего яруса позволит, наряду с усилением интенсивности перемешивания ванны, регулировать окисленность шлака, а также интенсифицировать процессы на границе раздела шлак-металл.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мешалкин А.П., Просвирин К.С., Охотский В.Б., Колганов Г.С. Образование всплесков жидких фаз при продувке конвертерной ванны под уровень. Изв. ВУЗОВ. Черная металлургия», 1985г., №8, С.29-33.
2. Просвирин К.С., Мешалкин А.П., Охотский В.Б. Закономерности перемешивания конвертерной ванны.»Изв. ВУЗОВ. Черная металлургия», 1989г., № 10, С.16-19.
3. Андреев Б. А. Малое бессемерование.- Машгиз., 1948, С.169.
4. Williams A.G., Ludlam I. The AOD process and equipment design. Steel Times, 1978, 206 p. -12, 51-52,54-56, 65-66, 72.

УДК 621.746.6.001.2

В.Ю. Селиверстов, Т.В. Михайловская, Ю.В. Доценко, Ю.Н. Бура

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОВРЕМЕННЫХ
УСЛОВИЙ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО
ВЫТЕСНЕНИЯ РАСПЛАВА ИЗ СИФОННОЙ ЛИТНИКОВОЙ
СИСТЕМЫ КРУПНЫХ ОТЛИВОК ИЛИ СЛИТКОВ**

Приведено описание физической и математической модели процесса затвердевания металла в системе стояк – устройство для ввода газа. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров холодильника, диаметра стояка, теплофизических свойств металла и формы.

*ЛИТНИКОВАЯ СИСТЕМА, ОТЛИВКА, РАСПЛАВ, ЗАТВЕРДЕВАНИЕ,
ХОЛОДИЛЬНИК, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ.*

Введение

Уменьшение непроизводительных потерь металла, в том числе на литниковую систему при производстве отливок из стали и чугуна является одной из актуальных проблем литейного производства. Одним из наиболее распространенных типов литниковых систем, широко используемых в литейном производстве, является сифонная система подвода металла, применяемая при получении слитков и массивных отливок с высокими служебными свойствами, в том числе, прокатных валков. При этом расход металла на сифонную литниковую систему может составлять 5 – 50 кг и более на тонну отливки или слитка.

Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи

Одним из перспективных направлений исследований является применение инертного газа для продувки в изложнице кристаллизующегося сплава. Путем интенсификации тепло- и массообмена внутри затвердевающего слитка можно уменьшить перепад температур по его сечению, а в сочетании с высокими

© Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В.,
Доценко Ю.В., Бура Ю.Н., 2012

скоростями охлаждения жидкого металла подавить диффузию компонентов сплава и устранить макродефекты слитка [1].

В Японии появились сведения о технологии, обеспечивающей получение качественных слитков методом вытеснения жидкого металла из центральной в слиток с повторным использованием центральной [2]. В известном способе жидкая сталь из стопорного ковша через разливочный стакан и стояк заливается в изложницы. Затем в пространство над центральной и ковшом с помощью гидравлического привода вводится уплотнительное устройство с резиновыми прокладками, которое герметизирует полость стояка. В эту полость из баллона подается под давлением инертный газ, например, аргон. Жидкий металл из стояка вытесняется в изложницы, где он затвердевает. После удаления слитков стояк снова может быть использован для очередной заливки.

Недостатком разработанного способа является наличие легкоуязвимой системы соединения стояка и ковша. Кроме того, технологически ненадежным является резиновое уплотнительное устройство, вводимое гидравлическим приводом, из-за высоких температур в зоне центральной и образования брызг и настылей во время заливки.

Все эти недостатки устранены в устройствах [3 – 6], в которых герметизация расплава от окружающей среды производится за счет использования металлического холодильника, обеспечивающего ускоренное затвердевание металла и подвод газа для вытеснения расплава из центральной в слиток.

Актуальной задачей по определению термовременных параметров использования данных разработок при литье слитков и отливок различных типоразмеров и массы является установление момента затвердевания металла в зазоре между металлическим холодильником-газоподводом и огнеупорной центральной трубкой в данном конкретном случае реализации технологии.

Поэтому целью исследований являлась разработка физической и математической моделей этого процесса, учитывающих наиболее значимые характеристики металла, холодильника и литейной формы стояка (центральной).

Результаты исследований

Разработано два варианта физической модели процесса затвердевания в системе стояк – устройство для ввода газа. На рис. 1 приведена схема формы стояка (центральной), вариантов размещения холодильника и жидкого металла, которые рассмотрены при моделировании.

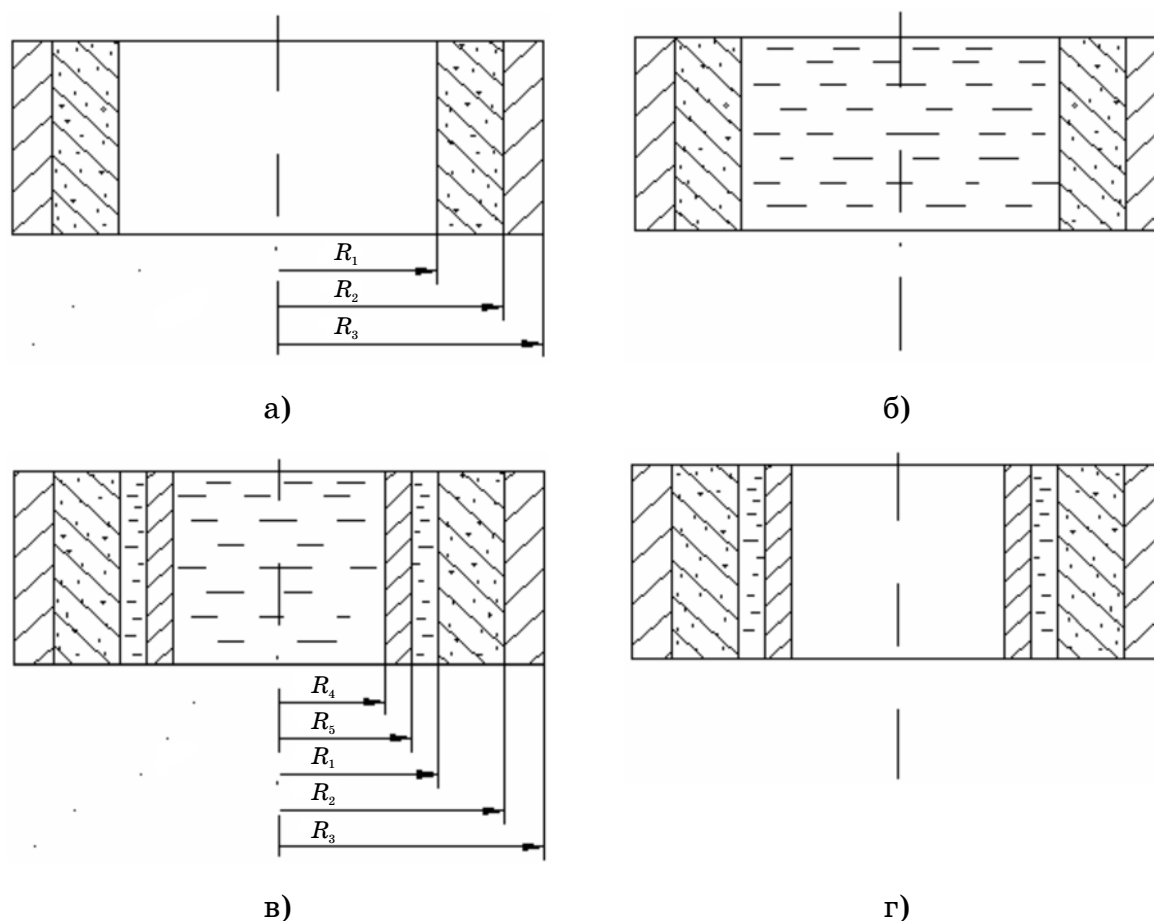


Рис. 1. Схема литейной формы и различных вариантов моделирования:
 а – исходные размеры центральной; б – этап заливки расплава;
 в – вариант погружения в расплав трубы-холодильника;
 г – вариант погружения в расплав герметизированного трубчатого холодильника

В первой модели приняты следующие исходные условия: наружная часть формы (рис. 1, а) выполнена из серого чугуна с наружным радиусом R_3 и внутренним – R_2 . Внутренняя часть формы заполнена однородной огнеупорной смесью с внутренним радиусом R_1 .

Моделирование течения жидкого металла (рис. 1, б) через центровую в процессе заливки производили при условии нахождения

расплава в форме при постоянной температуре t_3 в течение заданного промежутка времени τ и отсутствия затвердевания металла на стенках формы.

Предполагался только прогрев формы при идеальных условиях контакта материала формы с жидким металлом.

Следующим этапом моделирования является погружение в расплав устройства для ввода газа с металлическим трубчатым холодильником (рис. 1, в) с внутренним и наружным радиусами R_4 и R_5 сразу после окончания заливки.

Начальная температура холодильника принимается равной t_x^0 . С этого момента времени начинается затвердевание металла в центровой за счет нагрева холодильника и элементов формы. В процессе теплообмена снимается тепло перегрева жидкого металла.

Процесс затвердевания происходит в интервале температур ликвидус – t_L , солидус – t_S . В зависимости от исходных теплофизических параметров холодильник может расплавиться или оставаться в твердом состоянии. Окончанием процесса является полное затвердевание металла. Во второй модели исходные условия первых двух этапов моделирования соответствуют этапам первой модели, приведенной выше (см. рис. 1, а, б). На третьем этапе (рис. 1, г) после окончания заливки в расплав вводится герметизированный цилиндрический контейнер-холодильник, внутренняя полость которого заполнена газом. С этого момента времени начинается затвердевание металла в зазоре между наружной поверхностью контейнера-холодильника и внутренней поверхностью формы центровой.

При уменьшении радиуса R_4 до нуля моделируется процесс затвердевания расплава в зазоре при использовании кольцевого холодильника. Предусмотрена возможность изменения основных теплофизических свойств литейной формы и расплава. В начальных условиях температура элементов формы (1 и 2) принята равной $t_{сф}$.

Для описания процесса теплообмена в рассмотренной выше системе (с учетом фазовых превращений) использовали подход, основанный на применении метода энтальпии [7, 8]. Уравнение теплопроводности в этом случае запишется для произвольной фазы как

$$\rho \frac{\partial i}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \quad (1)$$

где ρ – плотность; λ – теплопроводность; i – энтальпия; t – температура; r – координата; τ – время.

Связь между энтальпией и температурой должна быть задана в виде функциональной зависимости вида $i = f(t)$. Приближенно ее можно представить как кусочно-линейную

$$i = \begin{cases} c_s t, & t < t_s; \\ i_s + L\theta, & t_s \leq t < t_L; \\ i_L + c_L (t - t_L), & t \geq t_L, \end{cases} \quad (2)$$

где c_s , c_L – средние теплоемкости при температуре t_s и t_L соответственно;

i_s , i_L – энтальпии при тех же температурах;

L – температура фазового перехода, $L = i_s - i_l$; $\theta = \frac{t - t_s}{t_l - t_s}$.

Аналогично может быть задана зависимость вида $t = \phi(i)$:

$$t = \begin{cases} i / c_s, & i < i_s; \\ t_s + \frac{i - i_s}{L} (t_L - t_s), & i_s \leq i < i_L; \\ t_L + \frac{i - i_L}{c_L}, & i \geq i_L, \end{cases} \quad (3)$$

Для материалов, в которых не происходят фазовые превращения (смесь, форма), используется обычное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (4)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Для привязки рассмотренных выше уравнений к каждому конкретному элементу будем использовать следующие индексы: M_1 – для внутреннего слоя расплава, x – для холодильника, M_2 – для расплава, находящегося в зазоре между холодильником и смесью, c – для смеси, Φ – для формы, M – для холодильника и расплава. Тогда математическая постановка задачи примет вид:

– **Форма**

-- Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t_{\Phi}}{\partial \tau} = a_{\Phi} \left(\frac{\partial^2 t_{\Phi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} \right). \quad (5)$$

-- Граничные условия $R_2 < r < R_3$:

а) граница смесь-форма

$$-\lambda_{\Phi} \frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{\Phi} = t_c \quad \text{при } r = R_2, \quad (6)$$

б) внешняя граница формы

$$\frac{\partial t_{\Phi}}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = R_3. \quad (7)$$

-- Начальные условия

$$t_{\Phi}(r, t) = t_{c\Phi}^0 \quad \text{при } \tau = 0. \quad (8)$$

– Смесь

-- Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial t_c}{\partial t} = a_c \left(\frac{\partial^2 t_c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_c}{\partial r} \right) \quad \text{при } R_1 < r < R_2. \quad (9)$$

-- Граничные условия:

а) внутренняя граница смеси

$$\left. \begin{aligned} t_c = t_3 \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_1, \\ -\lambda_{M_2} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{M_2} = t_c \quad \text{при } \tau > \tau_1 \end{aligned} \right| r = R_1, \quad (10)$$

б) наружная граница смеси – уравнение (6).

-- Начальные условия

$$t_c(r, t) = t_{c\Phi}^0 \quad \text{при } \tau = 0. \quad (11)$$

– **Расплав, находящийся в зазоре между холодильником и смесью**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_{M_2} \frac{\partial i_{M_2}}{\partial \tau} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_{M_2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} \right) \quad \text{при } R_5 < r < R_1. \quad (12)$$

-- Граничные условия:

а) граница холодильник-расплав

$$-\lambda_M \frac{\partial t_x}{\partial r} = -\lambda_M \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r}, t_x = t_{M_2} \quad \text{при } r = R_5, \tau = \tau_1, \quad (13)$$

б) граница расплав-смесь

$$-\lambda_{M_2} \frac{\partial t_{M_2}}{\partial r} = -\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial r}, t_{M_2} = t_c \quad \text{при } r = R_1, \tau > \tau_1. \quad (14)$$

-- Начальные условия

$$t_{M_2}(r, \tau) = t_3 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (15)$$

– **Холодильник**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_M \frac{\partial i_x}{\partial r^2} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_x}{\partial r} \right). \quad (16)$$

-- Граничные условия:

а) внутренняя граница

$$-\lambda_M \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} = \lambda_M \frac{\partial t_x}{\partial r}, \quad t_{M_1} = t_x \quad \text{при } \tau = \tau_1, \quad (17)$$

б) наружная граница – уравнение (13).

-- Начальные условия

$$t_x(r, \tau) = t_x^0 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (18)$$

– **Внутренний слой расплава**

-- Уравнение теплопроводности

$$\rho_M \frac{\partial i_M}{\partial \tau} = \lambda_M \left(\frac{\partial^2 t_{M_2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} \right) \quad \text{при } 0 < r < R_4. \quad (19)$$

-- Граничные условия:

а) на оси расплава

$$\lambda_M \frac{\partial t_{M_1}}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = 0, \tau > \tau_1, \quad (20)$$

б) на границе с холодильником – уравнение (17).

-- Начальные условия

$$t_{M_1}(r, \tau) = t_3 \quad \text{при } \tau = \tau_1. \quad (21)$$

Система уравнений (5 – 21), дополненная зависимостями (2 – 3) для расплава и холодильника, представляет собой математическую постановку задачи, соответствующую исходной физической модели.

Для решения поставленной задачи использовали метод конечных разностей. Построение разностных уравнений выполняли с помощью метода интегральных тепловых балансов [9].

При расчете методом конечных разностей применили неявную схему, которая в отличие от явной, всегда устойчива. Хотя машинное время расчета процесса затвердевания расплава в системе стояк-холодильник по неявной схеме несколько увеличивается, при ее использовании можно произвольно выбирать значения шагов по радиусу и времени, что является важнейшим преимуществом по сравнению с явной схемой.

Каждый элемент расчетной области разбивается на элементарные объемы (рис. 2). Шаг разбиения постоянный внутри каждого элемента, но разный для расплава, холодильника, смеси и формы. Внутри каждого элементарного объема вводится узел, к которому относятся все его теплофизические параметры. Число узлов N выбирается отдельно для каждого элемента.

Адаптацию модели проводили с помощью данных, полученных при экспериментальных исследованиях процесса нагрева формы и кристаллизации металла в стояке [10, 11].

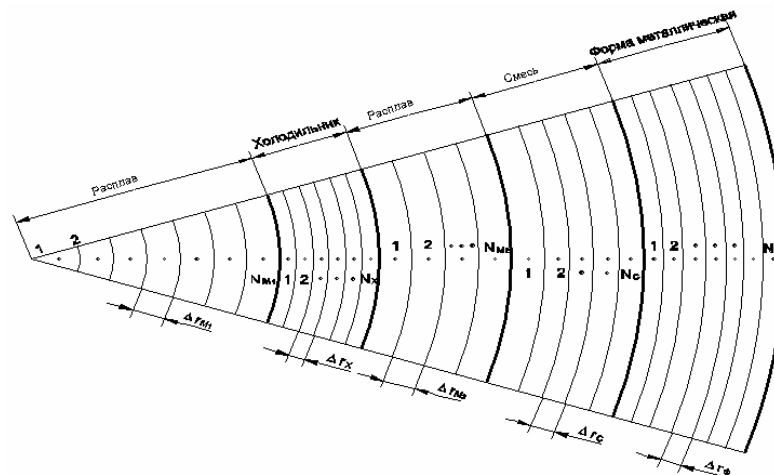


Рис. 2. Схема выделения элементарных объемов в расчетной области

Полученные результаты отдельных расчетов для различных значений температур t_S и t_L , а также при наличии и отсутствии перегрева и предварительного прогрева смеси и формы подтверждают данные экспериментальных исследований, что при нормальных условиях затвердевание металла в зазоре между центральной огнеупорной трубкой и холодильником происходит через $\sim 10 - 15$ секунд. Таким образом, для предотвращения утечки газа в атмосферу момент подачи его в центровую должен начинаться более чем через $10c$ и с учетом других трудно учитываемых факторов составит $15 - 20 c$. Увеличение паузы между окончанием заливки и подачей газа может привести к затвердеванию питателя (разводок).

Выводы

1. Разработана физическая модель двух вариантов процесса затвердевания металла в системе стояк – устройство для ввода газа. Модель описывает состояние элементов указанной системы до заливки расплава в литейную форму, во время заполнения формы

металлом, а также состояние системы и проходящие в ней процессы после введения металлического холодильника.

2. Процесс теплообмена в системе описывали с применением метода энтальпии, учитывая фазовые превращения. Представлены уравнения теплопроводности, граничные и начальные условия для формы, смеси, холодильника, расплава в зазоре между холодильником и огнеупорной проводкой, внутреннего слоя расплава.

3. Поставленную задачу решали с использованием метода конечных разностей. Получены расчетные формулы, позволяющие моделировать процесс теплообмена, изменяя значения некоторых основных исходных данных. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров холодильника, диаметра стояка, теплофизических свойств металла и формы.

4. Составлен алгоритм расчета процесса затвердевания отливки. Для адаптации модели использовали данные экспериментальных исследований процесса нагрева формы и кристаллизации металла в стояке. Как показали расчеты, затвердевание стали в зазоре между огнеупорной проводкой и трубой-холодильником проходит в течение примерно 10 с, что практически соответствует результатам экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В.А. Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся расплав // Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл. - Киев: ИПЛ АН УССР, 1983. - С. 3-21.
2. Заявка N 59-215248 Япония. Способ разлива стали. - МКИ В22Д 7/00, В22Д 18/04. Опубл. 05.12.84. / Син Ниппон сэйтэцу К.К. - РЖ ТОЛП, 1986.- N 1, 1Г191П.
3. А.С. СССР N 1582454. Способ изготовления отливок и устройство для его осуществления / Хрычиков В.Е., Котешов Н.П. и др., 1990. ДСП.
4. А.С. СССР N 1587777. Устройство для сифонной разлива / Хрычиков В.Е., Котешов Н.П. и др., 1990. ДСП.
5. Пат. 28858 Украина, МПК (2006) В22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. - № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
6. Пат. 28859 Украина, МПК (2006) В22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. - № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
7. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. - Рига: Знание, 1980. - 177с.

8. Шамсундар, Спэрроу. Применение метода энтальпии к анализу многомерной задачи теплопроводности при наличии фазового перехода. – Труды амер. об-ва инж.-мех.. серия Теплопередача. – 1976. - №3. – С. 14-23.
9. Калиткин Н.Н. Численные методы.- М.: Наука, 1978.- 612 с.
10. Хрычиков В.Е., Селиверстов В.Ю. Исследование динамики нагрева стальной огнеупорных центровых трубок при сифонной заливке слитков //Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск, 2001, №4, с. 33-35.
11. Селиверстов В.Ю., Хрычиков В.Е. Термографическое исследование процессов нагрева и охлаждения литейной формы стояка при заливке чугуна //Металлургическая и горнорудная промышленность. Днепропетровск, 2001, №5, с. 33-35.

УДК 681.51

В.Г. Зайцев

ПРИМЕНЕНИЕ ИНВАРИАНТНЫХ МНОГООБРАЗИЙ В ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены понятия и вопросы, связанные с использованием инвариантных многообразий при решении задач оптимального управления.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ, ИНВАРИАНТНЫЕ МНОГООБРАЗИЯ, СИНТЕЗ.

Введение

Понятие инвариантного интегрального многообразия, на котором естественные свойства объекта наилучшим образом согласуются с соответствующими технологическими (или техническими) требованиями задачи управления, отражающей цель функционирования данного объекта, лежит в основе синергетической теории управления [1, 3] (СТУ). Наряду со свойством диссипативности систем, оно играет основополагающую роль и в синергетической теории оптимального управления. Это свойство вытекает из вариационной постановки задачи об оптимальном управлении и характеризует некоторые предельные возможности синтезируемой (проектируемой) системы. Такое многообразие будем называть оптимальным инвариантным многообразием (ОИМ). Построение ОИМ в синергетической теории оптимального управления является одной из важных и сложных задач. Решение данной задачи открывает некоторые перспективы в создании иных методов синтеза оптимальных законов управления нелинейными динамическими объектами. В данной работе для решения задачи построения ОИМ, применяется метод последовательного приближения [6] и его модификация.

Без сомнения инварианты присущи процессам и явлениям любой природы. Имеет смысл рассматривать их в теории управления, теории нелинейных колебаний, делая сравнение их особенностей со свойствами экологических систем.

© Зайцев В.Г., 2012

Известно, что в теории нелинейных колебаний многие задачи сводят к рассмотрению и изучению нелинейных дифференциальных уравнений, содержащих малый параметр. Используя специальные замены эти уравнения, могут быть усреднены. В таком случае их исследование значительно упрощается. Так вот оказывается, что во многих случаях усредненные уравнения обладают инвариантными многообразиями, которые могут находиться в достаточно малой окрестности интегральных многообразий исходных точных уравнений. Поэтому использование метода интегральных многообразий значительно упрощает качественное исследование решений систем в том случае, если они расположены на многообразиях меньшей размерности, чем размерность исходного фазового пространства. Основная идея в методе интегральных многообразий состоит в сведении процесса высокой размерности к исследованию последовательности некоторых процессов более низкой размерности.

В ряде работ, в том числе [7–9] было показано, что для природных динамических систем характерно наличие некоторых поверхностей притяжения – инвариантных многообразий в фазовом пространстве. Данные установившиеся режимы получили название аттракторов, т.к. обладают свойством «притягивать» соседние режимы. Таким образом, аттрактор – это притягивающее множество в фазовом пространстве, или другими словами асимптотически устойчивое множество. Аттракторы, отличные от состояний равновесия и строго периодических колебаний, были названы странными аттракторами. Внутри таких аттракторов траектории движутся нерегулярным образом и являются очень чувствительными к изменению начальных условий.

В многочисленных работах, связанных с исследованием аттракторов нелинейных моделей отмечено, что для природных систем характерен режим движения по некоторым многообразиям в их пространстве состояний. Так в системах описывающих процессы, происходящие в водохранилищах, переменные состояния стремятся к таким значениям, которые соответствуют некоторым соотношениям (уравнениям баланса), т.е. инвариантным многообразиям в их пространстве состояний. Имеется связи, когда такого рода отношения накладываются непосредственно не на переменные состояния, а на

скорость их изменения. В этом плане природные системы существенно отличаются от обычных систем управления. В них наличие инвариантных многообразий обусловлено необходимостью выполнения законов сохранения, например закона сохранения массы, энергии и т.п. Следовательно, можно сказать, что основная цель функционирования многих природных систем состоит в стабилизации соотношений между их переменными состояниями. Математическим следствием данного факта является вырожденность их уравнений динамики и наличие интегральных инвариантов, т.е. некоторых инвариантных многообразий в пространстве состояний. В технических системах существование задаваемых инвариантных многообразий должно обеспечиваться самой процедурой синтеза законов управления рассматриваемого динамического объекта. Именно данное свойство и будет использоваться в основе синтеза нелинейных систем управления.

Постановка задачи синтеза

Пусть объект управления описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = f(t, x, u), \quad (1)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ – вектор координат состояния; $u = (u_1, \dots, u_m)^T$ – вектор управления; $f = (t, f_1(t, x, u), \dots, f_n(t, x, u))^T$; $u \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$; $f(t, 0, 0) = 0$, при следующих граничных условиях:

$$x(t_0) = x_0, \quad x(t_k) = x_k. \quad (2)$$

Основная задача теории оптимального управления формулируется следующим образом: на множестве допустимых управлений и траекторий $\{u(t, x), x(t)\}$, удовлетворяющих системе уравнений (1) и краевым условиям (2), определить оптимальное управление $u = u(t, x)$ и соответствующую ему траекторию $x(t)$, которые доставляют минимум функционалу

$$I = \Phi[x(t_k)] + \int_{t_0}^{t_k} f_0(t, x, u) dt. \quad (3)$$

Здесь предполагается, что левый конец траектории закреплен (x_0 – заданный вектор), а правый подвижен. Пусть ограничения на вектор состояния отсутствуют. Путем ввода дополнительной скалярной переменной

$$x_{n+1}(t) = \int_{t_0}^t f_0(t, x, u) dt,$$

задачу оптимального управления (типа Больца) (1)-(3) можно представить в следующем известном виде (задача Майера):

$$I = x_{n+1}(t_k) + \Phi(x(t_k)) \rightarrow \min_u, \quad (4)$$

$$\dot{x}(t) = f(t, x, u), \quad \dot{x}_{n+1}(t) = f_0(t, x, u), \quad (5)$$

$$x(t_0) = x_0, \quad x_{n+1}(t_0) = 0, \quad (6)$$

$$x(t_k) = x_k. \quad (7)$$

Оптимальные инвариантные многообразия и задачи синтеза

Для задачи оптимального управления (4)-(7) в пространстве состояний с координатами x_1, \dots, x_n определим непрерывную функцию

$$V(x, t) = \int_t^{t_k} f_0(t, x, u) dt + \Phi[x(t_k)], \quad (8)$$

которая имеет производные по координатам вектора x во всем пространстве состояний, кроме точек кусочно-гладкого множества M размерности меньшей n , и расположенного в этом пространстве $V(x, t_k) = \Phi(x(t_k))$.

Определение 1. Функцию $V(x, t)$, определенную выражением (8) на оптимальном процессе $\{u(t, x), x(t)\}$, будем называть *функцией оптимальности*.

Заметим, что функция оптимальности $V(x, t)$ совпадает с функцией Беллмана, но имеет расширенное толкование. Функция Беллмана определяется как решение уравнения Беллмана, в то время как функция оптимальности не обязательно связана с решением этого уравнения, и может быть определена с помощью других методов решения задач оптимального управления. В работе [2] А.М. Летовым рассмотрена задача оптимизации системы управления объектом

$$\dot{x}_1(t) = x_2, \quad \dot{x}_2(t) = -x_2 + u, \quad (9)$$

с функционалом качества

$$I = \int_0^{\infty} (x_1^2 + x_2^2 + u^2) dt. \quad (10)$$

Сформулируем две задачи: 1. Найти функцию оптимальности $V(x_1, x_2)$; 2. Определить оптимальный закон управления $u = u(x_1, x_2)$, переводящий систему (9) из любого начального состояния

$x_0 = (x_{10}, x_{20})^T$ в начало координат $O = (0, 0)^T$, обеспечивающий асимптотическую устойчивость замкнутой системы и доставляющий минимум функционалу качества (10).

Рассмотрим задачу 1. Для ее решения можно использовать метод аналитического конструирования регуляторов (АКОР). В этом случае функция оптимальности $V(x_1, x_2)$ является функцией Беллмана, так как находится путем решения уравнения Беллмана [2]. Однако для нахождения функции оптимальности $V(x_1, x_2)$ можно воспользоваться и другим подходом. Для задачи (9), (10) выпишем функцию Гамильтона $H = -x_1^2 - x_2^2 - u^2 + p_1 x_2 + p_2(-x_2 + u)$, где p_1, p_2 - вспомогательные множители. Из принципа максимума Понтрягина следует, что $\frac{\partial H}{\partial u} = -2u + p_2 = 0$ и $u = \frac{1}{2} p_2$, подстановка которого в H дает следующее выражение $H = -x_1^2 - x_2^2 + \frac{1}{4} p_2^2 + p_1 x_2 - p_2 x_2$. Используя функцию Гамильтона, запишем канонические уравнения:

$$\dot{x}_1(t) = x_2, \quad \dot{x}_2(t) = -x_2 + \frac{1}{2} p_2, \quad \dot{p}_1(t) = -2x_1, \quad \dot{p}_2(t) = 2x_2 - p_1 + p_2 \quad .$$

Из этой системы уравнений найдем оптимальные решения для координат x_1, x_2 с учетом начальных условий и того, что $x_1(\infty) = x_2(\infty) = 0$. Получим

$$x_1(t) = [x_{10} + (x_{10} + x_{20})t] e^{-t}, \quad x_2(t) = [x_{20} + (x_{10} + x_{20})t] e^{-t}, \quad (11)$$

и оптимальный закон управления: $u = \frac{1}{2} p_2 = x_2 + \dot{x}_2(t) = (x_{10} + x_{20}) e^{-t}$.

Таким образом, найденные траектории (11) и закон управления определяют оптимальный процесс $\{x_1(t), x_2(t), u(t)\}$. Из соотношений (11) выразим начальные координаты x_{10}, x_{20} через текущие x_1, x_2 , получим:

$$x_{10} = (1 - t) e^t x_1 - t e^t x_2, \quad x_{20} = (1 + t) e^t x_2 + t e^t x_1. \quad (12)$$

Найдем далее функцию оптимальности $V(x_1, x_2)$. Согласно определению 1, для функционала (10) получаем,

$$V(x_{10}, x_{20}, t) = \int_0^\infty \left\{ [x_{10} + (x_{10} + x_{20})t]^2 + [x_{20} - (x_{10} + x_{20})t]^2 + (x_{10} + x_{20})^2 \right\} e^{-2t} dt.$$

Проинтегрировав его, имеем

$$B(x_{10}, x_{20}, t) = \left\{ 2x_{10}^2 + 2x_{10}x_{20} + x_{20}^2 + 2x_{10}^2 t + 2x_{10}x_{20}t + (x_{10} + x_{20})^2 t^2 \right\} e^{-2t}.$$

Если теперь в это выражение подставим формулы для начальных координат x_{10}, x_{20} (12), то получим вид функции оптимальности

$$B(x_1, x_2) = 2x_1^2 + 2x_1x_2 + x_2^2. \quad (13)$$

Полученная функция оптимальности полностью совпадает с выражением ν (9.106) в работе [1] см. стр.169, а также с функцией Беллмана, полученной в работе [2]. Однако в нашем случае функция (13) была найдена без решения уравнения Беллмана.

В расширенное пространство состояний с координатами x_1, \dots, x_{n+1} введем многообразие, уравнение для которого построим следующим образом: представим выражение (8) в виде

$$B(x, t) - \int_t^{t_k} f_0(t, x, u) dt = \Phi[x(t_k)],$$

выполнив очевидное преобразование

$$B(x, t) - \int_t^{t_k} f_0(t, x, u) dt - \int_{t_0}^t f_0(t, x, u) dt + \int_{t_0}^t f_0(t, x, u) dt = \Phi[x(t_k)],$$

тогда его можно записать как

$$B(x, t) + \int_{t_0}^t f_0(t, x, u) dt = \int_{t_0}^{t_k} f_0(t, x, u) dt + \Phi[x(t_k)]. \quad (14)$$

Воспользовавшись теперь обозначениями для интеграла I (3) и переменной x_{n+1} представим (14) так

$$x_{n+1} + B(x, t) = I. \quad (15)$$

Соотношение (15) и есть уравнение многообразия в расширенном пространстве состояний.

Определение 2. Многообразие (15) будем называть *оптимальным инвариантным многообразием* (ОИМ) задачи оптимального управления (4)- (7), если функция $B(x, t)$ -функция оптимальности, а интеграл I определяется на оптимальном процессе $\{u(t, x), x(t)\}$.

Основываясь теперь на определении 2, можно сформулировать следующее утверждение относительно протекания оптимальных процессов, которое основывается на понятии синергетической теории управления – понятии инвариантов.

Утверждение 1. Допустимый процесс $\{x(t), x_{n+1}(t), u(t, x)\}$, протекающий на ОИМ, является оптимальным.

Данное утверждение представляет собой достаточное условие оптимальности.

Доказательство. Пусть $\{x(t), x_{n+1}(t), u(t, x)\}$ - некоторый допустимый процесс, который протекает на ОИМ и описывается уравнением (15). Из условий осуществимости движения по многообразию, с учетом уравнений состояния процесса (5), следует

$$\langle B_x(x(t), t), f(x(t), u(t, x), t) \rangle + f_0(x(t), u(t, x), t) = 0, \quad (16)$$

где $B_x(x, t) = (B_{x_1}(x, t), \dots, B_{x_n}(x, t))^T$; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ - скалярное произведение векторов.

Так как $B(x, t)$ - функция оптимальности, то, разрешив уравнение (16) относительно u , найдем оптимальный закон управления $u = u(t, x)$, подстановка которого в уравнения (5) позволяет найти оптимальную траекторию $\{x(t), x_{n+1}(t)\}$.

Следовательно, допустимый процесс $\{x(t), x_{n+1}(t), u(t, x)\}$, протекающий на ОИМ, является оптимальным.

Определение 1 и доказательство приведенного утверждения 1 дают следующий конструктивный подход решения задачи 2 примера (продолжение). Преобразуя задачу (9)-(10) к виду (4)-(7), получим

$$\begin{aligned} I = x_3(\infty) &\Rightarrow \min_u, \\ \dot{x}_1(t) &= x_2, \quad \dot{x}_2(t) = -x_2 + u, \quad \dot{x}_3(t) = x_1^2 + x_2^2 + u^2, \\ x_1(t_0) &= x_{10}, \quad x_2(t_0) = x_{20}, \quad x_3(t_0) = 0, \\ x_1(\infty) &= x_2(\infty) = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда согласно определению 2, найдем ОИМ вида:

$$x_3 + 2x_1^2 + 2x_1x_2 + x_2^2 = I$$

где $I = [2x_{10}^2 + 2x_{10}x_{20} + x_{20}^2 + 2x_{10}^2t_0 + 2x_{10}x_{20}t_0 + (x_{10} + x_{20})^2t_0^2] e^{-2t_0}$.

Доказательство утверждения 1 дает алгоритм поиска оптимального закона управления в форме синтеза. Действительно, из условия осуществимости движения по ОИМ (16) с учетом уравнений состояния (17) получаем уравнение

$$u^2 + 2(x_1 + x_2)u + (x_1 + x_2)^2 = 0.$$

Решив приведенное выше квадратное уравнение относительно u , определяем оптимальный закон управления, $u = -x_1 - x_2$. Он совпадает с оптимальным законом управления, полученным в работе [2].

Рассмотренный пример синтеза оптимального закона управления, основанный на понятии функции оптимальности, ОИМ и утверждении 2 о протекании оптимальных процессов, позволяет представить следующий *алгоритм синтеза оптимальных законов управления*: **1.** Нахождение оптимального процесса $\{x(t), u(t)\}$ как решение задачи программного управления; **2.** Построение функции оптимальности $V(x, t)$ путем нахождения интеграла (8) и определения ОИМ; **3.** Нахождение оптимального закона управления из условия осуществимости движения по ОИМ.

Как и принцип оптимальности Беллмана, изложенный выше вывод, на первый взгляд, кажется достаточно тривиальным фактом. Однако это не так. Имеют место следующие утверждения.

Утверждение 2. ОИМ, описываемое уравнением (15), является первым интегралом задачи оптимального управления (4)-(7).

Доказательство данного утверждения, сформулированное в виде теоремы, приведено в работе [3]. Оно позволяет интерпретировать абстрактно-математическую задачу оптимального управления на языке естественных наук, в которых первый интеграл ассоциируется с принципом сохранения, например энергии в физике. Такое толкование теории оптимального управления позволяет наполнить ее абстрактные структуры естественным и понятным для инженеров содержанием.

Утверждение 3. Выражение (16), описывающее ОИМ, является уравнением границы множества достижимости (границы интегральной воронки) в расширенном пространстве состояний оптимальной задачи управления (4) – (7).

Известно [4], что, зная границу множества достижимости и хотя бы одну его внутреннюю точку, можно однозначно восстановить и само множество достижимости. В настоящее время множества достижимости играют важную роль при решении задач управления, наблюдения и прогнозирования [5, 6].

Таким образом, использование синергетического подхода в задачах оптимального управления на основе ОИМ, позволяет представить алгоритмы для построения регуляторов типа обратной связи для разнообразных технических, технологических и других процессов в металлургии и машиностроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления /Под ред.А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч.II – 559 с.
2. Летов А.М. Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
4. Панасюк А.И., Панасюк В.И. Асимптотическая магистральная оптимизация управляемых систем. Минск: Наука и техника, 1986.
5. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988.
6. Зубов В.И. Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975.
7. Томсон Дж. М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. М.: Мир, 1985.
8. Хакен Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.
9. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Мир, 1987.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА КОРРОЗИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.

В рамках уточненной математической модели релаксации потенциала в кулоностатических условиях разработана методика определения мгновенной скорости коррозии. Методика реализована на базе компьютерной системы и апробирована на реальных электрохимических системах.

РЕЛАКСАЦИЯ, КОРРОЗИЯ, ДРОБНАЯ ПРОИЗВОДНАЯ, МОДЕЛЬ.

1. Постановка проблемы

Основу коррозионного контроля составляют методы и средства оценки коррозионных потерь или скорости коррозии. Наиболее простой из них сводится к измерению потери массы контрольных образцов. В обзоре [1] отмечается, однако, что хотя он и наиболее объективный, его использование ограничено из-за большой трудоемкости и низкой чувствительности (примерно 10^{-6} г). В связи с этим в настоящее время усилия специалистов в области коррозии сконцентрированы, главным образом, на развитии электрохимических методов. Эти методы легко поддаются автоматизации, обладают высокой чувствительностью (соответствующий порог определения потерь массы 10^{-9} г) и позволяют измерять мгновенные значения скорости коррозии. Из анализа, проведенного в работе [2], следует, что среди электрохимических методов коррозионного мониторинга наиболее перспективными являются методики с регистрацией отклика системы на подаваемый извне постоянноточковый или переменноточковый сигнал. Эта группа, включающая метод поляризационного сопротивления, импедансной спектроскопии, кулоностатический и другие релаксационные методы, базируется на предположении о наличии прямых зависимостей между скоростью коррозии и такими характеристиками коррозионных систем, как поляризационное сопротивление R_p и сопротивление переноса заряда R_F .

Указанное предположение было первоначально выдвинуто в работе Стерна [3], который ввел понятие линейной поляризации для описания линейной зависимости между плотностью тока поляризации Δi и малым смещением потенциала ΔE в области потенциала коррозии E_{corr} :

$$\Delta E = R_p \Delta i \quad (1)$$

2. Метод поляризационного сопротивления

Если E и i для катодной и анодной реакции связаны уравнением Тафеля

$$E = a + b \lg|i|, \quad (2)$$

с учетом соотношения $\Delta i_a = -\Delta i_k$ при $E=E_{corr}$ из (1) следует, что

$$R_p = K/i_{corr} \quad (3)$$

$$K = b_a b_k / 2,3(b_a + b_k) \quad (4)$$

Поскольку схема как катодного, так и анодного процесса при коррозии может варьироваться в зависимости от множества факторов (состава металла или сплава, состояния его поверхности, pH среды, присутствия ионов, влияющих на процесс коррозии, наличия ингибиторов, применения катодной или анодной защиты и т.д.), в дальнейшем анализировалась проблема корректного определения термина "поляризационное сопротивление", которое не зависело бы от метода измерения и соответствовало бы уравнению (3). При этом учет конкретного механизма процесса должен достигаться соответствующей модификацией уравнения (4). В работе [4] установлено, что уравнение Стерна (3) справедливо лишь в случае, когда фарадеевский импеданс является чисто резистивным: $R_p = R_F$. Однако, такое толкование параметра, характеризующего скорость коррозионного процесса, было подвергнуто критике в работе [5]. На основании анализа различных эквивалентных схем, содержащих индуктивность и моделирующих процесс с адсорбцией ингибиторов, было продемонстрировано несоответствие экспериментальных данных условию $R_p = R_F$. В этой работе предложено альтернативное определение поляризационного сопротивления:

$$R_p = Z(j\omega) - Z(j\infty) = \operatorname{Re} Z(j\omega) - \operatorname{Re} Z(j\infty) \quad (5)$$

где $Z(j\omega)$ – значение импеданса системы на частоте ω .

Более детальный анализ возможных механизмов процесса коррозии показал, что если анодная реакция протекает с лимитирующей стадией переноса заряда, а катодная контролируется либо только переносом заряда, либо только диффузией, то оба

приведенных определения R_p равноценны; различия будут только в определении константы K . Если же катодный процесс протекает при смешанном контроле или перенос электронов осуществляется по многостадийному механизму, только R_F удовлетворяет соотношению (3). В противоположность этому, для запассивированных электродов лишь R_p , определенное согласно (5), удовлетворяет (3).

Суммируя, можно разделить методику определения скорости коррозии на три этапа. Первый – определение механизма процесса, выбор соответствующего определения R_p и уравнения типа (4), связывающего коэффициент пересчета K с характеристическими константами процесса. Второй этап заключается в определении констант и расчете K . Третий этап – определение R_p и расчет тока коррозии. На практике, при определении как ингибирующего эффекта, так и тока коррозии, зачастую ограничиваются только третьим этапом, выбирая величину K (или коэффициентов Тафеля b_k и b_a) по литературным данным. Однако, для железа в растворах кислот $b_k=0,05...0,1В$, $b_a=0,11...0,13В$. Соответственно K , рассчитанное по уравнению (4), изменяется в пределах $0,015...0,025В$ и его усреднение вносит ошибку в оценку i_{corr} порядка 25%. Для сплавов на основе железа в зависимости от степени их легирования и состава коррозионной среды параметр K может изменяться более чем на порядок (от $0,0025В$ до $0,041В$). Таким образом, чтобы избежать значительных ошибок в определении скорости коррозии, в методику необходимо включать также и второй этап. Кроме того, в целях сокращения времени эксперимента и упрощения аппаратного оформления, предпочтительна реализация методики в целом на базе одного и того же метода.

К настоящему времени разработан ряд методик коррозионного мониторинга на основе кулоностатического метода, используемых для оценки скорости коррозии в низкопроводящих средах, под органическим покрытием и в условиях применения ингибиторов. За малым исключением, величина параметра K в этих методиках выбиралась априорно.

3. Расчет параметров

Стандартная процедура расчета коэффициентов Тафеля для кулоностатической релаксации основана на выборе трех

равноотстоящих по потенциалу точек кривой $E(t)$ и вычислении b по формуле

$$b = \Delta E / \lg[(t_3 - t_2)/(t_2 - t_1)], \quad (6)$$

$\Delta E = E(t_3) - E(t_2) = E(t_2) - E(t_1)$. Это соотношение является следствием основного уравнения релаксации при условии

$$i_F = i_c \exp(E/b') \quad (7)$$

где $b' = 2,3b$ и потенциал отсчитывается от своего стационарного значения E_{cm} . При этом используются свойства первой производной от экспоненты и от сложной функции. Эти свойства для функционала, предложенного автором в работе [6] для адекватного описания процесса в случае твердофазных электродов,

$$\frac{D^n E}{Dt^n} \equiv \frac{d^n E}{dt^n} - \frac{t^{-n}}{\Gamma(1-n)} \lim_{t \rightarrow 0} E(t) \quad (8)$$

в общем случае не выполняются. К тому же, как показывает опыт, трехточечная процедура определения коэффициента Тафеля, основанная на соотношении (6), очень чувствительна к наличию помех. Если же $n \neq 1$, как видно из (8), функционал имеет лишь одну особую точку $t = \tau$, которая легко устраняется интегрированием по частям. Поэтому в этом случае для расчета коэффициентов Тафеля можно использовать основное уравнение, которое здесь удобно представить в виде:

$$E(t)/b = \ln[-(D^n/Dt^n)E(t)] + \ln(K/i_c) \quad (9)$$

Необходимо отметить, что константа i_c равна току коррозии i_{corr} только при условии, что стационарный потенциал приходится на тафелевский участок как для катодного, так и для анодного процесса.

4. Расчет импеданса по совокупности релаксационных кривых

Ранее ([6]) было показано, что релаксационные кривые при наличии элемента постоянной фазы на малых временах регистрации убывают быстрее по сравнению с экспонентой и медленнее – на больших. Кроме того, изучаемая электрохимическая система может характеризоваться несколькими временными константами, как например, коррозия подложки под покрытием. В связи с этим, возникает проблема учета конечной погрешности регистрации сигнала в случае, когда эквивалентная схема процесса априорно не задана. Если указанная погрешность достаточно велика, то приведенные в литературном обзоре методы, основанные на

регрессионном анализе кулоностагических данных, не дают достаточно четкого критерия выбора эквивалентной схемы.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является получение дополнительной информации в ходе эксперимента. В частности, регистрируя релаксацию потенциала в разных временных диапазонах, изменяя при этом величину переданного заряда, возможно увеличить чувствительность метода при больших временах спада (в области низких частот). Для этого необходимо нормировать каждую кривую на соответствующую ей величину E_0 и выбрать наиболее информативный участок для данного временного диапазона.

5. Заключение

При переходе к реальным объектам чрезвычайно важным является вопрос о возможности получения непрерывной суммарной релаксационной кривой после нормирования значений потенциала на величину начального потенциала. Поскольку теоретическое обоснование этой непрерывности требует анализа сложных проблем асимптотической устойчивости решений исходного уравнения, это условие каждый раз в ходе эксперимента проверялось построением соответствующей кривой в логарифмических координатах. Для всех остальных исследованных систем непрерывность нормированного потенциала и его первой производной по времени выполнялась практически во всем временном диапазоне измерения.

В первой серии экспериментов проводились измерения параметров коррозии стального электрода в растворе серной кислоты. Во второй серии измерений в раствор серной кислоты добавлялся ингибитор кислотной коррозии ХОСП-10. Расчитанные значения тока коррозии хорошо согласуются с литературными данными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романив О.Н., Цирульник А.Т., Крыськив А.С., Рончевич И.Ч. Электрохимические методы в коррозиометрии металлов.// Физико-химическая механика материалов.- 1989.- т.35 - №1.- С.3-15.
2. Green W.K., Hughes H.C., Linge H.G. Measurement of steel corrosion rates in concrete.// In: Proc. Conf. 28 "Corrosion - A Tax Forever", Perth, Australia. 21-25 November, 1988.- v.1. P.1-2.1 - 1-2.9.
3. Stern M. A method for determining corrosion rates from linear polarization data.// Corrosion.- 1958.- v.14 - №9.- P.440t-444t.

4. Eppelboim J., Keddam M., Takenouti H. Use of impedance measurements for the data determination of the instant rate of metal corrosion.// J. Appl. Electrochem.- 1972.-v.2, №1.- P.71-79.
5. Mansfeld F. Recording and analysis of AC impedance data for corrosion studies. I: Background and methods of analysis.// Corrosion.- 1981.- v.37 - №5.- P.300-307.
6. Капітонов О.Г. Математична модель релаксації електричного заряду на твердофазних електродах. Питання адекватності //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (67). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 96-99.

УДК 669.162.212:669.083.133

И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Е.А. Белошапка,
Е.И. Шумельчик, Ю.С. Семенов

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ НА ФУТЕРОВКУ
МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Представлены результаты разработки критерия оценки расплавов на футеровку металлоприемника в нестационарные периоды работы доменной печи, выполненной с использованием метода группового учета аргументов и регрессионного анализа.

ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ, ГОРН, ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ, КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ НА ФУТЕРОВКУ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА.

Постановка проблемы. Доменщики во всем мире сходятся во мнении, что продолжительность срока службы доменной печи определяется техническим состоянием горна - его футеровки и системы охлаждения горна и лещади [1]. С точки зрения продления кампании доменной печи важным является наличие объективной информации, которая может быть получена с помощью комплексной системы мониторинга состояния горна [2]. Такая система мониторинга состояния горна разработана ИЧМ и реализована в составе АСУ ДП №8 и ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» – система контроля теплового состояния системы охлаждения и остаточной толщины футеровки металлоприемника «Разгар» (далее система «Разгар») [3]. Эта система использует фактические данные, поступающие от установленных в металлоприемнике печи термопар, и рассчитывает фактическую толщину футеровки, что позволяет технологам принимать оперативные меры в соответствии с возникшей ситуацией.

Процессы, протекающие в горне и способствующие иногда его прорыву, пока мало поддаются регулированию. Поэтому, разработка новых критериев, на основе которых возможно осуществлять регулирование теплового состояния горна доменной печи с учетом состояния его футеровки и обеспечения необходимой толщины

© Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Белошапка Е.А.,
Шумельчик Е.И., Семенов Ю.С., 2012

гарнисажа, наличие которого необходимо с точки зрения обеспечения сохранности футеровки и уменьшения тепловых потерь, является актуальной и наукоемкой задачей.

Цель. Целью выполнения настоящих исследований является разработка критерия оценки изменения тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади в зависимости от интенсивности изменения содержания кремния. Выбор и обоснование критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи обусловлены необходимостью изучения влияния различных факторов в динамике на состояние футеровки с целью обеспечения возможности прогноза ее величины, что особенно важно при возникновении нестандартных ситуаций, в частности вывода печи на нормальный ход после ее аварийной остановки. Такой критерий позволит контролировать составляющую теплового потенциала горна доменной печи, воздействующую на футеровку металлоприемника (комплексный критерий воздействия расплавов на футеровку металлоприемника).

Основная часть. Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника осуществлялась на основе установления функциональных зависимостей технологических параметров и показателей, определяющих тепловое состояние горна, от величины суммарных тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника и температур кладки, по которым рассчитывается остаточная толщина футеровки.

Значительную опасность для сохранности футеровки горна и лещади доменной печи представляют периоды промывок, которые осуществляют в случаях загромождения горна, вызванного ухудшением в горне фильтрующей способности кокса из-за низкой его прочности, либо аварийные ситуации, вызванные вынужденной остановкой печи по причине оползания гарнисажа шахты. Именно один из таких периодов работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» явился основой для исследований, направленных на установление взаимосвязи изменения содержания кремния в чугуне с тепловыми нагрузками, определяемыми системой «Разгар». Приведенные причины разрушения футеровки в значительной степени определяются содержанием кремния в чугуне, принятого в качестве критерия теплового состояния горна доменной печи.

Известно, что тепловое состояние горна, в том числе, определяется химическим составом приходящего в горн шлака. Оценка влияния шлаковых расплавов на тепловое состояние горна печи осуществлялась с помощью полной основности шлака, определяемой в соответствии с выражением $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$, а также с помощью показателя стехиометрии ρ , основанного на свертке их химического состава.

Одним из контролируемых показателей, по которому оценивают работу газа в печи, является величина выхода колошникового газа. Известно, что при увеличении количества углерода, сжигаемого у фурм (например, в связи с возросшей потребностью тепла), возрастает общее количество газа. То есть, величина выхода колошникового газа прямо пропорциональна содержанию кремния в чугуна. Для исследуемого периода работы печи взаимосвязь величины выхода колошникового газа с содержанием кремния в чугуна имеет обратно пропорциональный характер, что объясняется спецификой восстановления кремния в этот период. Установленная взаимосвязь (таблица 1) послужила основанием использования в качестве одного из аргументов в выражении, описывающем комплексный критерий воздействия расплавов на футеровку, величины выхода колошникового газа.

Как показано в работе [4], для контроля теплового состояния низа печи может быть использовано содержание углерода в чугуна, уровень которого влияет на растворение углерода углеродистых огнеупоров металлоприемника, что определяет стойкость этого важнейшего элемента доменной печи. Химическое растворение углерода кладки чугуном возможно при существовании разницы между концентрацией насыщения чугуна углеродом и фактического его содержания в расплаве. Превалирующее влияние на концентрацию насыщения чугуна углеродом таких факторов, как содержание в расплаве кремния и температуры создает предпосылки к чувствительности фактического содержания углерода в чугуна к температурно-тепловому состоянию горна доменной печи. В результате выполненных в ИЧМ исследований установлено, что для повышения стойкости футеровки металлоприемника доменной печи необходимо поддерживать степень насыщения чугуна углеродом на уровне не ниже 94%.

Надежность соотношений между рассчитываемыми величинами и основными показателями плавки оценивали с помощью взаимно корреляционных функций, описывающих в динамике характер взаимосвязей между значениями отдельных параметров и тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади. Определение параметров и показателей доменной плавки, которые могут являться аргументами в выражении критерия теплового состояния низа доменной печи, осуществлялось путем установления тесноты взаимосвязи суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади последовательно с каждым из аргументов.

При разработке критерия оценки изменения тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади в зависимости от интенсивности изменения содержания кремния (комплексного критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника) во внимание принимались следующие параметры и показатели плавки, контролируемые в АСУ ДП №9 и определяющие тепловое состояние низа доменной печи:

[Si] – среднесуточное содержание кремния в чугунае, ед;

$\Delta Q_{\text{сум}}$ – суммарные тепловые нагрузки на металлоприемник доменной печи, Вт;

$V_{\text{кг}}$ – величина выхода колошникового газа м³/мин;

Осн – полная основность шлака $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$, ед;

[C]/C_{нас} – отношение содержания углерода в чугунае к углероду насыщенному, ед;

ρ – стехиометрия шлака, ед;

D_{gar} – толщина гарнисажа, м.

Содержание углерода в чугунае рассчитывается по эмпирической формуле [4]:

$$[C]=4,6-0,27\cdot[Si]-0,32\cdot[P]+0,03\cdot[Mn]-0,032\cdot[S],$$

где [Si] – содержание кремния в чугунае, %; [P] – содержание фосфора в чугунае, %; [Mn] – содержание марганца в чугунае, %; [S] – содержание серы в чугунае, %.

Как указывалось выше, на величину тепловых нагрузок оказывает влияние не только химическое тепло, но и шлак, обуславливающий физический нагрев продуктов плавки. Анализ парной корреляции суммарных тепловых нагрузок на холодильники металлоприемника и основности шлака (как комплексного показателя воздействия шлака на футеровку и гарнисаж низа печи)

показал достаточно высокую тесноту их связи (таблица 1). Положительный знак коэффициента корреляции между суммарными тепловыми нагрузками и основностью шлака объясняется превалирующим влиянием основности шлака на нагрев горна (что обуславливает более энергичное восстановление кремния) по сравнению с ее влиянием на изменение концентрации несвязанного кремнезема.

Тесная взаимосвязь $C/C_{\text{нас.}}$ с тепловыми нагрузками, характеризуемая коэффициентом корреляции $r_{xy} = 0,71$ (таблица 1), подтверждает чувствительность фактического содержания углерода в чугуне к изменению теплового состояния горна печи.

Построение критерия. Для построения критерия использован известный метод группового учета аргументов, который разрабатывается академиком НАН Украины А.Г.Ивахненко и его школой уже более 40 лет, и является типичным методом индуктивного моделирования и одним из наиболее эффективных методов структурно-параметрической идентификации сложных объектов, процессов и систем по данным наблюдений в условиях неполноты информации [5].

Основным параметром оценки теплового состояния низа доменной печи принято содержание кремния в чугуне, что послужило основанием использования его в качестве аргумента в выражении критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника. Кремний с коэффициентом 0,83 определяет размер гарнисажа в нижней части доменной печи при нестабильном ходе печи, а также с коэффициентом корреляции 0,70 определяет тепловые нагрузки на холодильники металлоприемника доменной печи. В результате анализа корреляционной матрицы выбранных параметров (таблица 1) можно выделить не зависимые, либо наименее зависимые от содержания кремния параметры, которые и будут приниматься во внимание при построении критерия. Как показал анализ таблицы 1, такими параметрами являются показатель стехиометрии (коэффициент корреляции с содержанием кремния - 0,1729), а также основность шлака (коэффициент корреляции с содержанием кремния -0,5768). Оба параметра имеют незначительную связь с содержанием кремния в чугуне, но при этом характеризуются достаточной теснотой связи с тепловыми нагрузками. То есть в выражении критерия может быть использована либо величина показателя стехиометрии шлака, либо его основность. Оба эти параметра характеризуют влияние шлакового расплава на металлоприемник.

Таблица 1

Корреляционная матрица выбранных параметров для оценки теплового состояния низа доменной печи на основе анализа суммарных тепловых нагрузок на холодильники металлорейки в нестационарный период работы печи

[C]/Снас	Si	ρ	Vкг	осн	T теор	Q, МВт	Dгар_ср	ηсо	Si:[C]/Снас / (Осн·Vкг)	Si:[C]/Снас / (Ro·Vкг)	Si:[C]/Снас / (Осн·Vкг)	Si:[C]/Снас / (ρ·ηсо)
[C]/Снас	1,0000											
Si	0,7655	1,0000										
ρ	-0,2938	0,1729	1,0000									
Vкг	-0,6188	0,8138	0,3070	1,0000								
осн	-0,5714	0,5768	0,8857	0,5997	1,0000							
T теор	-0,5206	0,7402	0,1297	0,6125	0,4494	1,0000						
Q, МВт	-0,7103	0,7006	0,4883	0,6575	0,7100	0,3830	1,0000					
Dгар_ср	0,7434	0,8249	0,4346	0,7952	0,7257	0,5417	0,9516	1,0000				
ηсо	-0,5644	0,8553	0,1563	0,8475	0,5146	0,8000	0,4873	0,6913	1,0000			
Si:[C]/Снас / (Осн·Vкг)	0,6146	0,8542	0,0491	0,8786	0,4286	0,6968	0,5692	0,7680	0,9123	1,0000		
Si:[C] / Снас / (Ro·Vкг)	0,5912	0,8327	0,0036	0,8629	0,3737	0,6710	0,5397	0,7388	0,8954	1,0000		
Si:[C] / Снас / (Осн·ηсо)	0,6926	0,9329	0,1561	0,8149	0,5436	0,7945	0,6130	0,7895	0,9384	0,8796	1,0000	
Si:[C] / Снас / (ρ·ηсо)	0,6849	0,9327	0,1019	0,8118	0,4968	0,7900	0,5911	0,7714	0,9410	0,8946	0,9977	1,0000

Следующий этап в построении критерия заключался в выделении параметров, имеющих высокую тесноту взаимосвязи с тепловыми нагрузками и описывающих влияние на металлоприемник других факторов. Как показал анализ таблицы 1, такими параметрами являются: $C/C_{\text{нас.}}$, $V_{\text{кг}}$ и степень использования газа (η_{co}). При этом, такие параметры, как $V_{\text{кг}}$ и степень использования газа характеризуют работу газа в печи, поэтому в выражении критерия может быть использован один из этих параметров. Как показывает анализ таблицы 1 $V_{\text{кг}}$ по сравнению со степенью использования газа имеет большие коэффициенты корреляции с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника, что дает основание использовать величину выхода колошникового газа в выражении критерия.

Отношение содержания углерода в чугуне к углероду насыщенному $-[C]/C_{\text{нас}}$, хотя и имеет высокую тесноту связи с кремнием, что вызвано определяющей ролью кремния в достижении равновесной концентрации углерода, но не может не учитываться в выражении критерия, так как чувствительно к изменениям теплового состояния низа печи.

Таким образом, основываясь на выполненном обосновании выбора параметров для разработки критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и результатах анализа таблицы взаимной корреляции параметров теплового состояния низа доменной печи (таблица 1), в качестве аргументов критерия выбраны следующие параметры: $[Si]$ – среднесуточное содержание кремния в чугуне, ед; $V_{\text{кг}}$ – выход колошникового газа; $O_{\text{сн}}$ – полная основность шлака $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$, ед.; $[C]/C_{\text{нас}}$ – отношение содержания углерода в чугуне к углероду насыщенному.

То есть, разрабатываемый критерий будет иметь вид

$$K = f([Si], [C]/C_{\text{нас}}, O_{\text{сн}}, V_{\text{кг}}) \quad (1)$$

Согласно анализу множественной корреляции параметров следует, что их добавление в критерий приводит к увеличению достоверности описания теплового состояния низа доменной печи (коэффициент регрессии с суммарными потерями тепла и с размером гарнисажа увеличивается).

Далее, по методу группового учета аргументов, необходимо выполнить генерацию структур для выбора оптимального критерия, описывающего тепловое состояние низа доменной печи. Были

сгенерированы структуры следующего вида: $[Si]$, $\frac{1}{V_{к2}}$, $[C]/C_{нас}$, $\frac{1}{Осн}$, $\frac{[Si]}{V_{к2}}$, $\frac{1}{Осн \cdot V_{к2}}$, $[Si] \cdot [C]/C_{нас}$, $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$, $\frac{[C]/C_{нас}}{V_{к2}}$, $\frac{[Si]}{Осн \cdot V_{к2}}$, $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}}$, $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн}$, $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$. Для построения критерия приведем все параметры к нормированным их значениям, т.е. $[Si]_{норм} = \frac{[Si] - \min([Si])}{\max([Si]) - \min([Si])} + 1$, и т.д.

Из анализа корреляционной матрицы структур сразу исключим те структуры, которые очень тесно связаны между собой. Наибольшую связь с теплом имеет структура $\frac{[Si]}{Осн}$, поэтому исключаем из рассмотрения структуры $\frac{[Si]}{Осн \cdot V_{к2}}$ и $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн}$, так как они очень тесно связаны с $\frac{[Si]}{Осн}$ ($r=0,96$). Следующим выбираем наиболее комплексный параметр $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$. Исходя из результатов парной корреляции структур, исключим следующие структуры из анализа $[Si] \cdot [C]/C_{нас}$, $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2}}$ и $\frac{[C]/C_{нас}}{V_{к2}}$. Далее выполним регрессионный анализ для составления критерия на оставшихся 10 структурах $[Si]$, $\frac{1}{V_{к2}}$, $[C]/C_{нас}$, $\frac{1}{Осн}$, $\frac{[Si]}{V_{к2}}$, $\frac{[Si]}{Осн}$, $\frac{1}{Осн \cdot V_{к2}}$, $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$, $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}}$, $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$.

Критерий строится как линейная комбинация всех выделенных структур с подбором весовых коэффициентов по методу наименьших квадратов:

$$K = \alpha_1 \cdot [Si] + \frac{\alpha_2}{V_{к2}} + \alpha_3 [C]/C_{нас} + \frac{\alpha_4}{Осн} + \alpha_5 \frac{[Si]}{V_{к2}} + \alpha_6 \frac{[Si]}{Осн} + \frac{\alpha_7}{Осн \cdot V_{к2}} + \alpha_8 \cdot \frac{[C]/C_{нас}}{Осн} + \alpha_9 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}} + \alpha_{10} \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}},$$

где $\alpha_i, i = \overline{1..10}$ - вещественные коэффициенты.

После проведения регрессионного анализа мы можем удалить те структуры, которые наименее влияют на критерий: $[C]/C_{нас}$ – степень влияния 3%, $\frac{1}{Осн \cdot V_{кг}}$ – степень влияния 1,5% и $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$ – степень влияния 0,8%. Далее критерий будем искать в виде

$$K = \alpha_1 \cdot [Si] + \frac{\alpha_2}{V_{кг}} + \frac{\alpha_3}{Осн} + \alpha_4 \frac{[Si]}{V_{кг}} + \alpha_5 \frac{[Si]}{Осн} + \alpha_6 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} + \alpha_7 \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} .$$

После выполнения регрессионного анализа исключаем из рассмотрения те структуры, которые оказывают наименьшее влияние на связь критерия с тепловыми нагрузками, а также параметры, тесно связанные между собой. Так как новый критерий будет носить оценочный характер, а не описательный (т.е. нет прямого соответствия размерности критерия с откликом системы), то свободный член не учитывается. Таким образом, получим критерий оценки воздействия расплавов на футеровку низа доменной печи в виде:

$$K = 0.798 \cdot [Si] + 2.024 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} - 0.938 \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} .$$

После преобразований критерий может быть представлен следующим выражением:

$$K = 0,798 \cdot [Si] + \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} [2,024 - 0,938 \cdot [Si]] \quad (2)$$

Более высокие значения коэффициентов корреляции критерия с тепловыми нагрузками -0,806 и с толщиной гарнисажа 0,866, по сравнению с их значениями, полученными для содержания кремния в чугунах с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника (-0,70) и с толщиной гарнисажа (0,78), свидетельствуют о том, что использование предложенного критерия позволяет комплексно описать воздействие расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи.

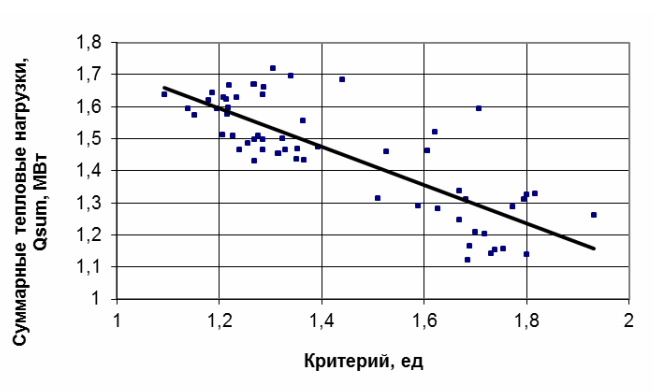
Если представить критерий в упрощенном варианте:

$$K_1 = \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} , \quad (3)$$

где $[Si]$ – относительное изменение содержания кремния в чугунах, ед; $Осн.$ – относительная основность шлака, ед; $V_{кг}$ – относительное количество колошниковых газов, ед., то значения коэффициентов корреляции K_1 с тепловыми нагрузками уменьшаются до 0,76 и в этом случае теснота взаимосвязи содержания кремния с тепловыми нагрузками увеличивается.

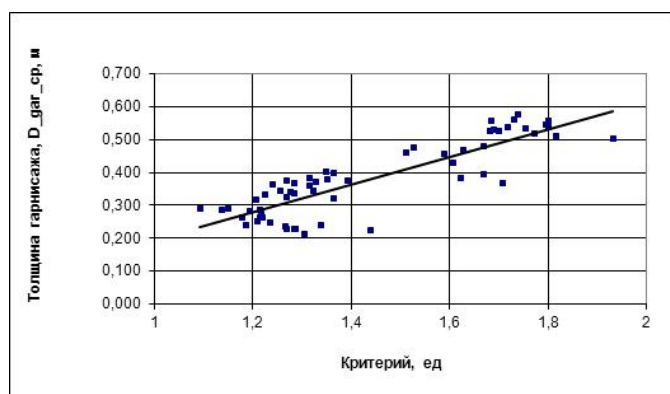
Перспективы использования комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника в АСУ ДП

Образуемый на рабочей поверхности футеровки горна и лещади металлокерамический слой – гарнисаж является защитой от теплового разгара и эрозионного разрушения. Поэтому поддержание рациональной толщины гарнисажа в пределах 0,2 – 0,3 м является важной задачей с позиции защиты футеровки и продления кампании печи. На основе предложенного комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника для исследуемого периода работы ДП №9 определена зависимость суммарных тепловых нагрузок от критерия (рисунок 1), а также зависимость толщины гарнисажа от величины критерия K , представленная на рисунке 2. На основе представленной на рисунке 2 зависимости могут быть определены граничные условия изменения комплексного критерия, позволяющие ограничить негативное воздействие расплавов на футеровку металлоприемника, при этом сохранив требуемую толщину гарнисажа. Как следует из рисунка 2, граничные условия изменения комплексного критерия могут быть представлены в виде: $1,0 \leq K \leq 1,2$. Полученные для условий нестационарной работы ДП №9 граничные условия изменения комплексного критерия могут быть уточнены в результате дальнейших исследований.



$$R_{x,y} = -0,806$$

Рисунок 1 – Зависимость суммарных тепловых нагрузок от комплексного критерия K



$$R_{x,y} = 0,866$$

Рисунок 2 – Зависимость толщины гарнисажа от величины комплексного критерия K

Как показали результаты исследований, между толщиной гарнисажа и критерием существует достаточно тесная взаимосвязь, характеризуемая коэффициентом корреляции 0,87. Основываясь на этой взаимосвязи, может быть предложен следующий метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа. Метод основан на использовании разработанного ранее способа прогнозирования содержания кремния в чугуна и включает [6]:

1. Прогноз содержания кремния в чугуна за 3 часа до выпуска и, соответственно, прогноз с высокой достоверностью 0,8 величины комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника.

2. Определение с достоверностью 0,87 (согласно зависимости, представленной на рисунке 2) значения толщины гарнисажа металлоприемника.

3. Сопоставление прогнозируемой величины критерия с граничными условиями его изменения и принятие соответствующих технологических решений, направленных либо на дальнейший разогрев горна, либо на его стабилизацию на достигнутом уровне.

Использование предложенного метода позволит избежать чрезмерных промывок, вызывающих избыточное расплавление гарнисажа, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, что в свою очередь влечет уменьшение продолжительности кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна. Кроме контроля сохранности футеровки, установленные взаимосвязи содержания кремния в чугуна с тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади могут быть использованы при оптимизации массы промывочных порций кокса, что в конечном итоге будет способствовать его экономии. Как показывает зависимость толщины гарнисажа от комплексного критерия, представленная на рисунке 2, рациональной толщине гарнисажа, изменяющейся в диапазоне от 0,2 до 0,3 м, соответствуют минимальные значения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи.

При установившейся работе печи, когда футеровка металлоприемника не испытывает возмущений, приводящих к ее разрушению, предложенный критерий не может быть использован.

Выводы. Разработан новый целевой критерий оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и на его основе метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа. Использование предложенного метода позволит избежать чрезмерных промывок, вызывающих избыточное расплавление гарнисажа, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, что в свою очередь влечет уменьшение продолжительности кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савчук Н.А. Доменное производство на рубеже XXI века /Н.А. Савчук, И.Ф. Курунов - АО «Черметинформация», Новости черной металлургии за рубежом. Часть II. Приложение 5, 2000. – 42 с.
2. Увеличение продолжительности кампании доменных печей /Новости черной металлургии за рубежом. - 2006. - №2 – С. 23 – 27.
3. Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь»: Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», /Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. - 2004. - С. 511–514.
4. Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи /Н.М. Можаренко, А.А. Параносенков, Г.В. Панчоха и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. ИЧМ – Вып. 12 –Днепропетровск ИЧМ, 2006. – С. 77-84.
5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А.Г. Ивахненко. - Киев: Техніка, 1975. - 311 с.
6. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи /В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико, Е.И. Шумельчик // Сталь, 2009, № 5. – С. 7–9.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР ИНТЕГРИРОВАННЫХ КОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается иерархическая структура интегрированных контроллерных систем управления. На теоретико-множественном уровне описаны типовые элементы функциональных уровней управления – управляющие автоматы и операционные автоматы данных и знаний. Предложены теоретико-множественные модели уровня управления и интегрированной контроллерной системы управления.

Введение

Под интегрированной контроллерной системой управления (ИКСУ) будем понимать систему, содержащую, по крайней мере, один программируемый логический контроллер (ПЛК) [1], в которой одновременно функционируют, взаимодействуя между собой и внешней средой, более одной системы управления различного назначения. Это могут быть системы управления объектом, параметрической, структурной адаптацией и организацией управляющего устройства системы и другие [2]. Типовая ИКСУ содержит также персональный компьютер (ПК) в программной среде которого формируются базы данных и знаний управления и исполняются приложения управления, в том числе приложение визуализации или человеко-машинного интерфейса (НМИ – Human Machine Interface) [3]. Наличие в составе ИКСУ узлов с мощными вычислительными ресурсами, такими как ПК и ПЛК, позволяет реализовать сложные алгоритмы управления и повысить уровень системы – перейти от технической системы к кибернетической [4].

Для моделирования систем управления разработаны теоретико-множественные модели (ТММ), в том числе, такие как модель агрегативной системы Н.П. Бусленко [5], непрерывно-дискретной системы В.М. Глушкова [6, 9], гибридной системы Д. Харела, А. Пнуэли [7, 8]. Вместе с тем, в известной литературе не

рассматривается теория структурирования ИКСУ, отсутствуют ТММ типовых функциональных элементов и структур ИКСУ, что усложняет процесс их проектирования. Таким образом, моделирование элементов и структур ИКСУ представляет собой актуальную нерешенную научно-техническую проблему. Задачами настоящей работы являются разработка ТММ типовых функциональных элементов и структур ИКСУ.

Содержание исследований

Предлагаемая структура ИКСУ опирается на состав системы, разделение управляющего устройства (УУ) на уровни, выделение типовых элементов, связей и структур уровня ИКСУ, и их описание на теоретико-множественном уровне.

Полагаем, что ИКСУ состоит из объекта управления (ОУ) и управляющего устройства, которые взаимодействуют с внешней средой (ВС) [6]. Причем УУ разделен на уровни (подсистемы), каждый из которых решает локальную задачу, определяемую целями управления. ОУ в самом нижнем уровне совпадает с ОУ системы в целом, а ОУ на вышележащих уровнях являются элементы УУ нижележащих уровней. Элементный состав уровня УУ включает блоки операционных (ОА) и управляющих (УА) автоматов. Связи между элементами внутри уровня и внешние связи уровня используются для передачи данных и знаний. В состав УУ входит также хранилище данных и знаний (ХДЗ), организованное как массивы, таблицы, базы данных или знаний на машинном носителе. Хранилище ХДЗ в ИКСУ может быть централизованным или распределенным, как по уровням, так и по узлам УУ, имеющим вычислительный ресурс и память.

Данные это значения параметров ОУ, УУ или ВС, "привязанные" к набору атрибутов (наименование, тип, единица измерения, диапазон допустимых значений, погрешности определения, частота обновления и другие). В ряде публикаций такую комбинацию называют тегом данных. Значения атрибутов тега – это знания системы о данном параметре, определяющие параметры процесса использования данных в системе управления.

Классифицируем данные по следующим признакам: источнику (данные ВС, ОУ, УУ), времени относительно текущего момента работы системы (текущие, исторические и прогнозируемые), способу

получения (измеренные, смоделированные), отношению к источнику (первичные, производные), форме представления (аналоговая, цифровая), типу (логические, цифровые, строковые), приоритету обработки и степени важности.

Типовые операции с данными: получение, фильтрация, преобразование формы представления, единиц измерения, формата, операции с базой данных, проверка на наличие тревог, функциональное преобразование входных данных в выходные, регулирование выходных данных и моделирование (генерация) ненаблюдаемых данных. Операции с базой данных включают сохранение в базе текущих данных, удаление из этой базы, сохранение в архиве на машинном носителе с метками времени определения/регистрации значения (регистрация), поиск, сортировку данных. В ходе функционального преобразования входных данных в выходные используются арифметические, тригонометрические, логические, статистические и другие операции.

Элементы системы, реализующие операции с данными, будем называть операционными автоматами данных (ОАД). Эти автоматы могут быть описаны на теоретико-множественном уровне как кортеж

$$\text{ОАД} = \langle S_{\text{ОАД}}, s_{0\text{ОАД}}, D_I, A_{DI}, C_{\text{ОАД}}, D_{\text{COAD}}, D_O, A_{DO}, E_{DO}, \lambda_{\text{ОАД}}, \delta_{\text{ОАД}}, \eta_{\text{ОАД}}, \mu_{\text{ОАД}} \rangle, (1)$$

где: $S_{\text{ОАД}}$ – множество состояний ОАД; $s_{0\text{ОАД}}$ – начальное состояние ОАД; D_I – множество значений исходных данных; A_{DI} – множество значений атрибутов исходных данных; $C_{\text{ОАД}}$ – множество команд (управлений) ОАД; D_{COAD} – множество значений изменяемых параметров ОАД; D_O – множество значений выходных данных; A_{DO} – множество значений атрибутов выходных данных; E_{DO} – множество событий данных; $\delta_{\text{ОАД}}$ – функция переходов ОАД; $\lambda_{\text{ОАД}}$ – функция выходов данных; $\eta_{\text{ОАД}}$ – функция выходов атрибутов выходных данных; $\mu_{\text{ОАД}}$ – функция событий данных. Входящие в (1) функции определим как

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ОАД}}: S_{\text{ОАД}} \times D_I \times A_{DI} \times C_{\text{ОАД}} \times D_{\text{COAD}} &\rightarrow S_{\text{ОАД}}; \\ \lambda_{\text{ОАД}}: S_{\text{ОАД}} \times D_I \times A_{DI} \times C_{\text{ОАД}} \times D_{\text{COAD}} &\rightarrow D_O; \\ \eta_{\text{ОАД}}: S_{\text{ОАД}} \times D_I \times A_{DI} \times C_{\text{ОАД}} \times D_{\text{COAD}} &\rightarrow A_{DO}; \\ \mu_{\text{ОАД}}: S_{\text{ОАД}} \times D_I \times A_{DI} \times C_{\text{ОАД}} \times D_{\text{COAD}} &\rightarrow E_{DO}. \end{aligned}$$

Знания – это модели описывающие свойства объектов реального мира и отношений между ними. Будем различать: тезаурус - знания системы об окружающем мире и о себе (свойства ОУ, ВС, УУ); цели функционирования системы – знания о желаемых результатах ее работы; знания об опасностях – знания о нежелательных данных и (или) результатах работы СУ; методы управления - знания о путях достижения желаемых и (или) минимизации нежелательных результатов работы СУ. Знания поступают в систему извне на всех этапах ее жизненного цикла или вырабатываются системой на основе поступающих в нее данных. Так, на этапе проектирования системы, знания имплантируются в структуру и параметры элементов УУ или хранятся в базе знаний. В последнем случае системы обладают большей гибкостью.

Атрибутами знаний являются: содержание (теги исходных знаний и отношения между ними, образующие новое знание); тип (декларативные, процедурные); объект (ОУ, ВС, УУ); степень уверенности в истинности (количественная оценка, например, в интервале от 0 до 1); источник (внесенные, синтезированные); категория (тезаурус, цели, опасности, методы); база формирования (исходные данные, исходные знания); степень открытости (открытые, защищенные, закрытые для других классов системы); метка времени получения; степень важности и опасности. Совокупность атрибутов относящихся к одному знанию образует тег знания.

Типовые операции со знаниями это получение, сохранение в базе текущих знаний, удаление из этой базы, сохранение в архиве на машинном носителе с метками времени определения/регистрации (регистрация), поиск, сортировка, фильтрация, применение и другие. Элементы системы, реализующие операции со знаниями, будем называть операционными автоматами знаний (ОАЗ). Теоретико-множественное описание ОАЗ представляет собой кортеж

$$ОАЗ = \langle S_{ОАЗ}, s_{0ОАЗ}, K_I, A_{KI}, D_I, A_{DI}, C_{ОАЗ}, D_{COАЗ}, K_O, A_{KO}, E_{KO}, \lambda_{ОАЗ}, \delta_{ОАЗ}, \eta_{ОАЗ}, \mu_{ОАЗ} \rangle, (2)$$

где $S_{ОАЗ}$ – множество состояний ОАЗ; $s_{0ОАЗ}$ – начальное состояние; K_I – исходные знания; A_{KI} – множество атрибутов исходных знаний; $C_{ОАЗ}$ – команды ОАЗ; $D_{COАЗ}$ – множество значений изменяемых параметров ОАЗ; K_O – множество выходных знаний; A_{KO} – множество атрибутов выходных знаний; E_{KO} – множество событий

знаний; δ_{OAK} – функция переходов ОАЗ; λ_{OAK} – функция выходов знаний; η_{OAK} – функция выходов атрибутов выходных знаний; μ_{OAK} – функция событий данных. Входящие в (2) функции определим как

$$\begin{aligned}\delta_{OAK} &: S_{OAK} \times K_I \times A_{KI} \times D_I \times A_{DI} \times C_{OAK} \times D_{COAK} \rightarrow S_{OAK}; \\ \lambda_{OAK} &: S_{OAK} \times K_I \times A_{KI} \times D_I \times A_{DI} \times C_{OAK} \times D_{COAK} \rightarrow K_O; \\ \eta_{OAK} &: S_{OAK} \times K_I \times A_{KI} \times D_I \times A_{DI} \times C_{OAK} \times D_{COAK} \rightarrow A_{KO}; \\ \mu_{OAK} &: S_{OAK} \times K_I \times A_{KI} \times D_I \times A_{DI} \times C_{OAK} \times D_{COAK} \rightarrow E_{DO}.\end{aligned}$$

Для активизации в определенной последовательности и (или) при определенных условиях операций над данными и знаниями, выполняемых ОАД и ОАЗ, применяются управляющие автоматы (УА). Автомат УА формально описывается в виде некоторого конечного автомата

$$UA = \langle S_{YA}, s_0, X, Y, C_{YA}, D_{YA}, \delta, \lambda \rangle,$$

где S_{YA} – множество состояний; s_0 – начальное состояние; X – множество входных сигналов; Y – множество выходных сигналов; C_{YA} – команды (управления) УА; D_{YA} – параметры УА; $\delta : S_{YA} \times X \rightarrow S_{YA}$ – функция переходов; λ – функция выходов. В общем случае, множество сигналов X не связано непосредственно с выходами ОУ, а является продуктом переработки собственно сигналов ОУ входными операционными автоматами (ВхОА). Аналогично, множество Y не связано непосредственно с входами ОУ, а перерабатывается выходными операционными автоматами (ВыхОА). УА могут образовывать сложные иерархические структуры [10]. Конкретный УА, находящийся на определенном уровне ИКСУ, может выступать как объект управления со стороны элементов вышестоящих уровней. В ходе такого управления могут изменяться множества, задающие автомат или автомат может быть заменен альтернативным. Мощность множества УА в уровне ИКСУ определяется количеством параллельных ветвей и альтернативных вариантов процесса управления.

Опираясь на описанные выше модели ОА и УА определим i -й уровень ИКСУ, в общем случае, как кортеж вида

$$UP_i = \langle M_{OAdi}, M_{OAZi}, M_{YAi}, M_{XDZi}, L_{i,i}, L_{i+1,i}, L_{i-1,i}, L_{BC,i} \rangle, \quad (3)$$

где M_{OAdi} , M_{OAZi} , M_{YAi} , M_{XDZi} – множества ОАД, ОАЗ, УА, ХДЗ i -го уровня, соответственно; $L_{i,i}$, $L_{i+1,i}$, $L_{i-1,i}$, $L_{BC,i}$ – множество связей

элементов ОАД, ОАЗ, УА, ХДЗ i -го уровня (ОАД, ОАЗ, УА, ХДЗ) между собой, с элементами $i+1$ -го уровня, с элементами $i-1$ -го уровня и с внешней средой, соответственно. В конкретных случаях отдельные множества, входящие в (3) могут отсутствовать или быть неизвестными. Так, нулевой уровень $УР_0$ ИКСУ, который представляет собой ОУ ИКСУ, может задаваться только множествами $L_{1,0}$, $L_{BC,0}$. Каждый последующий уровень ИКСУ ($i > 0$) представляет собой УУ системы управления i -го уровня, то есть $УУ_i = УР_i$. В нормализованной ленточной ИКСУ (НЛИКСУ) [2] систему управления i -го уровня определим как кортеж вида

$$СУ_i = \langle УУ_i, УР_{i-1} \rangle \quad (4)$$

НЛИКСУ в свою очередь задается как множество $M_{СУ}$ систем вида (4)

$$ИКСУ = M_{СУ_i}. \quad (5)$$

В такой системе для каждого $i > 0$ имеет место $L_{i-1,i}^i = L_{i+1,i}^{i-1}$, где верхние индексы задают номер уровня системы. В не ленточных ИКСУ, хотя бы для одного $i > 0$, мощность множества $L_{i-1,i}^i$ больше мощности множества $L_{i+1,i}^{i-1}$, что отражает тот факт, что объекты управления системы $СУ_i$ расположены на нескольких нижележащих уровнях системы.

Заключение

Таким образом, ИКСУ может быть описана как множество взаимодействующих систем управления, которые образуют многоуровневую структуру. При этом, вышележащие системы рассматривают системы, расположенные на нижних уровнях, как ОУ. Как правило, уровни управления наращиваются в процессе эксплуатации ИКСУ. Поэтому, важно обеспечить взаимодействие новых систем на этапе проектирования путем задания структурной избыточности элементов существующих систем, программной реализацией алгоритмов управления ОУ, процессов изменения структуры и параметров элементов УУ, расширения баз данных и знаний, которые, используются в процессе управления. Предложенные ТММ элементов и структур обеспечивают системность процесса расширения функциональных возможностей ИКСУ.

Предполагается, что примеры использования ТММ ИКСУ будут приведены в дальнейшем.

Уровни управления ИКСУ могут быть предметом стандартизации по аналогии со стандартами ISO в области взаимодействия открытых систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parr E.A. Programmable Controllers. An engineer's guide. Third edition. Oxford: Newness, 2003, 429 p.
2. Поляков М.А. Теоретико-множественная модель интегрированной контроллерной системы управления. // Системні технології.- 2009, №4, с.131-137.
3. Поляков М.А. Логическое управление объектами электрических систем в среде приложения человеко-машинного интерфейса. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2009. – № 9(158). – с.197-201с.
4. Поляков М.А., Ларионова Т.Ю. Модели систем и системные характеристики сложных электрических аппаратов. // Електротехніка і електромеханіка, 2010, №3. с. 28-31.
5. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем.- М.: «Наука», 1978.
6. Программное обеспечение моделирования непрерывно-дискретных систем./Под ред. В.М. Глушкова. М.: «Наука», 1975.
7. Harel D. Statecharts: a Visual Formalism for Complex Systems. Sci. Comput. prog.8, p.231-274, 1987.
8. Парийская Е.Ю. Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию и анализу непрерывно-дискретных систем Дифференциальные уравнения и процессы управления №1, 1997. Электронный журнал. <http://www.neva.ru>, с.92-120.
9. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. М., Физматиздат, 1962. – 476с.
10. Гома Х. UML проектирование систем реального времени, распределенных и параллельных приложений.- М.:ДМК, 2002, 704 с.

УДК 519+61:681.3

Ю.А. Прокопчук, А.С. Белецкий

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ И СУБОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ПРЕДЕЛЬНЫХ ОБОБЩЕНИЙ

В работе рассматривается специфика применения принципа предельных обобщений к технологическому аудиту и субоптимизации, в частности, металлургических процессов. Дано описание Банка тестов, с помощью которого формируется база прецедентов и контекст для построения моделей знаний.

*ПРИНЦИП ПРЕДЕЛЬНЫХ ОБОБЩЕНИЙ, СИНДРОМНЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ
МОДЕЛИ ЗНАНИЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ*

1. Введение

Оптимизация сложных технологических процессов невозможна без наличия математических моделей, обеспечивающих с приемлемой точностью решение задачи синтеза оптимального или субоптимального управления и реализации этого управления на существующих или модернизируемых для этих целей системах управления [1, 2].

Технологический аудит и субоптимизация на основе Принципа предельных обобщений (ППО) [3, 4, 5] позволяют решать, в частности, следующие практические задачи:

- получение новых системных знаний об изучаемом объекте;
- определение конкурирующих наборов управляемых входных параметров, которые минимально достаточны для обеспечения благоприятного течения процесса;
- анализ управляемости процесса (оценка возможностей существующей системы управления обеспечить в каждой реализации процесса заданное качество его функционирования);
- прогноз значений выходных параметров по известным значениям входных параметров, в частности, оперативная оценка значений выходных параметров, лабораторный анализ которых требует значительных затрат времени;
- синтез новых химических соединений и новых композиционных материалов (построение математических моделей

© Прокопчук Ю.А., Белецкий А.С., 2012

зависимости между строением определенного класса химических соединений и комплексом их потребительских свойств);

- определение требуемой точности измерения входных параметров.

Рекомендации, полученные в результате аудита и субоптимизации на основе ППО, могут включать:

- оптимизацию действующих технологических процессов по технологическим, экономическим и экологическим критериям или комплексам этих критериев;

- определение научно и технологически обоснованных требований к качеству сырья, при заданных требованиях к качеству функционирования конкретного технологического процесса;

- технологию обеспечения заданного качества функционирования процесса при существенных вариациях состава сырья;

- технологию обеспечения необходимой технологической гибкости, с целью получения продукта, удовлетворяющего индивидуальным требованиям различных заказчиков.

Модель технологического процесса строится на основе эмпирических данных. Каждая реализация процесса рассматривается как отдельный прецедент. Для построения модели все реализации технологического процесса разбивают на N классов: $Z = \{1, \dots, N\}$ – множество классов - заключений по комплексному показателю эффективности. В простейшем случае: $Z = \{1 - благоприятный; 2 - неблагоприятный\}$

2. Предельные синдромные и вероятностные модели знаний

Пусть $\{\tau\}$ - множество элементарных тестов, с помощью которых описываются все факторы, обстоятельства и явления, имеющие отношение к изучаемой действительности, например, технологическому процессу. Элементарность теста означает, что результат теста представим в виде: «тест = значение». Конкретный результат теста τ будем обозначать через $\underline{\tau}$. Результаты тестов могут выбираться (формироваться) из разных доменов (множеств значений со связями), которые образуют оргграф доменов $G(\tau) = \{T \rightarrow T'\}_\tau$. Для фиксации того, что в качестве множества результатов теста τ используется домен T , будем использовать нотацию: τ / T . Используя разные домены, можно управлять общностью (масштабом)

результата одного и того же теста. В совокупности орграфы доменов образуют Банк тестов. Различные комбинации доменов для всех тестов определяют различные уровни общности описания прецедентов [3]. Пример орграфа доменов или конфигуратора $G(z) = \{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3\}$:

Эффективность \hat{z} {

3 {Низкая $\hat{1}$ 2; Средняя $\hat{3}$ 4; Высокая $\hat{5}$ 6}

2 {Очень низкая $\hat{1}$ [0; p1]; Низкая $\hat{2}$ (p1; p2); Ниже среднего $\hat{3}$ (p2; p3); Средняя $\hat{4}$ (p3; p4); Высокая $\hat{5}$ (p4; p5); Очень высокая $\hat{6}$ (p5; 1)}

1 {{0; 1}}.

Для решения целевой задачи формируется база прецедентов с известными исходами $\Omega(Z) = \{\alpha(\{\underline{\tau} / T\}, \underline{z} / Z)\}$, где $Z = \{1, \dots, N\}$ – множество заключений. Без ограничения общности положим, что каждый тест входит в описание прецедента один раз. Кортеж $\langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$ образует контекст целевой Z -задачи, которая может быть связана с диагностикой, прогнозированием или управлением.

Под *формальным синдромом* (или просто *синдромом*) контекста $\langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$ понимается неизбыточная совокупность значений тестов, позволяющая однозначно установить заключение:

$$S = (\{\underline{\tau} / T\} \rightarrow \underline{z} / Z). \quad (1)$$

С каждым синдромом S связано «облако» *предельных синдромов* $\{S^*\}$, которое получается путем всех допустимых обобщений в рамках $\{G(\tau)\}$. Предельный синдром S^* является предельным в трех смыслах: его нельзя усилить, т.е. повысить ранг; его нельзя редуцировать и его нельзя обобщить ни по одному входящему тесту.

Совокупность синдромов $\{S\}$ образует *синдромную модель знаний контекста* $\langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$, если она позволяет определить заключение, как минимум, для любой ситуации действительности из $\Omega(\{\underline{\tau} / T_0\})$ – априорного описания [5]. Синдромная модель знаний *минимальна*, если из нее нельзя удалить ни один синдром без потери полноты охвата прецедентов из $\Omega(\{\underline{\tau} / T_0\})$. Для любой синдромной модели знаний $\{S\}$ можно построить *сопряженную предельную модель* $\{S^*\}$. Можно также найти все предельные синдромы на всех уровнях общности для каждой ситуации $\alpha \in \Omega(Z)$. Их объединение представляет собой *полную предельную синдромную модель знаний* в рамках контекста $\langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$, которую обозначим $\{S^*\}_{Full}$. На

основе $\{S^*\}_{Full}$ могут быть построены (абсолютно) минимальные предельные синдромные модели знаний $\{S^*\}_{Min}$. Модель $\{S^*\}_{Full}$ доминирует все другие модели. Можно найти все $\{S^*\}_{Min}$, которые эквивалентны $\{S^*\}_{Full}$.

Помимо синдромов речь также может идти о вероятностных закономерностях $\{R\}$ и сопряженных предельных вероятностных закономерностях $\{R^*\}$, которые являются ранними предвестниками событий, например, неблагоприятного течения процесса [5]. *Вероятностной закономерностью* появления заключения \underline{z} / Z назовем правило вида

$$R = (\{\underline{\tau} / T\} \rightarrow J_z \underline{z} / Z), p(R) \geq p^*, v_R = v(R), \quad (2)$$

где $\{\underline{\tau} / T\}$ – избыточная совокупность значений тестов; J_z и $p(R)$ – ранг или вероятность получения заключения \underline{z} / Z при условии $\{\underline{\tau} / T\}$; p^* – порог (например, 0.9); v_R – вес правила, пропорциональный количеству прецедентов с заключением \underline{z} / Z , отвечающих правилу R . Вероятностную закономерность нельзя редуцировать с сохранением ранга. Для веса v_R , как и для любого теста, существует орграф доменов $G(v_R)$. Синонимами вероятностной закономерности можно считать *ассоциативное правило* (обобщение импликаций, когда допускается некоторая доля исключений) и *предвестник*.

Контекст задачи должен быть таким, чтобы некоторые из предельных синдромов можно было отнести к *параметрам порядка* благоприятного и неблагоприятного течения изучаемого процесса. В таком случае предельная синдромная модель знаний будет содержать конкурентные наборы параметров порядка, а управление технологическим процессом и технологический аудит заключаются в синдромной диагностике и задании целевых синдромов (параметров порядка), отвечающих благоприятному режиму (выходу на этот режим и его стабилизации). При этом желательно нейтрализовать предвестники развития неблагоприятного режима, которые содержатся в предельной вероятностной модели знаний. Такой подход реализует синдромный принцип управления сложными процессами любой природы [4].

3. Применение ППО в технологическом аудите и субоптимизации

Предельные синдромные и вероятностные модели знаний в сочетании с Банком тестов собственно и являются математической моделью технологического процесса. Для построения конфигураторов тестов и моделей знаний исходная информация представляется в виде 3-х таблиц.

Первая таблица содержит перечень входных параметров, информацию об их минимальных и максимальных значениях, регламентных значениях и единицах измерения. Управляемые переменные необходимо отметить, например символом "*". Данная таблица позволяет в автоматическом режиме сформировать конфигураторы входных параметров или Банк тестов $\{G(\tau)\}$. Схемы конфигураторов могут быть разные. Приведем несколько простых схем.

Схема 1. Обозначим регламентный (или рекомендуемый) интервал значений X_i через $[p_1, p_2]$.

$X_i \in \{ \text{Ниже нормы } ^1 [X_{\min}; p_1]; \text{ Норма } ^2 [p_1, p_2]; \text{ Выше нормы } ^3 (p_2; X_{\max}] \} \cup \{ [X_{\min}; X_{\max}] \}$.

Схема 2. Разобьем регламентный интервал значений X_i на две части, а именно: $[p_1, p_2] = [p_1, q] \cup (q, p_2]$. Конфигуратор представим в виде:

$X_i \in \{ \text{Ниже нормы } ^a; \text{ Норма } ^b [p_1, q]; \text{ Норма } ^c (q, p_2]; \text{ Выше нормы } ^d (p_2; X_{\max}] \} \cup \{ [X_{\min}; X_{\max}] \}$.

Схема 3. Примем интервал $[X_{\min}; X_{\max}]$ за 100% и разобьем его на 5 частей. Получим следующий конфигуратор:

$X_i \in \{ \text{Small } ^1; \text{ Not Small } ^3 \} \cup \{ \text{Medium } ^3; \text{ Not Medium } ^1 \} \cup \{ \text{Large } ^4; \text{ Not Large } ^1 \} \cup \{ \text{Small } ^1; \text{ Medium } ^3; \text{ Large } ^4 \} \cup \{ \text{Very small } ^1 [0; 15]; \text{ Small } ^2 (15; 40]; \text{ Medium } ^3 (40; 60]; \text{ Large } ^4 (60; 85]; \text{ Vary large } ^5 (85; 100] \} \cup \{ [0; 100] \}$.

Во всех приведенных схемах домен «1» является базовым (наиболее точным).

Вторая таблица содержит информацию о перечне выходных показателей, единицах их измерения и допустимых значениях. Данные таблицы служат для определения интегрального показателя качества процесса (или эффективности) z . Одна из схем конфигуратора для z приведена выше.

Третья таблица содержит информацию о значениях входных и выходных переменных в m реализациях изучаемого процесса. Каждая переменная описывается с помощью базовых доменов: $X_i / 1$. Третья таблица является, по-сути, базой прецедентов $\Omega(Z)$. Таким образом, построен контекст задачи $\langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$. На основе контекста строятся предельные модели знаний.

4. Выводы

Предельные синдромные модели знаний позволяют определить перечень конкурентных наборов управляемых параметров (параметров порядка), которые минимально достаточны для решения целевой задачи. На основе минимальных предельных моделей знаний проводят оценку возможностей существующей системы управления обеспечить в каждой реализации технологического процесса заданное качество его работы; определяют нормы технологического режима по всем входным параметрам, обеспечивающим снижение себестоимости выпускаемой продукции при условии соблюдения требований по качеству, выбросам вредных веществ в окружающую среду и другим ограничениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химико-технологические системы. Синтез, оптимизация и управление. Под ред. И.П. Мухлёнова. - Л.: Химия, 1986. - 416 с.
2. Давиденко А.М., Кац М.Д. Новые методы изучения действующих производств и их возможности // Восточно – Европейский журнал передовых технологий, 6 (12), 2004. - С. 189 – 193.
3. Прокопчук Ю.А. Методология разработки интеллектуальных приложений на основе принципа предельных обобщений // Вестник Херсонского НТУ, 2011. - №2(41). – С. 32 – 43.
4. Прокопчук Ю.А. Когнитивное моделирование на основе принципа предельных обобщений: методология, задачи, приложения // Искусственный интеллект, 2011. - №3.- С. 82 – 93.
5. Прокопчук Ю.А. Предельные синдромные и вероятностные модели знаний // Научный вестник Херсонской государственной морской академии, 2011. - №2(5). – С. 322 – 333.

УДК 519.2:658.8

Л.Д. Чумаков

ОЦЕНКА ГАРАНТИЙНОГО СРОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

*Обсуждаются вопросы оценки величины гарантийного срока эксплуатации для технического устройства на этапе его разработки.
ГАРАНТИЙНЫЙ СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ, ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИБЫЛИ, УЧЕТ
ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.*

Введение

Покупатель всегда предпочитает приобрести товар с более высоким уровнем качества, чем другие аналогичные товары. Способы оценки этого уровня различны: информация, полученная от других покупателей, известность того или иного производителя, некоторые характеристики товара.

Одной из таких характеристик является гарантийный срок – отрезок времени, в течение которого производитель обязуется заменить товар без дополнительной оплаты, если он не соответствует заявленному уровню качества. Обязательства по замене или ремонту закреплены законодательно [1].

Чем больше гарантийный срок, тем выше, очевидно, уровень качества.

Так как гарантийные обязательства в течение гарантийного срока эксплуатации технического устройства несут, прежде всего, производители товаров, то вопрос о его величине должен быть рассмотрен еще на этапе разработки технического устройства. При этом необходимо учесть некоторые эксплуатационные характеристики устройства.

Для оценки величины гарантийного срока необходимо исследовать особенности рынка, определение цены, объема выпуска товара предприятием и др.

Анализ публикаций по теме исследования

Основная масса публикаций по данной теме касается вопросов информации об установленных величинах гарантийного срока для различных изделий, без объяснения, почему выбрана именно эта величина, а также о правилах обращения в сервисные центры или предприятия торговли [2-7].

В работе [8] затрагиваются вопросы учета надежности при оценке стоимости гарантийного и послегарантийного обслуживания технических систем безопасности, но не содержится количественных оценок.

В работе [9] приведена разработанная автором методика определения величины гарантийного срока товаров. Критерием оптимальности выбора является достижение максимальной валовой прибыли с учетом осуществления гарантийного обслуживания. При этом учет характеристик надежности продекларирован, но не раскрыт. Методика применялась при оптимизации величины гарантийного срока холодильников.

Цель статьи

Цель статьи – рассмотреть один из способов оценки величины гарантийного срока технического устройства на стадии его разработки.

Основная часть

Будем оценивать оптимальную величину гарантийного срока технического устройства по критерию максимума прибыли от его продажи.

Прибыль (Π) при продаже в соответствии с маржинальным подходом [10] зависит от цены \mathcal{C} , постоянных $S_{\text{пост}}$ и переменных $S_{\text{пер}}$ затрат:

$$\mathcal{C} = S_{\text{пост}} + S_{\text{пер}} + \Pi \quad (1)$$

Маржинальная прибыль ($M\Pi$) используется для определения цены товара:

$$M\Pi = \mathcal{C} - S_{\text{пер}} \quad (2)$$

или

$$M\Pi = S_{\text{пост}} + \Pi. \quad (3)$$

Для определения цены нужно исследовать эластичность товара по цене. Один из классических вариантов – это эластичный спрос, когда он растет при снижении цен.

Предположим, что зависимость продаж от уровня цены можно представить в следующем виде:

$$C = kN_{\Pi}^{-\frac{1}{c}}, \quad (4)$$

где k и c – коэффициенты, N_{Π} – количество устройств, которые можно продать по такой цене.

Валовый доход (ВД) можно определить с использованием выражения (4) по формуле:

$$ВД = \frac{C^{\frac{c-1}{c}}}{k^{\frac{1}{c}}}, \quad (5)$$

Для оценки валового дохода нужно определить цену безубыточности:

$$C = \frac{ТБУ}{N}, \quad (6)$$

где ТБУ – точка безубыточности, N – объем производства.

Точка безубыточности определяется по формуле:

$$ТБУ = \frac{S_{\text{пост}}}{k_{\Pi}}, \quad (7)$$

где k_{Π} – коэффициент покрытия (доля маржинальной прибыли в валовом доходе):

$$k_{\Pi} = \frac{МП}{ВД}. \quad (7)$$

Как правило, в процессе эксплуатации появляются образцы, уровень качества которых не соответствует заявленному. Для привлечения покупателей вводится так называемый гарантийный срок, в течение которого произошедшие при эксплуатации отклонения уровня качества компенсируются покупателю бесплатно путем замены устройства или его ремонта.

Это снижает валовый доход. Определяя при разработке технического устройства характеристики его безотказности, можно оценить число изданий, которые поступят на гарантийное обслуживание.

Это число можно определить по формуле:

$$N_{нк} = N_{\Pi} q(t_{Г}), \quad (8)$$

где $q(t_{Г})$ – вероятность отклонения от заявленного уровня качества изделия в течение гарантийного срока.

Обычно при разработке и изготовлении технических устройств возникают недоработки конструктивного и производственного характера, которые проявляются при эксплуатации. Этот отрезок периода эксплуатации называют отрезком приработки. Затем следуют отрезки нормальной эксплуатации и износа или старения. Вероятности появления неисправностей на каждом отрезке можно описать распределением Вейбулла:

$$q(t) = 1 - e^{-at^b}. \quad (9)$$

С учетом возврата некачественных устройств величину валового дохода можно определить по формуле:

$$ВД = \frac{Ц^{\frac{c-1}{c}}}{k^{\frac{1}{c}}} - s_{Г} N_{нк}(t_{Г}), \quad (10)$$

где $s_{Г}$ – стоимость гарантийного обслуживания одного устройства.

Задача оптимизации формулируется следующим образом: найти значение $t_{Г}^*$ из множества $\{t_{Г}\}$, доставляющее максимум валового дохода.

Пример.

Для определения спроса на продукцию воспользуемся зависимостью объема продаж (тыс. штук) от уровня цен (руб.) из работы [10]. Для нее $k = 3801,6$ и $c = 0,735$. Примем также $S_{\text{пост}} = 1100000$ руб., доля переменных затрат, приходящихся на одно устройство, равна 60 руб.

Будем считать, что период приработки устройства еще не закончился, и распределение Вейбулла имеет следующие значения параметров: $a = 0,093$, $b = 0,8$.

Для этих исходных данных были проведены расчеты при $t_{Г1} = 1$ год, $t_{Г2} = 1,5$ года и $t_{Г3} = 2$ года (рис.1 и рис.2).

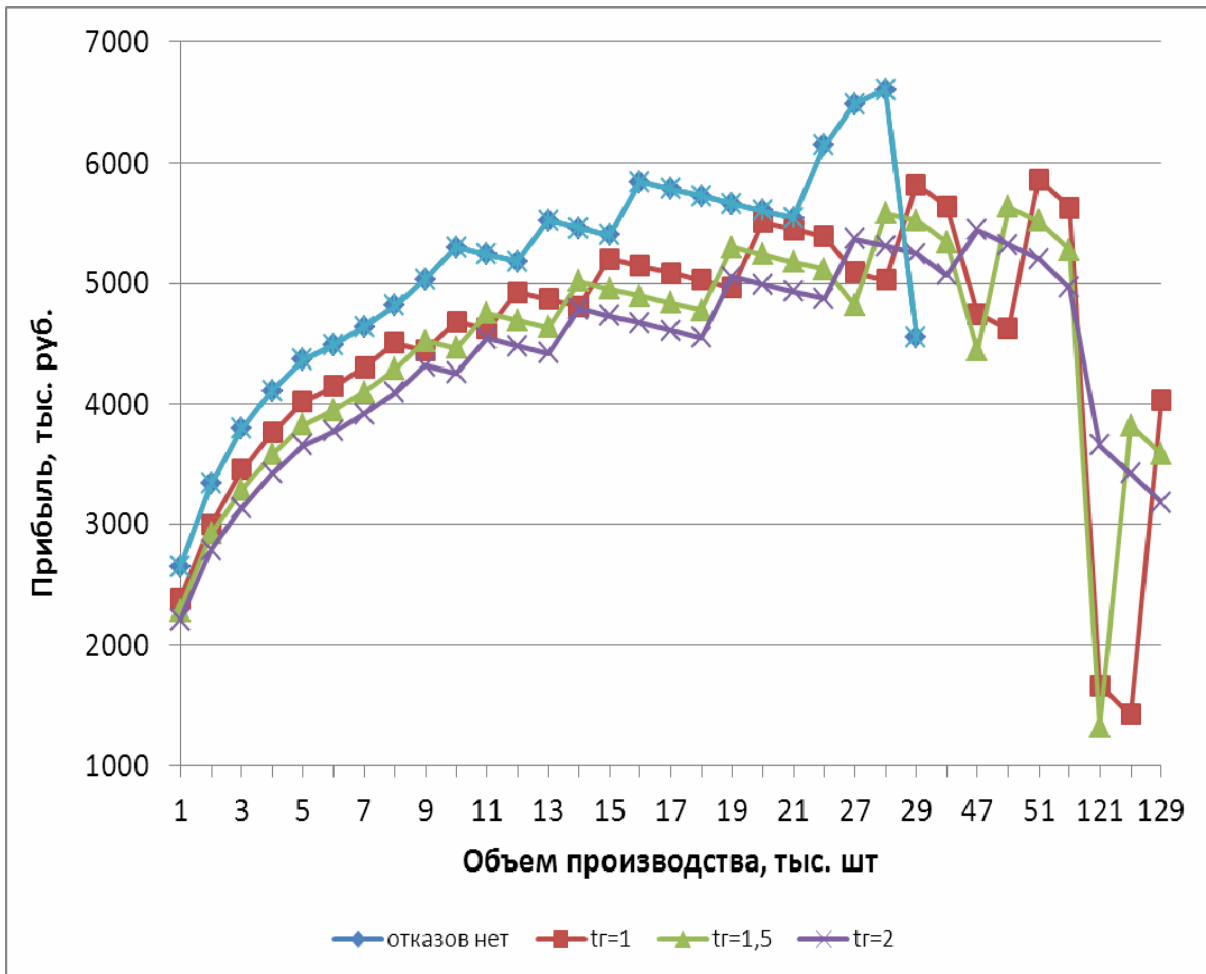


Рис. 1. Зависимость прибыли от объема производства

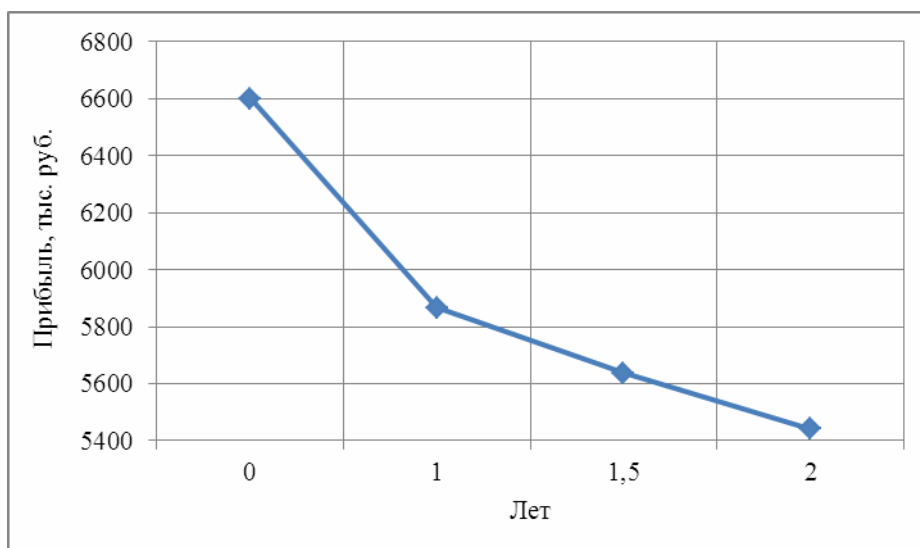


Рис. 2. Зависимость прибыли от величины гарантийного срока

Так как устройств с идеальным качеством нет по условию задачи, наибольшую прибыль можно получить при $t_{r1} = 1$. При этом

нужно выпустить 51 тыс. устройств и продавать их по цене 200 руб. за одно устройство.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Методика удобна тем, что при выборе оптимальной величины гарантийного срока определяются также цена на изделие, объем выпуска продукции, затраты на гарантийное обслуживание. Совершенствуя процессы разработки и производства, изменяя тем самым постоянные, переменные затраты, уровень качества выпускаемого товара, можно оценить повышение прибыли.

В перспективе предполагается проводить работу по уточнению влияния характеристик надежности технических устройств, планов их испытаний для оценки параметров распределений, величин доверительных интервалов на величину прибыли от продажи технических устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Украины О защите прав потребителей от 12 мая 1991 года № 1023-XII [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://zakoni.com.ua/node/935>, свободный – Загл. с экрана.
2. Гарантийное обслуживание ноутбуков [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://rix.com.ua/reviews/441/404/755.html>, свободный – Загл. с экрана.
3. Система сервисной поддержки DELL в России [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.dell.ua/services>, свободный – Загл. с экрана.
4. Установлены новые сроки гарантии ACER [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.wescom.kharkov.ua/articles/55-ustanovleny-novye-sroki-garantii-acer>, свободный – Загл. с экрана.
5. Изменение правил гарантийного обслуживания техники Whirlpool в Украине [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.wescom.kharkov.ua/articles/50-izmenenie-pravil-garantijnogo-obsluzhivaniya-texniki-whirlpool-v-ukraine>, свободный – Загл. с экрана.
6. Практика организации компанией CANON сервисного обслуживания через АСЦ [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.wescom.kharkov.ua/articles/48-praktika-organizaczii-kompaniej-canon-servisnogo-obsluzhivaniya-cherez-ascz>, свободный – Загл. с экрана.
7. Сроки гарантийного периода и бесплатного сервисного обслуживания продукции фирмы LG [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.wescom.kharkov.ua/articles/30-sroki-garantijnogo-perioda-i-besplatnogo-servisnogo-obsluzhivaniya-produkczii-firmy-lg>, свободный – Загл. с экрана.

8. Омелянчук А. Расчет стоимости гарантийного и послегарантийного обслуживания технических систем безопасности [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://penates.net.ua/raschet-stoimosti-garantiynogo-i-poslegarantiynogo-obsluzhivaniya-tehnicheskikh-sistem-bezopasnosti>, свободный – Загл. с экрана.
9. Письменный А. Методика определения величины гарантийного срока товаров длительного пользования [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : http://www.library.dgtu.donetsk.ua/fem/vip32/32_30.pdf, свободный – Загл. с экрана.
10. Практика формирования цен на продукцию, товары, услуги. Журнал «Справочник экономиста», № 2-3, 2011 [Электронный ресурс] – Электрон. данные – Режим доступа : <http://www.marketing.spb.ru/lib-mm/pricing/inflatio.htm>, свободный – Загл. с экрана.

УДК 620.179.16

С.А. Бабичев, И.Ф. Погребняк, А.В. Шарко

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
СЕТИ БАЙЕСА И СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО
ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ**

Разработана модель нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов при использовании методов неразрушающего контроля, основанная на комплексном использовании сети Байеса и системы нечеткого логического вывода. Представлена база знаний, на основании которой произведена настройка нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов.

Актуальность темы определяется необходимостью разработки мероприятий по повышению точности определения прочностных характеристик металлов в процессе их изготовления и эксплуатации методами неразрушающих испытаний. На точность измерений при использовании того или иного метода оказывают влияние различные размерные и технологические факторы. С ростом быстродействия компьютеров и созданием новых современных компьютерных технологий обработки информации появляется возможность создания системы обработки информации, учитывающей степень влияния того или иного фактора на точность измерения физических характеристик, обработка данных в которой осуществляется в режиме реального времени.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме [1-5] показывает, что, несмотря на очевидные успехи, достигнутые в данной предметной области, проблема комплексного использования различных методов в системе технической диагностики прочностных характеристик металлов в настоящее время не имеет однозначного решения, поскольку остаётся открытым вопрос оценки коэффициентов значимости отдельных методов в системах технической диагностики прочностных характеристик металлов, поэтому тема статьи является актуальной.

© Бабичев С.А., Погребняк И.Ф., Шарко А.В., 2012

Целью статьи является разработка модели определения прочностных характеристик металлов при комплексном использовании акустического, электромагнитного и безобразцового методов неразрушающего контроля, обработка информации в которой осуществляется при помощи байесовской сети и системы нечеткого логического вывода.

Изложение основного материала. На точность определения прочностных характеристик оказывают влияние различные факторы, определяющие погрешность измерения.

Степень влияния факторов различна. Предлагается комплексный учет их влияния, в основу которого положена следующая последовательность мероприятий:

- оценка степени влияния факторов на точность определения выбранным методом неразрушающего контроля при помощи сети Байеса;

- определение коэффициента значимости того или иного фактора;

- определение коэффициентов значимости используемых методов неразрушающего контроля в системе технической диагностики;

- построение нечеткой системы, в которой входными параметрами являются физические характеристики методов неразрушающего контроля, а выходным параметром – прочностные свойства металла.

Теория построения сетей Байеса основывается на предположении, что события являются исчерпывающими и не пересекаются. В этом случае вероятность события E можно вычислить при помощи условных вероятностей:

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i). \quad (1)$$

Вероятность пересечения событий E и H можно выразить следующим образом:

$$p(E \cap H_k) = p(E | H_k) \cdot p(H_k) = p(H_k | E) \cdot p(E), \quad (2)$$

откуда получаем:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{p(E)}. \quad (3)$$

С учетом (1) формулу (3) можно представить так:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i)}. \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов, определяющих значимость факторов рассчитывались вероятности входных факторов при априори заданной вероятности выходной переменной, и определялся коэффициент максимального изменения вероятностей i -го параметра:

$$k_i = \frac{P_{i \max} - P_{i \min}}{\sum P}, \quad (5)$$

где $\sum P$ - сумма значений вероятностей значений i -го фактора при различных априори заданных значениях выходной переменной.

При помощи данного коэффициента осуществлялась подстройка области определения функций принадлежности нечетких множеств в системе нечеткого логического вывода.

Системы нечеткого логического вывода преобразуют значения входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил.

Для формирования базы правил необходимо:

– определить множество входных переменных: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

– определить множество выходных переменных:

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$;

– сформировать базовое терм-множество с соответствующими функциями принадлежности каждого терма: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$;

– сформировать конечное множество нечетких правил, согласованных относительно используемых в них переменных:

$$\bigcup_{k=1}^m \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^k), \text{ при } \omega_k \right] \rightarrow D = d_k, \quad (6)$$

где $k = \overline{1, m}$ – количество логических высказываний, $i = \overline{1, n}$ – число используемых термов.

Функция принадлежности может иметь различную интерпретацию, в том числе, на основе вероятности, где множество Q описывается интервалом (γ_1, γ_2) : если объект $x > \gamma_1$ и $x < \gamma_2$, то $x \in Q$. Если γ_1 и γ_2 - случайные величины, то Q является нечетким множеством, т.к. имеются объекты, относительно которых нельзя однозначно утверждать, принадлежат ли они множеству Q . При

вероятностной интерпретации функции принадлежности $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(x \in Q)$. С учетом введенных обозначений $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(\gamma_1 < x < \gamma_2)$. При независимости случайных величин γ_1 и γ_2 имеем $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(x > \gamma_1)P(x < \gamma_2)$. Пусть $f_1(\gamma_1)$ и $f_2(\gamma_2)$ - функции плотности вероятности для нижнего и верхнего порогов величин γ_1 и γ_2 соответственно. Обозначив $\int_{-\infty}^x f_1(\gamma) d\gamma$ через $F_1(x)$, а $\int_{-\infty}^x f_2(\gamma) d\gamma$ через $F_2(x)$, где $F_1(x) = P(\gamma_1 < x)$, имеем $\mu_{\hat{Q}}(x) = F_1(x)[1 - F_2(x)]$. Таким образом, определять функцию принадлежности можно не только с помощью процедур непосредственного опроса экспертов, но и на основе функции распределения $F_1(x)$ и $F_2(x)$ (рис. 1).

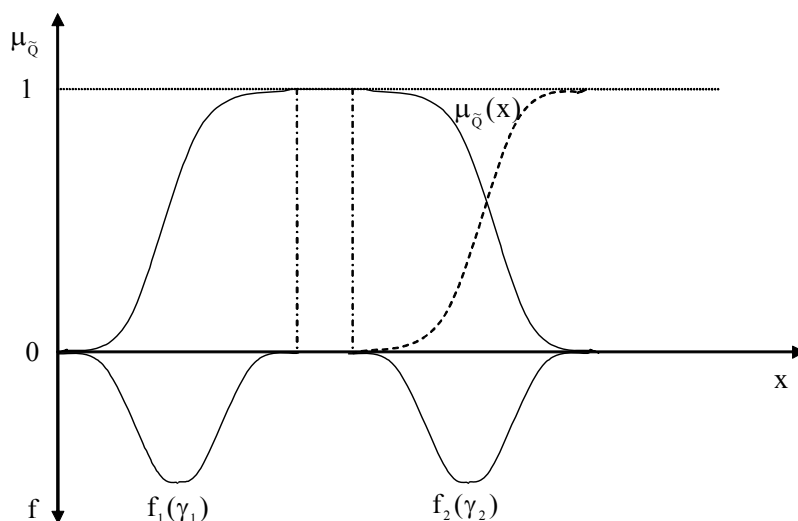


Рис.1. Процедура построения функции принадлежности путем представления от плотности вероятности

В процессе проведения исследований использовались акустический метод, основанный на анализе скорости ультразвука, электромагнитный, основанный на анализе коэрцитивной силы и безобразцовый, основанный на установлении корреляционной зависимости между отпечатком индентора (пирамиды Виккерса, Роквелла, Бринеля) и прочностными свойствами. Рассмотрены следующие факторы:

- S – аппаратная погрешность;
- КР – конфигурация поверхности;
- Q – добротность колебательной системы;
- HS – химический состав контролируемого изделия;
- Тз – температура закалки;

- T_0 – температура отпуска.
- PM – погрешность метода.

Аппаратурная погрешность определялась по независимым измерениям на одном и том же образце. Расчеты показали, что относительное изменение скорости ультразвука составило $\frac{\Delta C}{C} = 0,09\%$, относительное изменение коэрцитивной силы $\frac{\Delta Hc}{Hc} = 0,18\%$, относительное изменение твердости $\frac{\Delta HB}{HB} = 0,45\%$.

На начальном этапе установлен диапазон изменения того или иного параметра, дана оценка чувствительности метода к исследуемому фактору, после чего заданный диапазон был разбит на соответствующие поддиапазоны

Аналогичным образом производилась дискретизация диапазонов изменений качества обработки поверхности контроля KP , добротности Q , химического состава HS , температуры закалки T_3 , температуры отпуска T_0 и погрешности метода PM , связанные с необходимостью проведения большого количества измерений с целью минимизации влияния структуры на точность измерений.

Для построения структуры связей байесовской сети был построен граф взаимного влияния размерных и технологических факторов и измеряемых физических характеристик (рис. 2).

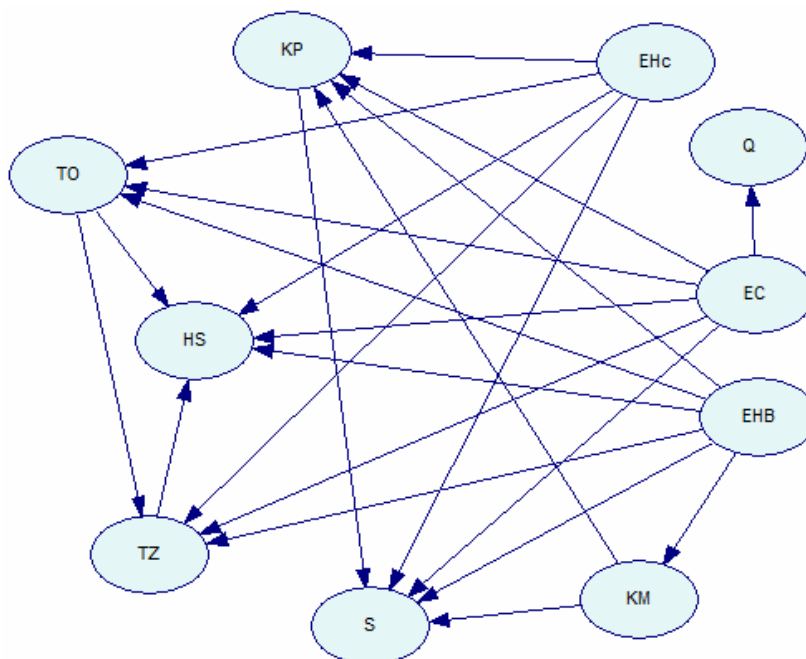


Рис. 2. Структура связей сети Байеса

Распределение вероятностей сопутствующих факторов при крайних значениях изменения скорости ультразвука (ЕС), коэрцитивной силы (ЕНс) и твердости (ЕНВ) представлено в таблицах 1,2 и 3.

Таблица 1

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение скорости ультразвука

	ЕС = 0% - 0,30%						ЕС = 1,21% - 1,50%					
	S	Q	КР	HS	ТЗ	ТО	S	Q	КР	HS	ТЗ	ТО
N	10	1	18	88	87	88	1	98	98	67	1	1
S	17	1	18	10	10	9	1	1	1	23	1	2
V	73	98	64	2	3	3	99	1	1	10	98	97

Таблица 2

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение коэрцитивной силы

	ЕНс = 0% - 0,50%					ЕНс = 3,00% - 3,50%				
	S	КР	HS	ТЗ	ТО	S	КР	HS	ТЗ	ТО
N	15	32	98	74	77	6	47	1	29	23
S	24	12	1	4	6	10	15	1	7	8
V	61	56	1	22	17	84	38	98	64	69

Таблица 3

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение твердости

	ЕНВ = 0% - 0,8%						ЕНВ = 4% - 4,6%					
	S	КР	HS	ТЗ	ТО	КМ	S	КР	HS	ТЗ	ТО	КМ
N	7	1	67	97	96	8	28	96	33	1	1	92
S	12	2	12	1	2	4	33	2	13	1	2	3
V	81	97	21	2	2	88	39	2	54	98	97	5

Среднее значение коэффициентов максимального изменения вероятности влияния соответствующего параметра на измеряемую физическую характеристику рассчитывалось по формуле (5).

Среднее значение коэффициентов, определяющих чувствительность используемого метода к варьированию влияющих факторов следующее:

- для акустического метода $k_1 = 0,65$.
- для электромагнитного метода $k_2 = 0,45$.
- для безобразцового метода $k_3 = 0,73$.

Полученные коэффициенты использованы в качестве подстроечных в системе нечеткого логического вывода при определении прочностных характеристик металла.

Построение нечеткой модели оценивания прочностных характеристик металла осуществлялось при помощи пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB. В процессе настройки системы использовались для входных параметров гауссовы функции принадлежности нечетких множеств.

Для выходных параметров использовались треугольные функции принадлежности нечетких множеств.

Для перехода от нечеткой базы знаний к системе нечетких логических уравнений введём следующие обозначения: $\mu^{a_i^k}(x_i)$ – функция принадлежности переменной x_i к лингвистическому терму a_i^k , где $i = 1, \dots, n$ – количество используемых термов, $k = 1, \dots, m$ – количество используемых правил; $\mu^{d_k}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функция принадлежности вектора параметров (x_1, x_2, \dots, x_n) к выходной переменной d_k . Формализация входных параметров и выходной характеристики в лингвистические переменные представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Формализация входных параметров и выходной характеристики в лингвистические переменные

Входные параметры и выходная характеристика	Границы изменения	Термы лингвистической оценки
$\Delta C / C, \%$	0-2	0-0,5 – «Н»(низкий), 0,6-1,4 – «С»(средний), 1,5-2 – «В»(высокий)
$\Delta H_c / H_c, \%$	0-4	0-1,2 – «Н»(низкий), 1,3-2,7 – «С»(средний), 2,8-4 – «В»(высокий)
$\Delta H_B / H_B, \%$	0-5	0-1,5 – «Н»(низкий), 1,6-3,4 – «С»(средний), 3,5-5 – «В»(высокий)
$\sigma_B, \text{МПа}$	900-1650	900-1050 – «ОН»(очень низкий), 1051-1200 – «Н»(низкий), 1201-1350 – «С»(средний), 1351-1500 – «В»(высокий), 1501-1650 – «ОВ»(очень высокий)

Используя операции \wedge (min) и \vee (max), получены нечеткие логические уравнения, связывающие функции принадлежности входных и выходных переменных.

Результаты работы системы при варьировании входных параметров представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты работы нечеткой системы
определения прочностных характеристик металлов

№	$\Delta C/C, \%$	$\Delta H_c/H_c, \%$	$\Delta HB/HB, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$
1	0,2	0,4	0,5	1570
2	0,6	1,2	1,5	1380
3	1,0	2,0	2,5	1260
4	1,4	2,8	3,5	1170
5	1,8	3,6	4,5	975
6	0,2	3,6	4,5	1200
7	1,8	0,4	1,5	1280
8	0,2	0,4	3,5	1350
9	1,5	3,5	4	1130
10	1,5	3,5	1,5	1200

В результате последующих разрывных испытаний исследуемых образцов доказано, что комплексное использование различных методов понижает чувствительность системы к ошибке одного из методов.

Выводы. Разработана модель нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов, основанная на комплексном использовании сети Байеса и системы нечеткого логического вывода. Разработана база данных, на основании которой определяется структура взаимосвязей сети Байеса и априорное вычисление вероятностей значений взаимодействующих факторов. Получены вероятностные характеристики определяющих факторов, позволяющие предсказать характер влияния каждого фактора. Рассчитаны коэффициенты чувствительности соответствующего метода, которые использовались для корректировки области определения функций принадлежности в системе нечеткого логического вывода при определении прочностных характеристик металлов. Доказано, что комплексное использование различных методов понижает чувствительность системы к ошибке одного из методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпаш М.О., Кісіль І.С., Карпаш О.М., Молодецький І.А. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2006.- №2.- С. 49 – 52.

2. Варфоломеев А.Ю., Микулович А.В., Микулович В.И., Шнитко В.Т. Автоматизированная система диагностики промышленного оборудования // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2006.- №4.- С. 8 – 14.
3. Бабичев С.А. Разработка автоматизированной системы технической диагностики прочностных характеристик металлов // Вестник Херсонского государственного технического университета.- 2003.- №18.- С. 154–162.
4. Бабичев С.А., Литвиненко В.И., Шарко А.В. Автоматизированная система технической диагностики прочностных характеристик металлов на основе гибридных нейронных сетей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2004.- №4.- С. 5 – 10.
5. Лебедев А.А., Левитан Л.Я., Шарко А.В. Оценка влияния химического состава на результаты измерений механических свойств стали 40Х акустическим методом // М.: Дефектоскопия.- 1979.- №3.- С. 107-109.

ПРИМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ В КАЧЕСТВЕ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены специфические особенности применений временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах на уровнях оцифровки при замерах физических величин, сопряженной регистрации временных зависимостей двух и более диагностируемых параметров, диагностики функций распределений по параметрам, связанных с скоростями счета событий. ВРЕМЕННОЙ ИНТЕРВАЛ, ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, СОПРЯЖЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ, ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, СКОРОСТЬ СЧЕТА.

Введение и анализ публикаций

Развитие науки и техники неразрывно связано с нарастанием требований к методам и средствам измерений. Современные средства измерительной техники создаются преимущественно в виде многоканальных информационно-измерительных систем специализированных программно-аппаратных комплексов [1, 2]. Развитие таких систем происходит в основном за счет наращивания возможностей аппаратного и программного обеспечения.

Время среди физических величин уникально наибольшей точностью его измерения (относительная погрешность до 10^{-15} [1]). Повышение точности измерений остальных физических величин уже сегодня практически не может быть достигнуто путем применения классических измерительных каналов. Ведь в условиях слабых изменений сигналов сенсоров самые совершенные 24-разрядные сигма-дельта АЦП, нуждающиеся в прецизионных источниках питания и усилителях, способны обеспечить разрешающую способность не выше 18–21,5 бит. В то же время, например, значительно более простые в эксплуатации микросхемы время-цифровых преобразователей (TDC) фирмы Asam mess electronic GmbH обеспечивают измерение длительности импульсов с точностью до 14

пикосекунд, что в диапазоне измерений отвечает разрешающей способности в 30 бит [1].

Концепция применения временных интервалов в качестве универсальной измерительной величины при выполнении процедур измерения значений других физических величин [1] предоставляет потенциальные возможности для качественного скачка в улучшении функциональных характеристик информационно-измерительных систем. Она охватывает превращение информационного сигнала сенсоров о значении измеряемых физических величин в временные интервалы с последующим измерением этих интервалов и преобразованием полученного результата в единицы измеряемой физической величины.

В связи с этой концепцией актуализируется весь спектр применений временных интервалов в информационно-измерительных системах специализированных программно-аппаратных комплексов. Такой подход позволит объединить значительное количество отдельных теоретических и практических решений в области теории и техники измерений с одной стороны, а, с другой стороны, решит проблему разработки теоретической базы для развития унифицированных компьютеризированных программно-аппаратных комплексов, построенных на основе применения временной формы представления измерительной информации [1].

Постановка задачи

Рассмотреть в связи с концепцией применения временных интервалов в качестве универсальной измерительной величины в информационно-измерительных системах их применения для диагностики функций распределений по параметрам, определяемых по скоростям счета регистрируемых событий, и для сопряженной регистрации временных зависимостей нескольких диагностируемых параметров.

Основная часть

Применение временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах при диагностике функций распределений по параметрам, определяемых по скоростям счета регистрируемых событий, рассмотрим на примере

лазерной теневой диагностики дисперсной фазы высокоэнергетического двухфазного потока [3].

Одним из основных узлов спектрометров частиц лазерных теневых анализаторов [3, 4] являются счетчики импульсов, регистрирующие количество N сигналов, формируемых в измерительном объеме за интервал времени наблюдения длительностью T . Информация о величине сечения S измерительного объема в направлении, перпендикулярном потоку частиц, позволяет оценить их счетную концентрацию N_C , усредненную по сечению измерительного объема:

$$N_C = \frac{N}{S \cdot T} = \frac{\nu}{S}. \quad (1)$$

Из счетной концентрации могут быть получены объемная N_V , массовые N_{mC} , N_{mV} и поточные N_{nC} , N_{nm} , N_{nV} концентрации (рис. 1) с использованием информации о средних скоростях частиц ν и дисперсионной среды ν_g , а также массе m частиц [4].

Многообразие функций распределения по параметру или нескольким параметрам может быть получено [5] путем функциональных преобразований экспериментально определенных на совокупности счетных ячеек концентраций (рис. 1), содержащих величину ν скорости счета как основную измеряемую экспериментально характеристику двухфазного потока в каждой счетной ячейке. Все виды концентраций частиц двухфазного потока содержат в своем составе величину ν скорости счета, и, следовательно, определяются с той же степенью достоверности и в тех же рамках корректности учета зависимости амплитуд осцилляций двухфазного потока от частоты, что и величина ν .

Диапазон частотного спектра гармоник последовательности дискретных сигналов по времени простирается от нуля до максимальной величины, определяемой длительностью формирования одиночного импульса. Поток сигналов во времени можно рассматривать как частотно модулированный спектр модулирующих частот сигнал, образованный спектром несущих частот. В таком приближении спектр модулирующих частот характеризует частотные свойства диагностируемой дисперсной фазы высокоэнергетического потока как физического объекта в целом, а

спектр несущих частот связан с дисперсией концентрации частиц дисперсной фазы. Модулирующие частоты имеют физический смысл разнообразных, в том числе и периодических, пульсаций двухфазного потока в пределах измерительного объема во времени и характеризуют уровень стабильности потока частиц на временных интервалах наблюдения, значительно превышающих промежутки между сигналами.

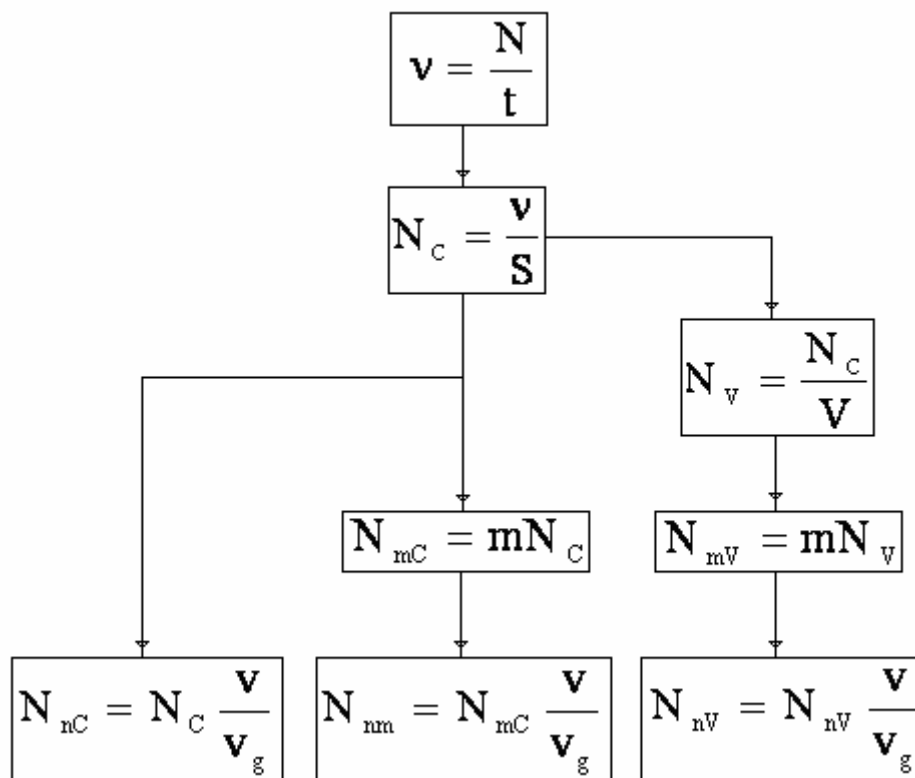


Рис. 1. Взаимосвязь основных концентрационных характеристик дисперсной фазы двухфазного потока

Регистрация параметров диагностических сигналов на последовательных интервалах времени позволяет вычислительными методами производить количественную оценку стабилизации скорости счета по мере накопления сигналов в образуемых пересечением интервалов регистрируемых параметров счетных ячейках [5, 6]. Вычислительными методами, основанными, например, на эвристических алгоритмах [7] решения задачи таксономии, преобразованием статистически непроработанной гистограммы на первичных (регистрационных) интервалах параметров в гистограмму на объединенных интервалах выполняется выделение из регистрируемых на последовательных интервалах времени сигналов

стабильного во времени распределения сигналов по их параметрам с учетом временной стабилизации пересчитываемой скорости счета в любой образуемой пересечением объединяемых интервалов регистрируемых параметров счетной ячейке.

Применение временных интервалов в информационно-измерительных системах для сопряженной регистрации временных зависимостей нескольких диагностируемых параметров рассмотрим на примере автоматизированных программно-аппаратных комплексов для инжекционного синтеза электродного металлокомпозиата [8].

Системы автоматизации программно-аппаратных комплексов для инжекционного синтеза [8, 9] выполнялись на базе персонального компьютера с установленным на нем специализированным программным обеспечением к соответствующим многофункциональным модулям фирмы Advantech, например, модулю PCI-1710, который включает 16-канальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 2-канальный 12-разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и разнесенные 16-ти разрядные цифровые порты ввода и вывода бинарных сигналов. Управление всеми периферийными устройствами и датчиками организовано через цифровые порты и аналоговые каналы многофункциональных модулей.

При активизации рабочего режима программно – аппаратного комплекса [8, 9] организовывался мониторинг измеряемых параметров независимым циклом на основе программного таймера, а также заполнения массивов зависимостями от времени всех первичных измеряемых параметров. Циклом на основе второго программного таймера с более крупным временным интервалом, чем у измерительного цикла, организовывались вычисления соответствующих текущему времени значений управляющих параметров и перезаполнения индикаторных текстовых и графических полей на экране монитора. В каждом интервале этого таймера для текущего момента времени по заданным функциям вычислялись соответствующие моменту значения всех управляющих величин, выполнялись необходимые вычисления и корректировки с учетом измеряемых параметров, направлялись управляющие сигналы в соответствующие модули цифро-аналогового управления

аналоговыми и дискретными каналами, проводилось заполнение массивов, содержащих зависимости от времени значений управляющих (заданных и текущих) параметров.

Формирование сигналов обратной связи для оперативной коррекции мощности термических устройств программно – аппаратного комплекса основано на регистрации в последовательные моменты времени одновременно измеряемых электрических напряжений на термозависимом элементе электротермического устройства и на последовательном его соединении с термостабилизированным сопротивлением [10].

Выводы

Применения временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах программно-аппаратных комплексов позволяет:

- повышать точность при выполнении процедур измерения других физических величин [1];
- выделять из регистрируемого на последовательных интервалах времени потока импульсных сигналов с применением критерия стабилизации скорости счета инвариантные относительно времени распределения по их параметрам;
- сопряженно определять и регистрировать на последовательных интервалах времени временные зависимости диагностируемых и управляющих параметров программно-аппаратного комплекса, программно анализировать эти зависимости и применять результаты анализа для оптимизации диагностик [10] и автоматизации управления [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабатура Ю.В. Розвиток теорії та принципів побудови інформаційно-вимірювальних систем з часовим представленням вимірювальної інформації: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.05 / Ю.В. Шабатура // Вінницький національний технічний ун-т. – Вінниця, 2008. – 38 с.
2. Денисенко А.И. Программно-аппаратный комплекс для инъекционного синтеза композитных функциональных материалов / А.И. Денисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий Выпуск 3/1(45). – Харьков, 2010. – С. 44-48.

3. Денисенко А.И. К оптимизации лазерной диагностики дисперсной фазы в инжекционной технологии синтеза композитных материалов / А.И. Денисенко // «Системні технології». Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (73). – Дніпропетровськ, 2011. – С. 66–71.
4. Беляев А.С. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / А.С. Беляев и др. // М.: Энергоиздат. – 1981.
5. Денисенко А.И. К взаимосвязи многомерных функций распределений частиц двухфазного потока и теневых сигналов от них по параметрам / А.И. Денисенко // «Системные технологии». Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2 (49). – Днепропетровск, 2007. – С. 149–160.
6. Денисенко А.И. Оптимизация скорости накопления статистической информации лазерным спектрометром дисперсной фазы / А.И. Денисенко, В.Б. Однороженко, А.П. Нефедов // Измерения в потоках. Методы, аппаратура и применение. – Москва, 1990. – С. 12.
7. Денисенко О.І. До проблеми виділення функції розподілу по параметрах імпульсів з гістограм при лазерній діагностиці дисперсної фази плазмових потоків / О.І. Денисенко // “Україна наукова ’2003”. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2003. – Т. 31. Фізика. – С. 24-26.
8. Денисенко А.И. Программно-аппаратный комплекс для инжекционного синтеза композитных функциональных материалов / А.И. Денисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий Выпуск 3/1(45). – Харьков, 2010. – С. 44-48.
9. Денисенко А.И. Система автоматизации установки инжекционного формирования металлокомпозита / А.И. Денисенко, Е.П. Калинушкин // Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2007). – Севастополь, 2007, СНУЯЄтаП. – Ч.1. – С. 136-138.
10. Денисенко О.І. Оперативна діагностика стану електротермічних пристроїв програмно-апаратного комплексу / О.І. Денисенко // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 1 (54). – Днепро-петровск, 2008. – С. 79–92.

УДК 004.725.4:519.216

А.О. Недоспасов, О.І. Михальов

ОЦІНЮВАННЯ МІРИ САМОПОДІБНОСТІ ІНТЕРНЕТ – ТРАФІКУ МЕТОДАМИ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Анотація: дана робота присвячена виконати оригінальний експеримент по збору мережевого трафіку та дослідженню існуючих методів фрактального та мультифрактального аналізу за допомогою яких можна визначити фрактальну розмірність різними методами, показник Хьорста та наявність мультифрактальності у трафіку.

ЧАСОВІ РЯДИ, САМОПОДІБНІСТЬ, ТРАФІК, ФРАКТАЛ, МУЛЬТИФРАКТАЛ.

Аналіз реалізації мережевого трафіку

В якості реалізації візьмемо Інтернет - трафік мережі Національної Металургійної Академії України. Збір інформації з передачі трафіку тривав протягом трьох діб. Реалізація почалася 26.04.2010 в 13:47:00 і завершилася 29.04.2010 в 13:47:00 через 72 години [1].

Подивимося залежність розміру трафіку від часу у вигляді графіка (рисунок 1).

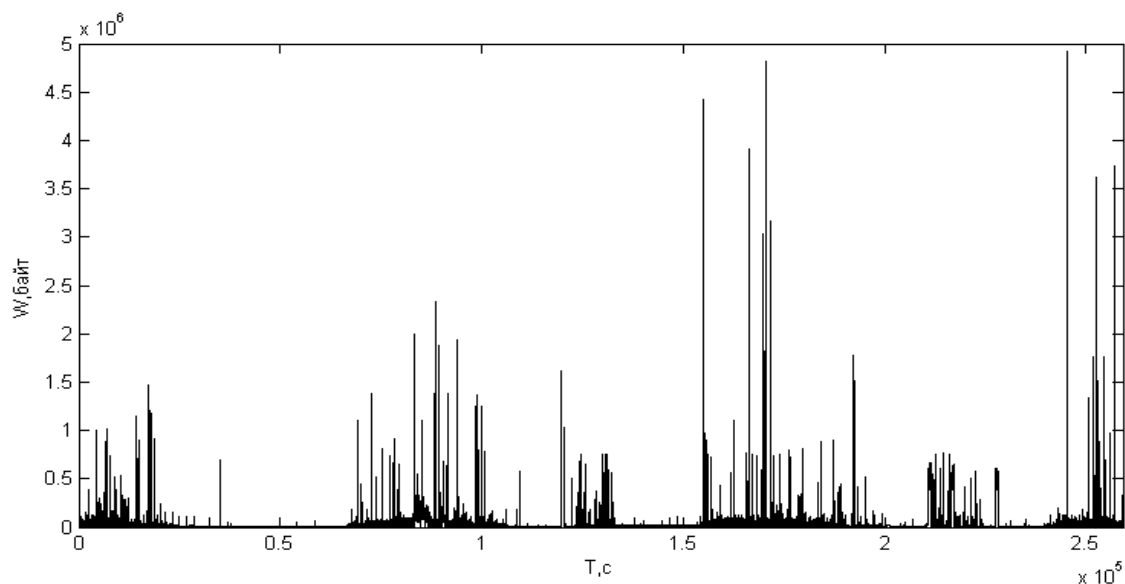


Рисунок 1 - Залежність розміру трафіку від часу

Аналізуючи візуально графік, наведений на рисунку 1 можна помітити, що Інтернет - трафік є значно нерівномірним процесом: є

© Недоспасов А.О., Михальов О.І., 2012

викиди досить сильною амплітуди, в той час як середнє значення трафіку - відносно мале [2]. Описуючи таку поведінку, часто говорять, що даний процес підпорядковується одному із законів розподілу з "важкими хвостами" (типу Парето) [3].

Розрахунок фрактальних розмірностей

Для знаходження більш ефективного метода розрахунку фрактальної розмірності, розрахуємо спочатку фрактальну розмірність Броунівського руху різними методами, для цього згенеруємо Броунівський рух, з коефіцієнтом Хьорста $H=0,7$, де фрактальну розмірність $D=2-0,7=1,3$. В таблиці 1 наведені результати розрахунків.

Таблиця 1
Розрахунки похибок методів

Метод розрахунку	Оцінка	Відхилення від теоретичного значення		Похибка метода, %
		Абсолютне	Відносне, %	
R / S - аналізу	$D=1,2937$	$\Delta=0,0063$	$\delta=0,3621$	$\delta=4,3416$
BOX COUNTING	$D=1,2131$	$\Delta=0,0869$	$\delta=10,1237$	$\delta=12,5408$
Розкладання в ряд Фур'є	$D=1,4582$	$\Delta=0,1582$	$\delta=8,9307$	$\delta=25,3479$
Агрегування	$D=1,5364$	$\Delta=0,2364$	$\delta=23,2853$	$\delta=3,3103$

З результатів тестування видно, що для подібного виду сигналу актуально використовувати метод R / S - аналізу.

Далі розрахуємо фрактальну розмірність трафіку реалізації різними методами, та отримаємо наступні данні представлені в таблиці 2.

Таблиця 2
Розрахунки фрактальної розмірності трафіку методами

Метод розрахунку	Оцінка
R/S - аналізу	$D=1,5166$
BOX COUNTING	$D=1,7970$
Розкладання в ряд Фур'є	$D=1,8058$
Агрегування	$D=1,8225$

Мультифрактальний аналіз мережевого трафіку в основі якого лежить вейвлет-перетворення

На першому етапі (1⁰) алгоритму аналізу – здійснимо вейвлет-перетворення мережевого трафіку. Результат вейвлет-перетворення можна інтерпретувати, як поверхню у трьохмірному просторі. Найбільш важлива інформація о ній міститься в скелетоні, або лініях локальних екстремумів поверхні коефіцієнтів $W = (a, x)$, пошук якості Інтернет – трафіку методами мультифрактального аналізу их проводиться на кожному масштабі a [3].

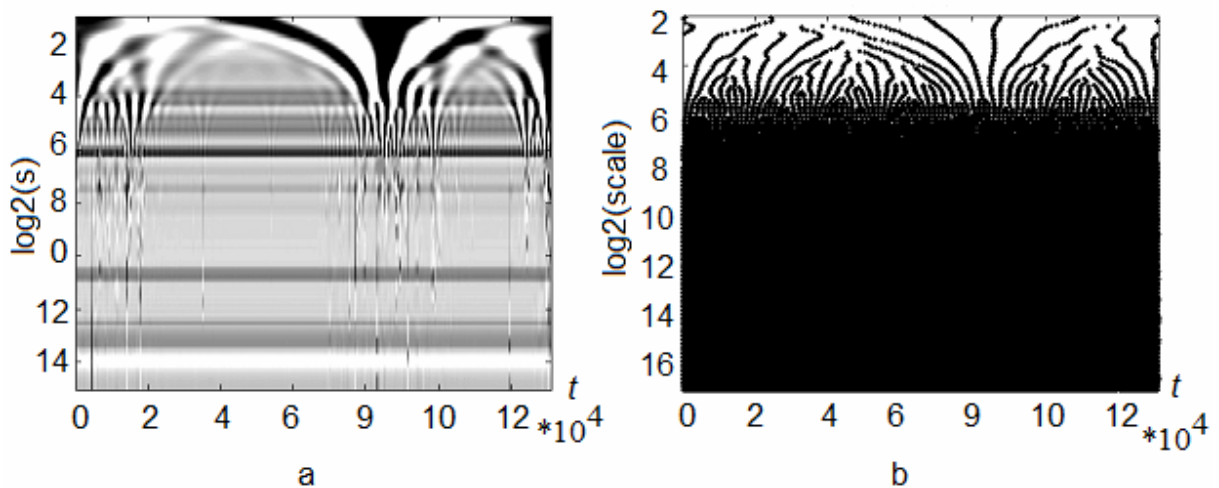


Рисунок 2 – Вейвлет-перетворення

а) результат вейвлет-перетворення;

б) лінії локальних екстремумів поверхні коефіцієнтів $W = (a, b)$

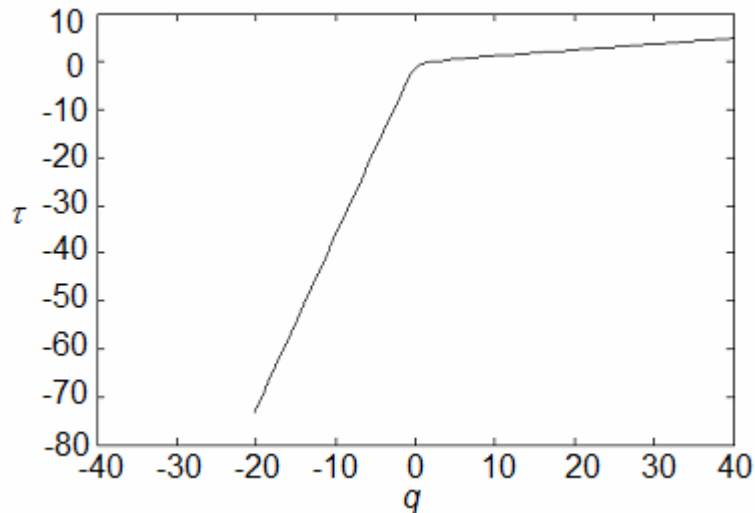
На рисунку 2а темні області відповідають позитивним, а світлі – негативним значенням $W = (a, x)$, відтінками сірого кольору в кожній з областей виділені діапазони значень $W = (a, x)$.

2⁰. Проаналізуємо виділення ліній локальних максимумів моделей вейвлет-перетворення рисунок 2б.

3⁰. Розрахуємо узагальнену статистичну суму $Z(q, a)$.

4⁰. Розрахуємо оцінку експоненти узагальненої статистичної суми $\tau(q)$.

Побудуємо графік залежності τ від q (рисунок 3а).

Рисунок 3 – Залежність τ від q

З графіку на рисунку 3 видно, що $\tau(q)$ зростає і виконується умова $\tau(q_1) \leq \tau(q_2)$. Графік відповідає канонічному вигляду.

5⁰. Розрахуємо спектр розмірності Реньї (рисунку 4а).

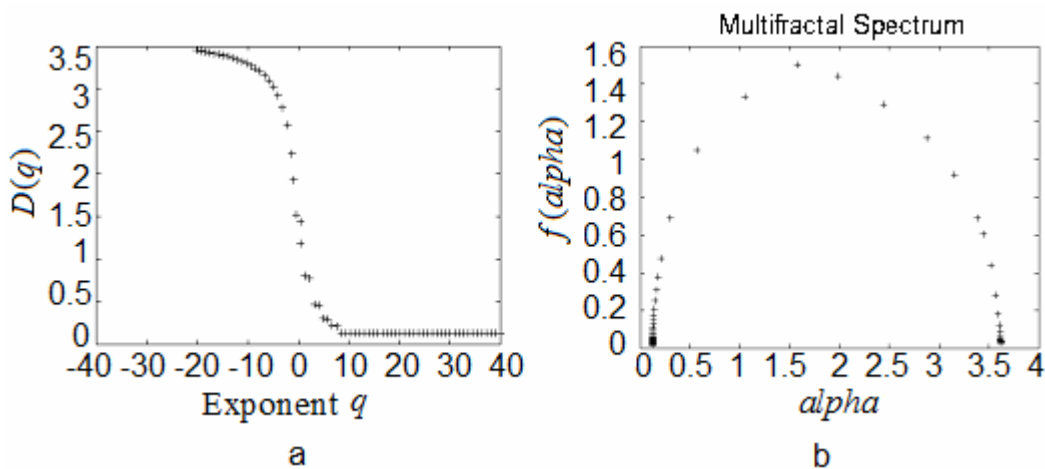


Рисунок 4 – а) спектр розмірності Реньї; б) спектр сингулярності

З графіку (рисунку 4а) видно, що $D(q)$ має спадаючий вид і виконується умова $D(q_1) \geq D(q_2)$. Аналізуючи графік визначимо фрактальну розмірність:

$$D(q_0) = 1,5579.$$

Цей результат приблизно сходиться з методом R/S – аналізу.

6⁰. Розрахуємо спектр сингулярності (рисунку 4б).

Проаналізував спектр сингулярності визначимо фрактальну розмірність:

$$D = \max(f(\alpha)) = 1,5002.$$

Мультифрактальний аналіз підтверджує малу самоподібність мережевого трафіку НМетАУ.

Фрактальний та мультифрактальний аналіз бездротового Інтернет – трафіку

Розрахуємо фрактальну та мультифрактальну розмірність для бездротового Інтернет – трафіку.

Таблиця 3

Розрахунки фрактальної та мультифрактальної
розмірності бездротового Інтернет - трафіку

Метод розрахунку	Фрактальна розмірність
R / S - аналізу	$D = 1,2464$
BOX COUNTING	$D = 1,3845$
Розкладання в ряд Фур'є	$D = 1,6869$
Агрегування	$D = 1,6934$
За допомогою спектра розмірності Реньі	$D = 1,2169$
За допомогою спектра сингулярності	$D = 1,2392$

Висновки

В даній роботі досліджувався мережевий трафік зібраний з одного із серверів НМетАУ в порівнянні с трафіком бездротового Інтернет – провайдера. В результаті аналізу Інтернет - трафіку, з'ясували наступне: мережевий трафік є значно нерівномірним процесом, мають місце викиди досить сильної амплітуди, в той час як середнє значення трафіку - відносно мале. Підтвердженням малої самоподібності трафіку є коефіцієнт Хьорста, який, як з'ясувалося, дорівнює 0,4834 та знаходиться в межах $0 < H < 0,5$. Це говорить про те, що мережевий трафік відноситься до класу антиперсистентних процесів. У роботі досліджено чотири методи розрахунку фрактальної розмірності одновимірного сигналу: метод R / S - аналізу, метод BOX COUNTING, метод розкладання в ряд Фур'є, метод агрегування. Як з'ясувалося за допомогою тестової генерації Броунівського руху з відомою фрактальною розмірністю трафіку, найбільш придатним методом для розрахунку фрактальної розмірності трафіку, що аналізувався є метод R / S -аналізу, використання якого дало $D = 1,5166$. У той же час така фрактальна розмірність також свідчить

про малу самоподібність трафіку. У свою чергу, трафік був досліджений за допомогою мультифрактального аналізу, який ґрунтується на безперервному вейвлет-перетворенні, з використання якого був отриманий спектр розмірності Рені та спектр сингулярності.

Результати аналізу дають можливість більш детально оцінити трафік і довести його самоподібність, що, у свою чергу, дозволяє прогнозувати трафік і планувати навантаження на сервери мережі при його подальшому наростанні та розробити методи забезпечення якості обслуговування мереж за допомогою динамічного розподілу пропускної властивості каналів мережевого трафіку. К трафіку також можна застосувати фрактальне стиснення для зберігання та передачі.

Порівняно результати дослідження Інтернет - трафіку мережі НМетАУ і трафік бездротового Інтернет – провайдера. Показано, що трафік бездротового Інтернет - провайдера є більш самоподібний, так як коефіцієнт Хьорста знаходиться в межах $0,5 < H < 1$. Це говорить, що трафік відноситься до класу персистентних процесів. Фрактальний та мультифрактальний аналіз також підтверджують самоподібність бездротового Інтернет – трафіку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Михальов О.І., Недоспасов А.О. Дослідження ефективності алгоритмів оцінювання самоподібності мережевого трафіку // IX міжнародна науково практична конференція «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2011)». – м. Дніпропетровськ, 2011. – С.187-188.
2. Михалев А.И., Недоспасов А.А. Исследование алгоритмов мультифрактального анализа в задачах оценивания сетевого трафика // Материалы международной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта» (ISDMCI'2011). - Том 2. - Херсон: ХНТУ, 2011.
3. Павлов А.Н., Аніщенко В.С. Мультифрактальний аналіз складних сигналів. Методичні вказівки. - Успіхи фізичних наук. – 2007.
4. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.
5. Петров В.В. Структура телетрафіка та алгоритм забезпечення якості обслуговування при впливі ефекту само подібності /Автореферат дисертації. - Москва. - 2004.
6. Божокін С.В., Паршин Д.А. Фрактали та мультифрактали. - Ижевськ: НДЦ "Регулярна та хаотична динаміка", 2001. – 94 с.
7. Шишкін Е.І. Моделювання й аналіз просторових і часових фрактальних об'єктів. Методичні вказівки. Єкатеринбург. - 2004.

8. Бельков Д.В. Дослідження мережевого трафіку. Наукова праця. Донецьк. - 2009.
9. Городецький О.Я. Заборовський В.С. Фрактальні процеси в комп'ютерних мережах. Навчальний посібник. Санкт-Петербург. - 2000.
10. Федер Е. Фрактали. Москва. - 1991.
11. Встовський Г.В., Колмаков О.Г., Бунін І.Ж. Введення в мультифрактальну параметризацію структур матеріалів. – М.: Металлургия, 2001.
12. Астафьева Н.М. Вейвлет-аналіз: основи теорії та приклади застосування. Успіхи фізичних наук. – 1996.
13. Дремін І.М., Іванов О.В., Нечитайло В.О. Вейвлети та їх використання. Успіхи фізичних наук. – 2001.
14. Урьєв Г.А. Дослідження фрактальних властивостей трафіка реального часу і оцінка їх впливу на характеристики обслуговування телекомунікаційних мереж. Автореферат дисертації. Москва. – 2007.

УДК 519.3

І.О. Астіоненко, О.І. Литвиненко, А.Н. Хомченко

ЗГЛАДЖЕНІ АПРОКСИМАЦІЇ ТРИКВАДРАТИЧНОГО СКІНЧЕНОГО ЕЛЕМЕНТА

В роботі виконано згладжування (за методом найменших квадратів) багатопараметричних базисних функцій, що отримані за допомогою аналітичного методу конструювання ієрархічних форм на триквдратичному скінченному елементі серендипової сім'ї.

СКІНЧЕННИЙ ЕЛЕМЕНТ СЕРЕНДИПОВОЇ СІМ'Ї, ЗГЛАДЖЕНА АПРОКСИМАЦІЯ, ІНТЕРПОЛЯЦІЙНИЙ ПОЛІНОМ, МОДИФІКОВАНИЙ БАЗИС.

Постановка проблеми

Серендипів скінченний елемент з триквдратичною інтерполяцією використовують при розв'язанні тривимірних задач дифузії, фільтрації та теорії пружності. Стандартний базис цього елемента можна отримати матричним методом або за допомогою інтерполяційної процедури Тейлора. Стандартні функції форми мають вагомий недолік: вони допускають паразитні зсувні ефекти при розв'язанні певного класу задач [1].

Аналіз публікацій за темою дослідження

Вперше появу паразитних зсувних ефектів було виявлено при аналізі консольної балки під дією рівномірного навантаження, яка розв'язувалась методом скінченних елементів з використанням серендипового скінченно елемента з біквдратичною інтерполяцією [1]. На біквдратичному скінченному елементі для усунення цього недоліку була використана процедура згладжування стандартного інтерполяційного полінома, що базується на інтегральному методі найменших квадратів [1,2,3]. Вилучення “зайвих” членів дозволило отримати на елементі інтерполяційний поліном, що змінюється за квадратичним законом не тільки вздовж прямих, що паралельні координатним осям, але і в довільному напрямку.

Мета статті – за допомогою методу найменших квадратів виконати згладжування базисних функцій просторового скінченно елемента з триквдратичною інтерполяцією.

© Астіоненко І.О., Литвиненко О.І., Хомченко А.Н., 2012

Основна частина

Розглянемо просторовий скінченний елемент з 20 вузлами, що рівномірно розташовані на ребрах елемента (рис. 1) ($|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1, |\zeta| \leq 1$).

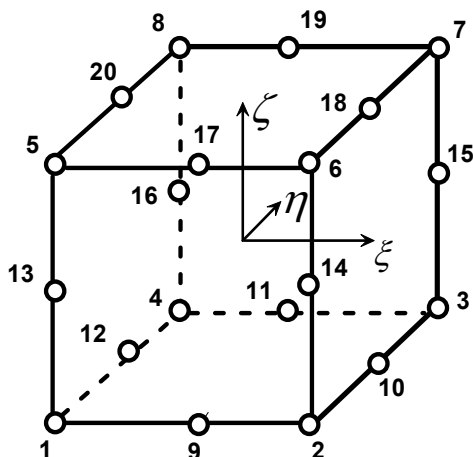


Рис. 1. CSE-20

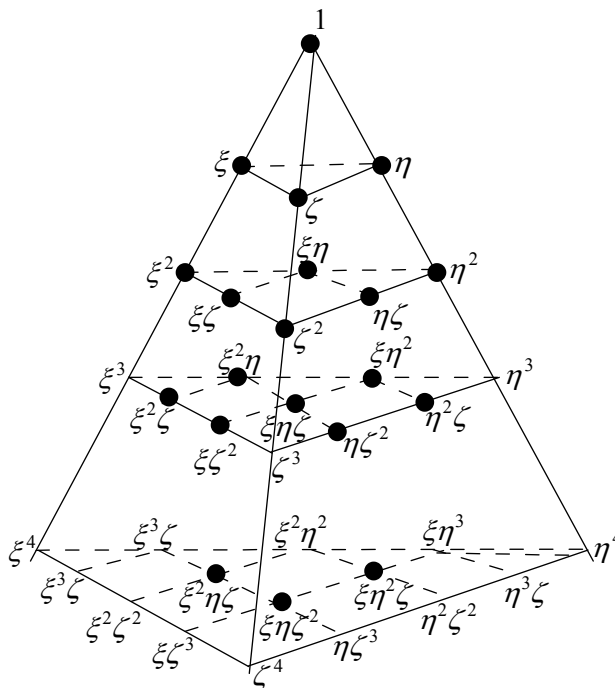


Рис. 2. Схема Паскаля для просторового CSE-20 (20 параметрів)

Система базисних функцій стандартного елемента має вигляд [4]:

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta)(\xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta - 2),$$

$$\xi_i, \eta_i, \zeta_i = \pm 1, \quad i = \overline{1, 8}. \quad (1)$$

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta),$$

$$\eta_i, \zeta_i = \pm 1, \quad i = 9, 11, 17, 19. \quad (2)$$

Решта функцій утворюються із (2) шляхом циклічного переставлення ξ, η, ζ .

Є підстави вважати, що паразитні ефекти, які виникають при розв'язанні задач теорії пружності, викликані присутністю “зайвих” мономів у стандартному інтерполяційному поліномі CSE-20 у порівнянні з повним поліномом другого порядку від трьох аргументів.

У інтегральному методі найменших квадратів (МНК) за міру відхилення інтерполяційного полінома даного елемента

$$\begin{aligned} \phi = & \alpha_1 + \alpha_2\xi + \alpha_3\eta + \alpha_4\zeta + \alpha_5\xi^2 + \alpha_6\xi\eta + \alpha_7\eta^2 + \alpha_8\eta\zeta + \alpha_9\zeta^2 + \\ & + \alpha_{10}\xi\zeta + \alpha_{11}\xi^2\eta + \alpha_{12}\xi\eta^2 + \alpha_{13}\xi^2\zeta + \alpha_{14}\xi\zeta^2 + \alpha_{15}\eta\zeta^2 + \alpha_{16}\eta^2\zeta + \\ & + \alpha_{17}\xi\eta\zeta + \alpha_{18}\xi^2\eta\zeta + \alpha_{19}\xi\eta^2\zeta + \alpha_{20}\xi\eta\zeta^2 \end{aligned} \quad (3)$$

від загладжуваної функції (повного полінома другого порядку від трьох аргументів)

$$\bar{\phi} = \beta_1 + \beta_2\xi + \beta_3\eta + \beta_4\zeta + \beta_5\xi^2 + \beta_6\xi\eta + \beta_7\eta^2 + \beta_8\eta\zeta + \beta_9\zeta^2 + \beta_{10}\xi\zeta \quad (4)$$

по об'єму Ω куба $-1 \leq \xi, \eta, \zeta \leq 1$ приймемо величину

$$\chi = \iiint_{\Omega} (\phi - \bar{\phi})^2 d\xi d\eta d\zeta. \quad (5)$$

Метод найменших квадратів у інтегральній формі дозволив отримати новий субститут-базис для 20-вузлового просторового ССЕ. Базисні функції для вузлів 1 і 9 записані у наступних формулах:

$$\bar{N}_1 = \frac{1}{24} (-6 + \xi + \eta + \zeta + 3\xi^2 + \xi\eta + 3\eta^2 + \eta\zeta + 3\zeta^2 + \xi\zeta), \quad (6)$$

$$\bar{N}_9 = \frac{1}{12} (3 - 2\eta - 2\zeta - 3\xi^2 + 2\eta\zeta). \quad (7)$$

Функції субститут-базису задовольняють умові вагового балансу: сума базисних функцій на скінченному елементі дорівнює одиниці.

В [3] показано новий аналітичний метод побудови ієрархічних форм базисних функцій скінченного елемента, в якому базисні функції отримано за допомогою адитивного уточнення. Цей метод доводить неоднозначність апроксимації функції двох і трьох аргументів на серендипових елементах вищих порядків.

Множину альтернативних базисів на ССЕ-20 можливо отримати додаванням до поверхні стандартного базису (формули (1)-(2)) поверхні другого порядку з відповідним коефіцієнтом K :

$$\begin{aligned} N_1 = & \frac{1}{8} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \times \\ & \times ((-2 - \xi - \eta - \zeta) + K(\xi\eta + \xi\zeta + \eta\zeta + 2\xi + 2\eta + 2\zeta + 3)), \end{aligned} \quad (8)$$

$$N_9 = \frac{1}{4} (1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \zeta) \left((1 + \xi) - \frac{1}{2} K (1 + \xi)(2 + \eta + \zeta) \right), \quad (9)$$

де N_1, N_9 - модифіковані базисні функції ССЕ-20.

Запишемо узагальнені формули для реалізації аналітичного методу побудови ієрархічних форм базисних функцій 20-вузлового ССЕ [3]:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \times (-2 + \xi_i \xi + \eta_i \eta + \zeta_i \zeta + K(\xi_i \eta_i \xi \eta + \xi_i \zeta_i \xi \zeta + \eta_i \zeta_i \eta \zeta - 2\xi_i \xi - 2\eta_i \eta - 2\zeta_i \zeta + 3)),$$

$$\xi_i, \eta_i, \zeta_i = \pm 1, i = \overline{1, 8}, \quad (10)$$

$$N_i = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \left(1 - \frac{1}{2}K(2 - \eta_i \eta - \zeta_i \zeta)\right),$$

$$\eta_i, \zeta_i = \pm 1, i = 9, 11, 17, 19. \quad (11)$$

Решта функцій утворюються із (11) шляхом циклічного переставлення ξ, η, ζ .

Альтернативні базиси на ССЕ-20 мають двадцять шість мономів у інтерполяційному поліномі.

Зауваження. Вміння ефективно керувати кількістю параметрів інтерполяційного полінома є дуже важливим в теорії серендипових апроксимацій. В деяких задачах виникає необхідність включати додаткові (“приховані”) параметри, так що кількість параметрів перевищує кількість вузлів. Інколи навпаки, вилучення “зайвих” членів забезпечує згладжування деформації.

Мінімізуючи функціонал (5) з підінтегральними функціями (8) і (9), можна отримати згладжені функції з параметром:

$$\overline{N}_1 = \frac{1}{24} \left((-6 + 8K) + \left(1 - \frac{4}{3}K\right) (\xi + \eta + \zeta) + (3 - 4K)(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2) + \xi\eta + \xi\zeta + \eta\zeta \right), \quad (12)$$

$$\overline{N}_9 = \frac{1}{36} \left((9 - 8K) + (2K - 6)(\eta + \zeta) + (6K - 9)\xi^2 + 3K(\eta^2 + \zeta^2) + 6\eta\zeta \right). \quad (13)$$

Решта функцій утворюються із (13) шляхом циклічного переставлення ξ, η, ζ .

Для функцій форми субститут-базису інтерполяційна гіпотеза Лагранжа не виконується.

Значення функції $\overline{N}_1(\xi, \eta, \zeta)$ у вузлах ССЕ-20 (табл. 1):

Таблиця 1

№ вузла	1	2	3	4	5	6	7
\bar{N}_1	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{24} - \frac{K}{9}$	$\frac{1}{8} - \frac{2K}{9}$	$\frac{1}{24} - \frac{K}{9}$	$\frac{1}{24} - \frac{K}{9}$	$\frac{1}{8} - \frac{2}{9}K$	$\frac{3}{8} - \frac{1}{3}K$
№ вузла	8	9	10	11	12	13	14
\bar{N}_1	$\frac{1}{8} - \frac{2K}{9}$	$-\frac{1}{24} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{24}$	$-\frac{1}{24}$	$-\frac{1}{24} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{24} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{24}$
№ вузла	15	16	17	18	19	20	
\bar{N}_1	$\frac{1}{8} - \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{24}$	$-\frac{1}{24}$	$\frac{1}{8} - \frac{K}{9}$	$\frac{1}{8} - \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{24}$	

Для $\bar{N}_9(\xi, \eta, \zeta)$ (табл. 2):

Таблиця 2

№ вузла	1	2	3	4	5	6	7
\bar{N}_9	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{9}$	$-\frac{1}{6} + \frac{2K}{9}$
№ вузла	8	9	10	11	12	13	14
\bar{N}_9	$-\frac{1}{6} + \frac{2K}{9}$	$\frac{3}{4} - \frac{K}{6}$	$\frac{1}{6} - \frac{K}{36}$	$\frac{1}{12} - \frac{K}{18}$	$\frac{1}{6} - \frac{K}{36}$	$\frac{1}{6} - \frac{K}{36}$	$\frac{1}{6} - \frac{K}{36}$
№ вузла	15	16	17	18	19	20	
\bar{N}_9	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{12}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{12}$	$\frac{1}{12} - \frac{K}{18}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{12}$	$\frac{1}{12} + \frac{K}{18}$	$-\frac{1}{6} + \frac{K}{12}$	

Розглянемо повузловий розподіл рівномірної масової сили по вузлах трикватричного скінченного елемента зі згладженою апроксимацією. Для ССЕ вузлова доля рівномірної масової сили визначається потрійним інтегралом по об'єму Ω скінченного елемента від відповідної базисної функції, зваженої з об'ємною щільністю γ :

$$p_i = \iiint_{\Omega} \gamma N_i(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta, \quad \gamma = \frac{1}{8}. \quad (14)$$

Зазначимо, що повузловий розподіл рівномірної масової сили для згладжених функцій співпадає з розподілом для ієрархічних функцій (10) і (11) у аналітичному методі. Розподіл одиничної маси має наступний вигляд:

$$p_1 = -\frac{1}{8} + \frac{1}{6}K, \quad p_9 = \frac{1}{6} - \frac{1}{9}K. \quad (15)$$

Згладжена апроксимація для ССЕ-20 має властивість: у довільному напрямку поле змінюється за квадратичним законом, що дозволить уникнути паразитних зсувних ефектів при розв'язанні тривимірних задач теорії пружності. Нагадаємо, що для стандартного ССЕ-20 квадратична зміна поля відповідає тільки трьом взаємно перпендикулярним напрямкам, що паралельні координатним осям.

Висновки

Вперше отримані нові субститут-базиси на скінченному елементі з триквадратичною інтерполяцією. Цікавим є питання побудови згладжених апроксимацій на скінченних елементах ССЕ-32 і ССЕ-44 у просторі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jeyachandrabose C. Least squares strain smoothing for the eight-node serendipity plane stress element / C. Jeyachandrabose, J. Kirkhope // Num. Meth. in Eng. — № 20. — 1984. — p.1164-1166.
2. Хомченко А.Н. Про інтегральне квадратичне апроксимування на серендипових елементах / А.Н. Хомченко, Б.А. Хомченко // Нелин. краевые задачи матем. физики и их прилож.: сб. науч. тр. □К.: Ин-т математики, 1996. □ С. 270-272.
3. Хомченко А.Н. Новый подход к построению базисов серендиповых элементов / А.Н. Хомченко, Е.И. Литвиненко, И.А. Астионенко // Геом. та комп. моделювання. Зб. наук. праць. — Вип. 23. — Харків: ХДУХТ, 2009. — С.90-95.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л.Сегерлинд. — М.: Мир, 1979. — 392 с.

УДК 681.876.2

А.И. Михалёв, Ю.В. Бабенко

ОЦЕНКА РАБОТЫ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА С МОДИФИЦИРОВАННЫМИ ОПЕРАТОРАМИ МУТАЦИИ И ГЕНЕРАЦИИ НАЧАЛЬНОЙ ПОПУЛЯЦИИ

В работе проведено исследование работы генетического алгоритма при использовании различных хаотических генераторов, а также фрактального гауссовского шума.

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ, ФРАКТАЛЬНЫЙ ГАУССОВСКИЙ ШУМ, ФРАКТАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, ПОКАЗАТЕЛЬ ХЕРСТА.

Введение

Во многих областях современной науки часто возникает необходимость отыскания глобального экстремума функций одной или нескольких переменных. Сложная природа таких функций, как правило, является причиной их многоэкстремальности. Однако, развитие аналитических методов, которые позволили бы отыскать глобальные экстремумы многоэкстремальных функций, значительно отстают от прикладных исследований и разработок. Поэтому значительное внимание уделяется использованию эвристических (эволюционных) алгоритмов, в основе которых лежат модели различных естественных процессов: процесса естественного отбора, самоорганизации колоний организмов, процесса имитации отжига кристаллов и т.д.

Постановка проблемы

Формализуем постановку задачи. Для этого рассмотрим некоторую область $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $d \in \mathbb{N}$, и зададим функцию $f: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. Задача оптимизации функции f может быть сформулирована следующим образом: требуется (с достаточной точностью) вычислить $m(f) = \inf_{x \in \Omega} f(x)$ и $M(f) = \sup_{x \in \Omega} f(x)$, а также найти точки $\bar{x} \in \Omega$ (если они существуют), для которых либо $f(\bar{x}) = m(f)$, либо $f(\bar{x}) = M(f)$.

© Михалёв А.И., Бабенко Ю.В., 2012

Ясно, что задаче оптимизации функции f можно придать чисто практическое содержание. Например, среди всех допустимых параметров x , $x \in \Omega$, некоторого процесса найти оптимальные параметры \bar{x} , т.е. параметры, которые оптимизируют критерии процесса, выраженные функцией f .

На практике при решении задач многомерной глобальной оптимизации оказались эффективными эволюционные алгоритмы поиска глобального экстремума. Поэтому, исследование самих алгоритмов и их модификаций может существенно расширить область их применимости, а также качественно улучшить сами алгоритмы.

В данной работе рассматривается один из эволюционных алгоритмов – генетический алгоритм и обсуждается вопрос о влиянии фрактальности на результаты его работы.

Анализ публикаций по теме исследования

Генетический алгоритм впервые опубликован Холландом [1] в начале 60-х годов. С этого времени генетический алгоритм приобретает популярность, а его практические и теоретические аспекты становятся объектом исследования многих ученых. Обстоятельный обзор современного состояния исследований генетического алгоритма можно найти в [3-5]. В работе [2] авторами рассмотрен вопрос о влиянии хаотичности на результаты работы генетического алгоритма.

Формулировка целей статьи

Генетический алгоритм (ГА) является недетерминированным. Это связано с тем, что при каждом выполнении ГА получает от некоторого генератора, обычно, генератора «псевдослучайных» чисел, новую последовательность чисел, приводящих весь алгоритм в «движение».

С другой стороны, известно, что любая конечная последовательность «псевдослучайных» (равномерно распределенных на конечном отрезке) чисел представляет собой выборку из некоторого фрактального сигнала, показатель Херста [6, 7] которого равен 0,5.

Цель данной работы – исследовать степени влияния фрактальности на результаты работы ГА. Отметим, что идея

применения фрактальных «псевдослучайных» последовательностей в операторах мутации и при генерации начальной популяции исходит из предположения о самоподобном поведении природных систем.

Формализм генетического алгоритма

В данное время ГА называют целый класс алгоритмов оптимизации, имеющих сходную терминологию и структуру. Пусть Ω – это область поиска, а $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ – целевая функция, экстремум которой необходимо найти. ГА решает эту задачу за счет выполнения следующих этапов:

1. *Создание начальной популяции.* На этом шаге из множества Ω некоторым образом выбирается начальная популяция, т.е. массив точек (особей) из множества Ω заданной мощности.

2. *Скрещивание.* На этом шаге все особи популяции или некоторое их подмножество скрещиваются, создавая одну или несколько новых особей – потомков.

3. *Мутация.* Некоторые особи популяции мутируют, т.е. изменяются в соответствии с некоторым оператором.

4. *Селекция.* Из старых особей популяции, их потомков и мутировавших особей отбираются те, которые

5. Операции 2–4 повторяются до достижения критерия останова. Как правило, критериями останова могут быть: ограничение на число шагов алгоритма, неизменность результатов алгоритма, и др.

Обычно, последовательности «псевдослучайных» равномерно-распределенных на отрезке $(0,1)$ чисел используются ГА на этапах создания начальной популяции и на этапе мутации [3]. Для удобства, обозначим эти последовательности Z_{ini} и Z_{mut} соответственно.

В данной работе исследуется вопрос о влиянии последовательностей Z_{ini} и Z_{mut} на результаты работы ГА. Поэтому в дальнейшем будем допускать, что последовательности Z_{ini} и Z_{mut} могут быть не только «псевдослучайными», но и фрактальными последовательностями, сгенерированными, например, при помощи генераторов Лоренца, Чуа, Ресслера [8,9], а также фрактального гауссовского шума [7].

Методика исследования и результаты

Исследование степени влияния фрактальности на результаты работы ГА, проводилось в среде программирования Matlab. Рассматривалось четыре класса последовательностей:

1) последовательности Z_{ini} и Z_{mut} создавались с помощью генератора «псевдослучайных» чисел Мерсена;

2) последовательность Z_{ini} создавалась с помощью генератора «псевдослучайных» чисел Мерсена, а последовательность Z_{mut} – с помощью одного из генераторов фрактальных последовательностей;

3) последовательность Z_{ini} создавалась с помощью одного из генераторов фрактальных последовательностей, а последовательность Z_{mut} – с помощью генератора «псевдослучайных» чисел Мерсена;

4) последовательности Z_{ini} и Z_{mut} создавались с помощью одного из генераторов фрактальных последовательностей.

В работе также использовались хаотические генераторы Лоренца, Чуа и Ресслера, а также генератор фрактального гауссовского шума (ФГШ) с разными показателями Херста ($H = 0,25$, $H = 0,5$ и $H = 0,75$). В таблице 1 приведены значения показателя Херста (полученные с помощью RS-метода [7]) для указанных фрактальных последовательностей.

Таблица 1
Оценка показателя Херста методом RS

	генератор Мерсена «псевдослучайных» чисел	генератор Лоренца	генератор Чуа	генератор Ресслера
показатель Херста	0.5063±0.0022	0.3748±0.0253	0.1890±0.0050	0.0688±0.0010

Была проведена серия экспериментов, в которых с использованием ГА решалась задача минимизации тестовых функций из набора De’Jonga [10] – функциях Швевеля, Гривонка, Растригина, Розенброкка, Изома, а также обычной сферической функции. Отметим, что ГА запускался при одинаковых параметрах (число особей 100, число поколений 100, вероятность мутации 3%) по 20 раз. Учитывался только наилучший из полученных результатов. Данные экспериментов приведены в таблицах 2 и 3 и содержат

информацию о наименьшем расстоянии до точки глобального минимума, найденном ГА.

Таблица 2
Результаты экспериментов

Функция	1 режим	2 режим			3 режим			4 режим		
		Лоренц	Чуа	Ресслер	Лоренц	Чуа	Ресслер	Лоренц	Чуа	Ресслер
Швефеля	0,001	0,032	0,032	0,023	0,009	0,000	0,016	0,0	0,0	0,004
Гривонка	7,074	8,969	6,275	5,447	5,440	7,048	5,428	0,0	0,0	7,023
Растригина	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Розенброкка	0,022	0,121	0,015	0,077	0,000	0,066	0,027	0,005	0,019	0,035
Изозма	1,826	1,819	1,773	1,820	1,792	1,804	1,795	1,827	1,817	1,804
Сферическая	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 3
Результаты экспериментов для ФГШ

Функция	4 режим		
	ФГШ с Н=0,25	ФГШ с Н=0,5	ФГШ с Н=0,75
Швефеля	0,03908	0,01623	0,01611
Гривонка	5,43732	5,43419	5,37358
Растригина	0,0	0,0	0,0
Розенброкка	1,33544	0,22327	1,98678
Изозма	1,82881	1,79736	1,82937
Сферическая	0,0	0,0	0,0

Выводы

В ходе проведенных экспериментов выявлена зависимость между результатами работы ГА в задачах оптимизации функций многих переменных и фрактальными свойствами последовательностей, которые используются при создании начальной популяции и оператором мутации ГА. Как показали проведенные исследования результаты работы ГА могут быть улучшены, если вместо стандартных «псевдослучайных» последовательностей использовать фрактальные последовательности, полученные при помощи хаотических генераторов Лоренца, Чуа или Ресслера, а также фрактального гауссовского шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holland, J. H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor
2. Михалёв А.И., Бабенко Ю.В. Исследование и сравнительный анализ классического и хаотического генетических алгоритмов в задачах глобальной оптимизации // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 3(74). – Днепропетровск, 2011. – С.106-112.
3. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. В.М. Курейчика. – 2-е изд. Испр. и доп. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
4. Haupt, Randy L. *Practical genetic algorithms* / Randy L.Haupt, Sue Ellen Haupt, Hoboken, New Jersey.—2nd ed. – 261 p.
5. *Computational Intelligence: An Introduction*. Andries P. Engelbrecht 311 p.
6. Федер. Е. *Фракталы: Пер. с англ.* – М.: Мир, 1991. – 254с., с ил.
7. Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М. Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения. / Под ред. О.И.Шелухина. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
8. Кузнецов С. П. *Динамический хаос (курс лекций)*. – М.: Физматлит, 2001. – 296 с.
9. Кроновер Р.М. *Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории*. М: Постмаркет, 2000. – 352 с.
10. *Test functions for optimization needs*. Marcin Molga, Czesław Smutnicki. 2005. — 60 с.

УДК 621.746

А.Б. Бирюков

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК
ИНСТРУМЕНТ МОНИТОРИНГА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ
НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В
ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Рассмотрено применение математической модели тепловой работы машины непрерывного литья заготовок в рамках системы автоматического управления технологическим процессом для мониторинга теплового состояния заготовок, формирующихся в зоне вторичного охлаждения. Решается вопрос определения уровня корректирующего воздействия на тепловое состояние заготовки путем изменения расхода охлаждающей воды на сектора зоны вторичного охлаждения при рассогласовании заданных и реальных параметров температурного состояния заготовки.

МАШИНА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК, ЗОНА ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ, МОНИТОРИНГ

Введение

Сегодня математическое моделирование технологических процессов является одним из самых распространенных методов исследования. При решении как стандартных, так и принципиально новых вопросов зачастую преимущество по сравнению с проведением натуральных экспериментов отдается исследованиям при помощи численных экспериментов, что объясняется меньшими затратами на их проведение и более высоким уровнем информативности результатов.

Применительно к технологиям непрерывной разливки стали, которые начали развиваться примерно полвека назад, метод математического моделирования с самого начала занял ведущие позиции и сегодня известен положительный опыт использования множества математических моделей тепловой работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Спектр известных моделей характеризуется различной сложностью математического описания,

© Бирюков А.Б., 2012

что связано со способом учета различных физических явлений, накладывающихся на решение основной задачи, эффективностью с алгоритмической точки зрения и т.д. [1-3].

Постановка задачи исследования

Важнейшим направлением использования математических моделей является их применение при разработке алгоритмов управления технологическими процессами или как элемента алгоритма управления, при котором математическое моделирование процесса в реальном времени протекает параллельно технологическому процессу и несет функции мониторинга и определения уровня управляющих воздействий. Для получения непрерывнолитых заготовок с заданным уровнем качества необходима разработка высокоэффективных алгоритмов управления тепловой работой МНЛЗ на всей технологической оси, основными элементами которой являются кристаллизатор и зона вторичного охлаждения. В данной работе решается задача создания алгоритма управления тепловой работой ЗВО, основанного на использовании метода математического моделирования.

Изложение основного материала

Общие основы построения математической модели непрерывной разливки стали

Тепловые процессы затвердевания и охлаждения непрерывнолитой заготовки описываются дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности. Наиболее распространенным является подход, согласно которому рассматривается затвердевание и охлаждение расчетного поперечного сечения заготовки, которое движется вдоль технологической оси МНЛЗ со скоростью вытягивания. Таким образом, при изучении формирования сортовых и слябовых заготовок, речь идет о решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в прямоугольной системе координат и двухмерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho \cdot c_{\text{эф}}} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

где ρ – плотность стали, кг/м³;

$\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$c_{эф}$ – эффективная теплоемкость стали, Дж/(кг·К);

y, z – оси симметрии поперечного расчетного сечения заготовки.

Учет выделения тепла фазового перехода в уравнении (1) производится за счет введения величины эффективной теплоемкости $c_{эф}$ [1], а влияние гидродинамических процессов в жидкой лунке формирующейся заготовки учитывается при помощи величины коэффициента эффективной теплопроводности. Поставленная задача решается при помощи численных методов. Ее решение детально рассмотрено в работах [2, 3].

Идентификация математической модели при помощи средств пирометрии

Процедура идентификации математической модели предшествует ее использованию для изучения влияния различных конструктивных и технологических факторов на тепловое состояние заготовки. Наиболее просто эта задача решается путем измерения температуры ряда точек на поверхности заготовки и корректировки параметров граничных условий по специальной схеме для достижения соответствия результатов моделирования и замеров в пределах заданной погрешности.

Отечественные МНЛЗ, как правило, не предусматривают систематический оперативный контроль температуры поверхности заготовок. Однако из опыта зарубежных предприятий известно, что наличие такой информации позволяет целенаправленно управлять процессом непрерывной разливки и своевременно идентифицировать отклонения в работе. Как правило, такие измерения реализуются при помощи пирометров, установленных в разрыв между секторами ЗВО.

Проблема выбора пирометров для реализации практических замеров достаточно дискуссионна, так как сегодня на рынке измерительной техники представлено достаточно много устройств, а требуемый диапазон измерений (700-1250°C) может быть обеспечен пирометром любого типа (радиационным, яркостным, спектрального отношения). Основное внимание, кроме стоимости прибора, следует обращать на такую характеристику пирометра как возможность защиты прибора от температурных нагрузок (водяное охлаждение корпуса, воздушный обдув пространства между объективом прибора и поверхностью заготовки и т.д.).

При использовании пирометров любого типа важным является вопрос минимизации погрешности измерения температуры

(измеряется условная температура, соответствующая абсолютно черному телу) и ее пересчета на действительное значение температуры реального тела. При этом необходимо учитывать возможность наличия окалины на поверхности заготовки, ослабления излучения от поверхности заготовки за счет поглощения и рассеяния, и т.д. Значительные методические сложности могут возникать при определении степени черноты поверхности металла (монохроматической или интегральной).

Идеальным с теоретической точки зрения представляется случай, когда пирометры устанавливаются в конце секторов ЗВО напротив каждой грани. Однако в условиях реальной МНЛЗ размещение пирометров напротив боковых граней заготовок практически невозможно из-за ограниченного расстояния между соседними ручьями. Поэтому можно установить пирометры напротив граней малого и большого радиуса или же ограничиться их установкой напротив грани малого радиуса.

На первом этапе это позволит уточнить задание граничных условий в ЗВО за счет уточнения характеристик форсунок на основании данных о температуре характерных точек на поверхности заготовки, полученных при помощи пирометров. Целесообразно решать задачу уточнения, последовательно добавляя в рассмотрение по одному сектору: сначала проводим моделирование для участка кристаллизатор и первый сектор ЗВО, в результате чего уточняем характеристику форсунок 1-го сектора. Далее проводим моделирование и соответственно уточнение для второго сектора и так далее.

Алгоритм решения данной задачи для случая без учета локальной неравномерности теплоотвода можно представить следующим образом:

– для конкретного расхода воды и соответственно плотности орошения при помощи зависимости:

$$\alpha = k \cdot g_f, \quad (2)$$

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности заготовки к охлаждающей воде, Вт/(м²·К);

k – коэффициент пропорциональности, Вт·ч/(м³·К);

g_f – плотность орошения поверхности заготовки, м³/(м²·ч)

Переходим к коэффициенту теплоотдачи для ряда значений коэффициента k , например от 50 до 65 с определенным шагом;

– полученные коэффициенты теплоотдачи используем для задания граничных условий теплообмена для соответствующего сектора ЗВО;

– на основании сравнения результата замеров и моделирования выбираем вариант с наименьшим расхождением, который в наибольшей мере соответствует значению коэффициента k для форсунок установленных в рассматриваемом секторе.

Для случая с учетом локальной неравномерности теплоотода в качестве исходных данных для нахождения значения коэффициента теплоотдачи в области натекания факелов форсунок на поверхность заготовки используем результаты решения задачи, не учитывающей локальную неравномерность теплоотода.

На втором этапе будет получена возможность отслеживать протекание процесса формирования заготовки на основании сравнения результатов замеров температур пирометрами с результатами моделирования, представляющими собой эталонные значения температур. В случае возникновения рассогласования имеется возможность автоматической коррекции расходов воды на сектора вторичного охлаждения.

Коррекция расходов воды на вторичное охлаждение для поддержания заданного теплового состояния заготовок

Эта коррекция в принципе может быть осуществлена на основании только лишь разницы смоделированной и измеренной температур при помощи известных законов регулирования, тем более что непрерывно генерируемый сигнал ΔT играет роль обратной связи. Однако любое регулирование становится более эффективным, когда при его реализации используется зависимость, позволяющая рассчитать требуемую величину корректировки управляющего фактора.

В рассматриваемом случае таким управляющим фактором является корректирующий расход охлаждающей воды на сектор ЗВО. Эта величина может быть как положительной, в случае если замеренная температура выше рекомендуемой, так и отрицательной в обратном случае. Для ее определения предложено использовать следующую логическую цепочку:

– на основании величины разности температур ΔT предложено из рассмотрения теплового баланса корочки затвердевшего металла в пределах рассматриваемого сектора определять корректирующую плотность теплового потока:

$$\Delta q = \frac{\Delta T}{2} \cdot \delta_{cp} \cdot \rho \cdot c \cdot \frac{v}{L_s}, \quad (3)$$

где L_s – длина рассматриваемого сектора, м;

δ_{cp} – средняя толщина корочки металла в пределах рассматриваемого сектора, м;

ρ, c – плотность и теплоемкость металла твердой корочки соответственно;

v – скорость разливки металла, м/с

– при помощи закона Ньютона-Рихмана переходим от корректирующей плотности теплового потока к добавочному значению коэффициента теплоотдачи, а от него, используя зависимость (2), к корректирующему значению плотности орошения Δg_f ;

– от корректирующей плотности орошения переходим к корректирующему расходу воды на сектор (для сортовой заготовки):

$$\Delta G = 4 \cdot \frac{1000}{60} \cdot a \cdot L_s \cdot \Delta g_f, \quad (4)$$

где a – размер грани заготовки, м.

Пример использования предложенной зависимости (4) приведен на рис.1. Представленные результаты получены для следующих исходных данных, соответствующих разливке стали в сортовые заготовки на современной высокоскоростной МНЛЗ и нахождению заготовки в пределах 3-го сектора: длина сектора 4 м, скорость разливки 4 м/мин, сечение заготовки 130x130 мм, коэффициент пропорциональности в зависимости (2) 55 Вт·ч/(м³·К).

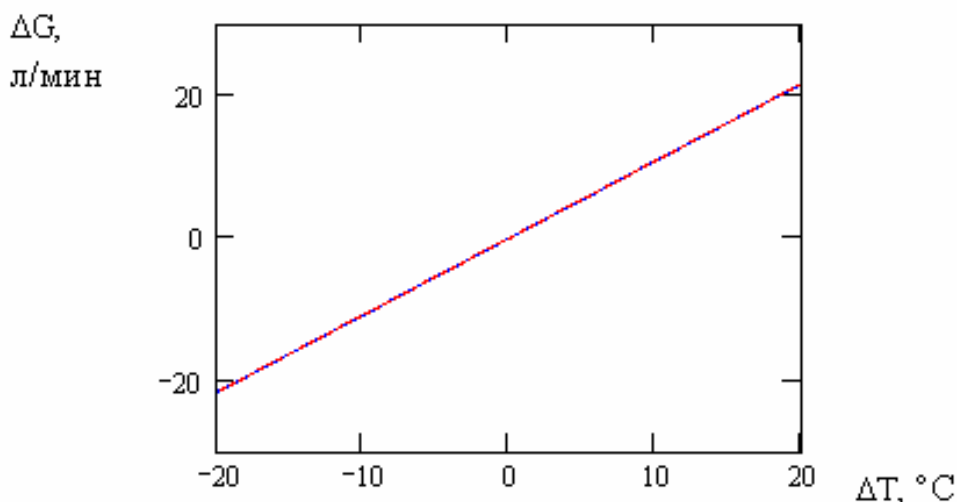


Рис. 1. Зависимость корректирующего расхода воды в зависимости от перепада измеренной и рекомендуемой температур

Выводы

Рассмотрено применение математической модели тепловой работы машины непрерывного литья заготовок как вспомогательного инструмента для автоматического управления технологическим процессом и мониторинга теплового состояния заготовок, формирующихся в зоне вторичного охлаждения.

Разработан алгоритм идентификации математической модели при помощи средств пирометрии, что позволяет в последующем получать эталонные значения температуры поверхности заготовки для заданных технологических параметров.

Решен вопрос определения уровня корректирующего воздействия на тепловое состояние заготовки путем изменения расхода охлаждающей воды на сектора зоны вторичного охлаждения при рассогласовании заданных и реальных параметров температурного состояния заготовки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок: учебн. пособие для вузов / В.А. Емельянов. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.
2. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: Учебник /А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан.– Донецк: ДонНТУ, 2011.– 482 с.
3. Бирюков А.Б. Теплотехника ресурсоэнергосберегающей разливки стали / А.Б. Бирюков, В.В. Кравцов, Н.С. Масс.– Донецк: Ноулидж, 2010. – 206 с.

УДК 621.39

В.В. Гнатушенко, Данладі Алі, О.І. Михальов

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ GPRS-МЕРЕЖІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ

Розроблено імітаційну модель мобільного зв'язку та проведені дослідження процесів передачі сигналу при використанні однієї та кількох мобільних станцій.

МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, БАЗОВА СТАНЦІЯ, GPRS-МЕРЕЖА, КАНАЛ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ТРАФІК.

Постановка проблеми

Швидкий прогрес телекомунікаційних технологій дозволив значно збільшити продуктивність і пропускну спроможність усіх видів мереж і створити багато нових видів послуг. Різко підвищився попит на надання інтегральних послуг (передача мови, даних, зображень, мультимедійної інформації) у рамках однієї мультисервісної мережі зв'язку. Нині спостерігається глобалізація усіх процесів. З'явилися глобальні телекомунікаційні мережі, в яких число абонентів досягає сотні тисяч. У зв'язку з цим важливим завданням є визначення повного навантаження на сервера в таких системах і дослідження властивостей трафіка.

Аналіз останніх досліджень

З розвитком технологій змінилася і сама структура процесів, що відбуваються в телекомунікаційних мережах. Були виявлені нові властивості трафіку: наявність самоподібної природи і довготривалої залежності досліджуваного процесу [1]. Але слід зазначити, що самоподібність трафіку спостерігається лише в певному діапазоні часових шкал і є підстави вважати, що трафік має більш складну структуру. Тобто трафік є неоднорідним, що відбувається внаслідок того, що в одному фізичному каналі є присутньою величезна кількість інформації, різної за своєю природою [2].

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Ціль роботи полягає у розробці імітаційної моделі GPRS-мережі та дослідженні процесів управління трафіком і мобільністю абонентів.

© Гнатушенко В.В., Алі Данладі, Михальов О.І., 2012

Основна частина

Можливості фізичного моделювання при аналізі мереж сильно обмежені. Воно дозволяє вирішувати лише окремі завдання при невеликій кількості комбінацій досліджуваних параметрів системи. Зняття, наприклад, статистичних характеристик з різних точок мережі надзвичайно утруднене. Якщо на робочій станції ще можна програмно зняти статистику використання інтерфейсу, то на комутаторі або в оптичній лінії зв'язку це стає практично неможливим. Тому при аналізі й оптимізації мереж у багатьох випадках кращим виявляється використання математичного моделювання. Особливим класом математичних моделей є імітаційні моделі. Такі моделі являють собою комп'ютерну програму, яка хронологічно крок за кроком відтворює події, що відбуваються в реальній системі. При імітаційному моделюванні мережі не потрібно здобувати дороге встаткування, тому що його робота імітується програмами, що досить точно відтворюють його усі основні особливості та параметри. Результатом роботи імітаційної моделі є зібрані в ході прогону моделі статистичні дані про найбільш важливі характеристики мережі: час реакції й затримки, коефіцієнти використання ресурсів мережі, імовірності втрат пакетів і т.п. Усе це дозволяє розглядати мережу не як «чорний ящик», а з погляду інформаційних процесів, що у ній протікають.

У даній роботі використовується система імітаційного моделювання Opnet Modeler, яка орієнтована на мережі зв'язку та дозволяє будувати моделі без програмування. Програма Opnet Modeler пропонує користувачам графічне середовище для створення, виконання й аналізу моделювання мереж зв'язку. Це зручне програмне забезпечення може бути використано для розв'язку багатьох завдань, наприклад, для перевірки протоколів зв'язку, аналізу взаємодій протоколів, оптимізації й планування мережі. Також можливо здійснити за допомогою програми перевірку правильності аналітичних моделей і опис протоколів. Порівняння різних сценаріїв розвитку мережі дозволяє уникнути помилок ще на етапі проектування й знизити витрати на переробку проекту до мінімуму. На підставі зібраних даних можна побачити наявність перевантажених ділянок мережі, які є критичною ланкою у функціонуванні всього мережного сегмента.

Побудуємо імітаційну модель для GPRS-мережі, користуючись OPNET [3]. Основна модель GPRS, подана на рис. 1, включає моделі

для блоків MS, BTS, BSC, SGSN, GGSN, HLR і приймача, які мають типову архітектуру та в даній роботі докладно не розглядаються. В оригінальній основній моделі GPRS ми змінили лише моделі вузлів HLR та SGSN, щоб отримати можливість підтримувати протокол MAP, який заснований на сигналізації між цими двома вузлами. Відповідні моделі цього процесу подано на рис. 2 і 3. Інша частина моделі не змінювалась. Приймач представляє зовнішню мережу передачі даних PDN і, отже, потік даних в цій моделі однонаправлений. Проте, сигнальний потік є двонаправленим. Модель, яка розроблена підтримує тільки шість базових станцій BTS. Є тільки одна базова станція BTS на соту і кожна BTS має область охоплення в діапазоні 15-20 км.

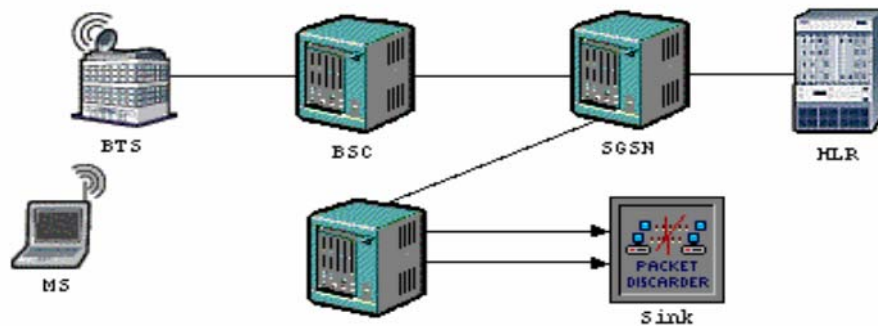


Рис.1. Модель мережі GPRS в програмі OPNET

Як відомо, управління мобільністю в мережі GPRS здійснюється так само, як і в GSM з тою лише різницею, що поряд з поняттям зони місця розташування (ЗМ) тут використовується поняття області маршрутизації (ОМ). При цьому одна ЗМ може містити декілька ОМ, які можна розглядати як пакетні підмережі й у межах яких проводиться пейджінг абонентів GPRS. Обслуговування активного абонента, що здійснює пакетну передачу, при перетинанні їм границь стільника засновано на процедурі визначення місця розташування мобільної станції (MS), яка може бути декількох видів залежно від того, яким обслуговуючим вузлом (ОВ) управляється поточний стільник. Стандартною є процедура відновлення даних про зміну стільника усередині ОМ, коли MS перебуває в режимі готовності. Процес відновлення даних припиняє процес передачі-приймання. При цьому, як правило, інформація копіюється у відповідний буфер ОВ і після поновлення процесу пакетної передачі доставляється абонентові. Однак можлива ситуація, при якій інформація губиться, і тоді її

необхідно передавати заново. Процес відновлення даних про зміну стільника усередині однієї ОМ часто називають перевизначенням стільника.

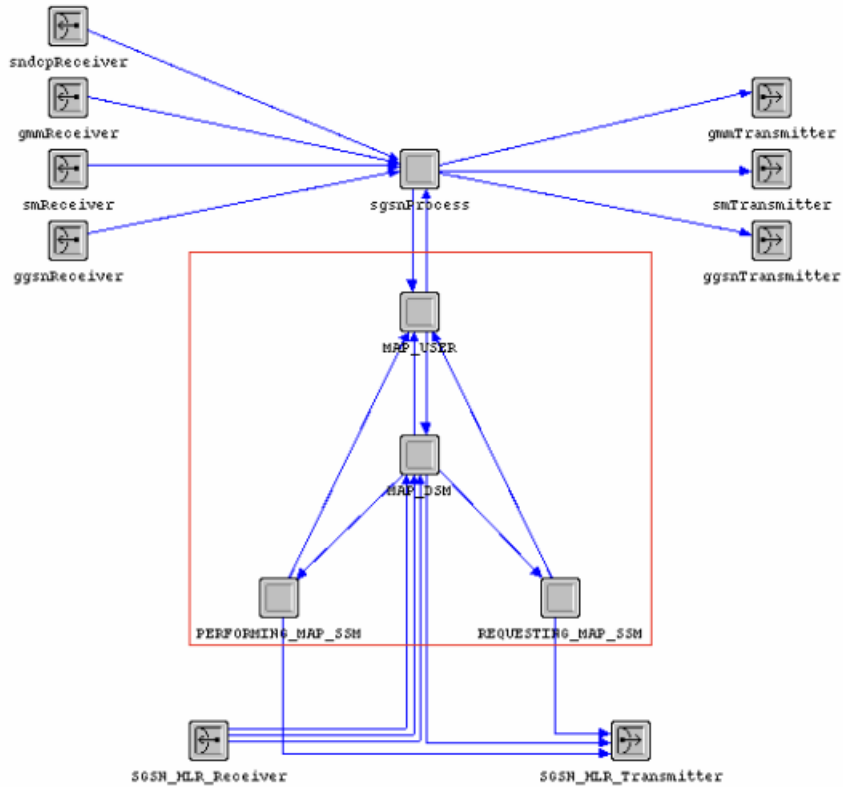


Рис. 2. Модель вузла SGSN

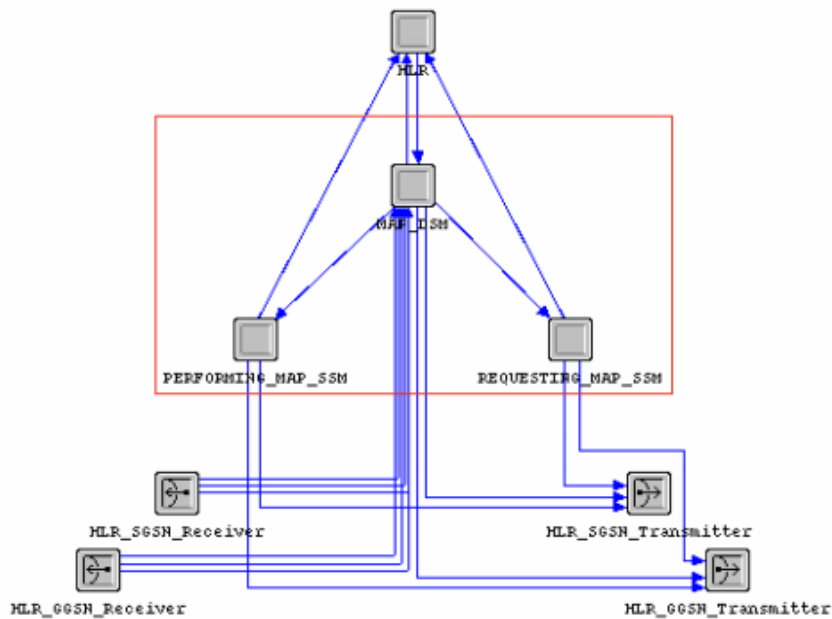


Рис. 3. Модель вузла HLR

При зміні стільників, що перебувають у різних областях маршрутизації, ініціюється процес відновлення даних про ОМ. При цьому обидві ОМ можуть управлятися або одним, або двома різними ОВ. У першому випадку відбувається внутрішнє перевизначення стільника, а в другому — зовнішнє, при якому колишній ОВ передає пакети даних новому ОВ. Процес відновлення даних про зміну ОМ часто називають перевизначенням області маршрутизації.

В роботі розглянуто три сценарія функціонування GPRS-мережі:

1. Підтвердження впливу використання підсистеми базових станцій BSS на наскрізній затримці пакетів. Було змодельовано три різних варіанти:

- одна мобільна станція з'єднана з базовою станцією релейною лінією без використання контролера базових станцій BSC;
- безпроводне з'єднання без контролера базових станцій BSC;
- безпроводне з'єднання з контролером базових станцій BSC.

Затримка передачі наскрізного пакету, призначеного для користувача, від мобільної станції до приймача даних вимірюється завдяки контролю реалізації безпроводного зв'язку і контролера базових станцій BSC. На рис. 4 подано три можливих сценарія затримки передачі наскрізного пакету від MS до приймача. Як і очікувалося, затримка передачі наскрізного пакету даних більша, коли MS була пов'язана з SGSN через BSC, ніж в двох інших сценаріях [3]. В роботі змодельовано два сценарії для перевірки процедури перевизначення стільника (стільникового оновлення).

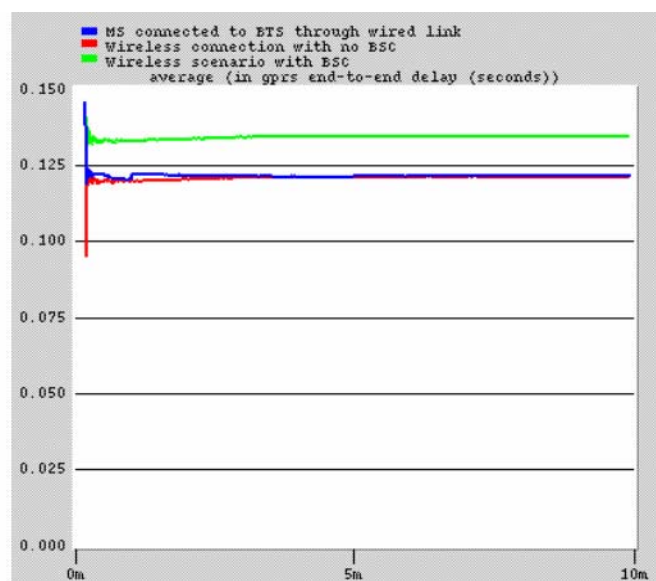


Рис. 4. Затримка передачі наскрізного пакету даних (в секундах)

2. Стільникове оновлення з однією мобільною станцією

Імітаційна модель цього сценарію показана на рис. 5. Мобільна станція рухається від однієї базової станції до іншої, тому на початку моделювання MS відноситься до BS 2, а в кінці моделювання — до BS 0. В цьому сценарії MS двічі здійснює стільникове перевизначення: від BS 2 до BS 1, і від BS 1 до BS 0. Ділянки пропускної спроможності на приймачах трьох базових станцій BTS показані на рис. 6, який ілюструє, що у будь-який момент часу тільки одна базова станція отримує дані.

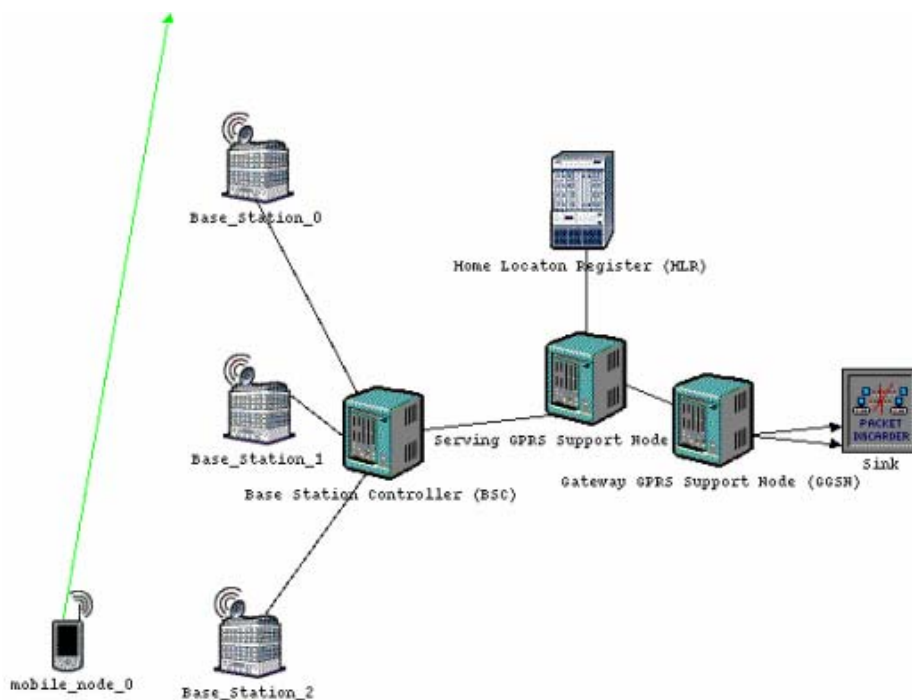


Рис. 5. Сценарій моделювання перевизначення стільника з однією MS

Потужність, отримана по каналах приймача, показана на рис. 7. На початку моделювання рівень потужності пакетів, отриманих від BS 2 є найвищим, і мобільна станція передає сигнал до BS 2. Оскільки MS рухається за своєю траєкторією, то рівень потужності пакетів від BS 2 стає слабшим, а від BS 1 стає сильнішим. Коли рівень потужності пакетів від базової станції 1 стає найвищим, MS розпочинає передачу до BS 1 (перше стільникове оновлення). Коли MS наближується до BS 0, рівень потужності пакетів від BS 0 стає більшим, і коли рівень потужності стає найвищим, мобільна станція розпочинає передачу до базової станції 0 (друге стільникове оновлення). Результати моделювання, подані на рис. 8, доводять, що стільникове оновлення було виконано успішно.

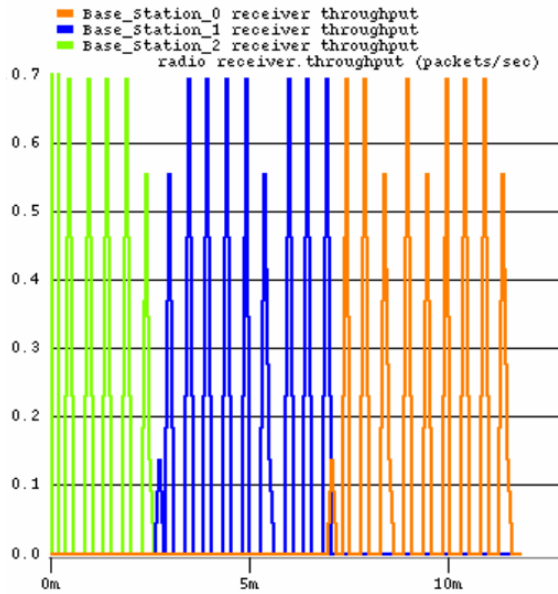


Рис. 6. Пропускна спроможність приймача, пакет/сек

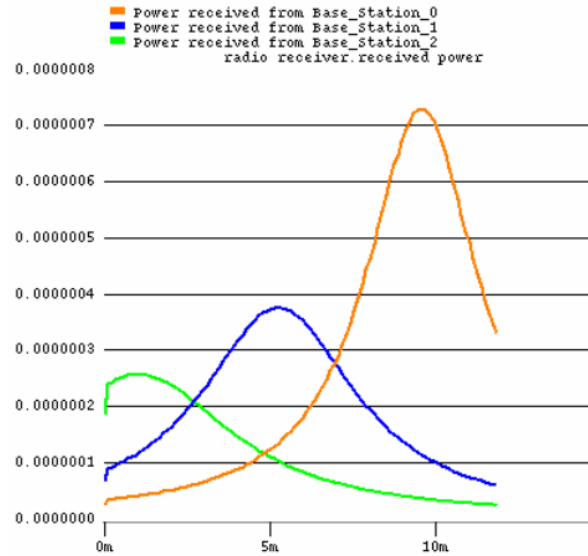


Рис. 7.– Сигнал, отриманий мобільною станцією

3. Стільникове оновлення з двома мобільними станціями

Цей сценарій перевіряє, що розподіл каналу приймача базової прийомно-передавальної станції виконаний вірно і стільникові оновлення проходять успішно, коли дві модульні станції передають дані до однієї і тієї ж базової станції. Імітаційна модель цього сценарію показана на рис. 9. На початку моделювання MS 0 знаходиться найближче до BS 2 і рухається уздовж своєї траєкторії. MS 1 рухається між базовими станціями 0 і 1. Канали приймання мобільних станцій встановлені так, щоб пакети даних від широкоповного каналу управління BCCH BS 0 були отримані в каналі 0, а пакети даних від BCCH BS 1 — в каналі 1 і пакети даних від BCCH BS 2 — в каналі 2. Частоти передачі мобільних станцій були обчислені на основі частоти приймання найближчої базової станції. Рис. 10 показує сигнал, отриманий MS 1 від різних базових станцій. Сигнал, отриманий від BS 2, є найнижчим з трьох сигналів, отриманих в різні моменти часу і, отже, мобільний сигнал не передається до BS 2. Пропускна спроможність каналу 1 на трьох базових станціях показана на рис. 11. MS 1 виконує стільникове оновлення двічі. Пакети від мобільної станції 1 отримують базові станції в прийомному каналі 1. Пропускна спроможність приймачів каналу 0 базової станції і пропускна спроможність передавача мобільної станції 0 показані на рис. 12.

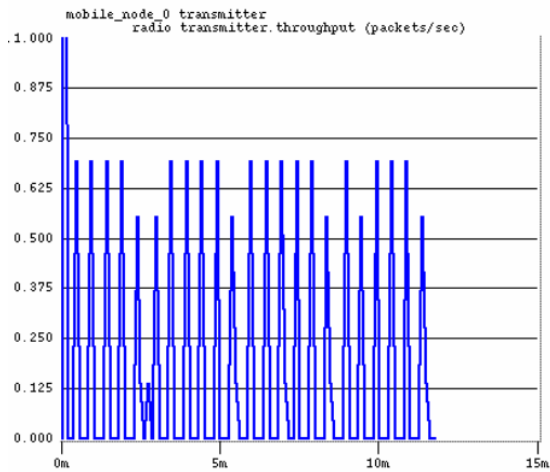


Рис. 8. Пропускна спроможність передавача мобільного вузла 0

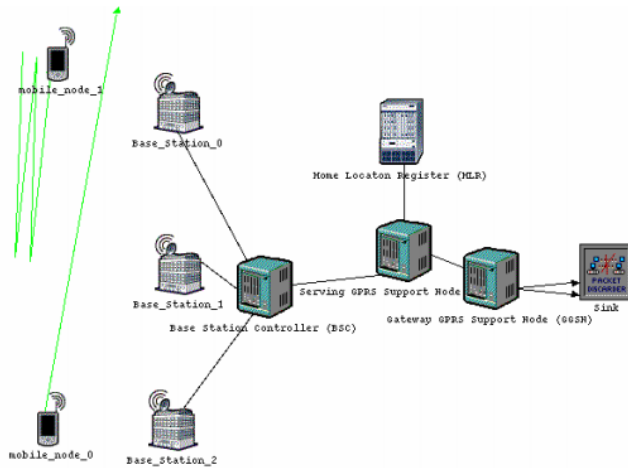


Рис. 9. Сценарій стільникового оновлення з використанням двох MS

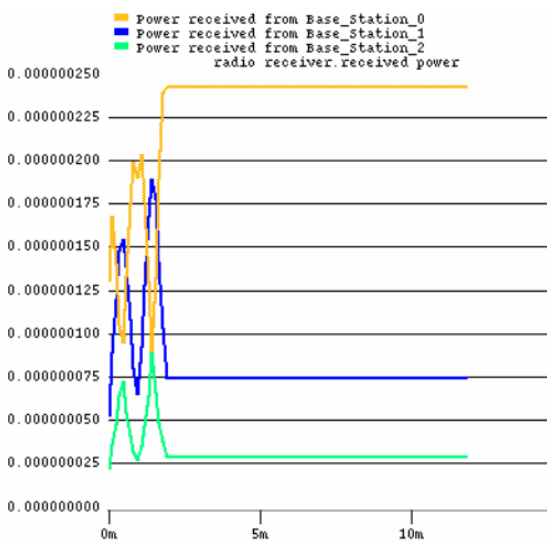


Рис. 10. Сигнал, отриманий MS 1 від різних BS

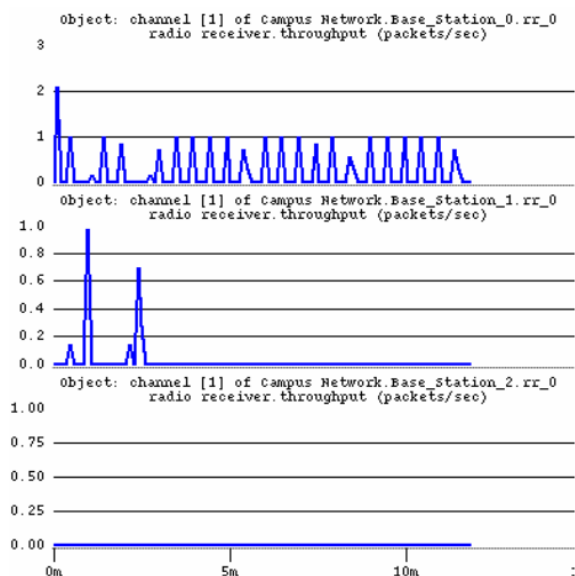


Рис. 11. Пропускна спроможність каналу 1

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведені дослідження процесів передачі сигналу з використанням однієї та кількох мобільних станцій за допомогою розробленої імітаційної моделі GPRS-мережі довели, що розміщення каналу в базових станціях виконується успішно, коли абонент переміщується. Система імітаційного моделювання Opnet Modeler є зручною та орієнтованою на мережі зв'язку, має графічне середовище для побудови, виконання й аналізу створеної моделі мережі. Повна модель OPNET GPRS є корисним інструментом для оцінки продуктивності і планування GPRS-мережі.

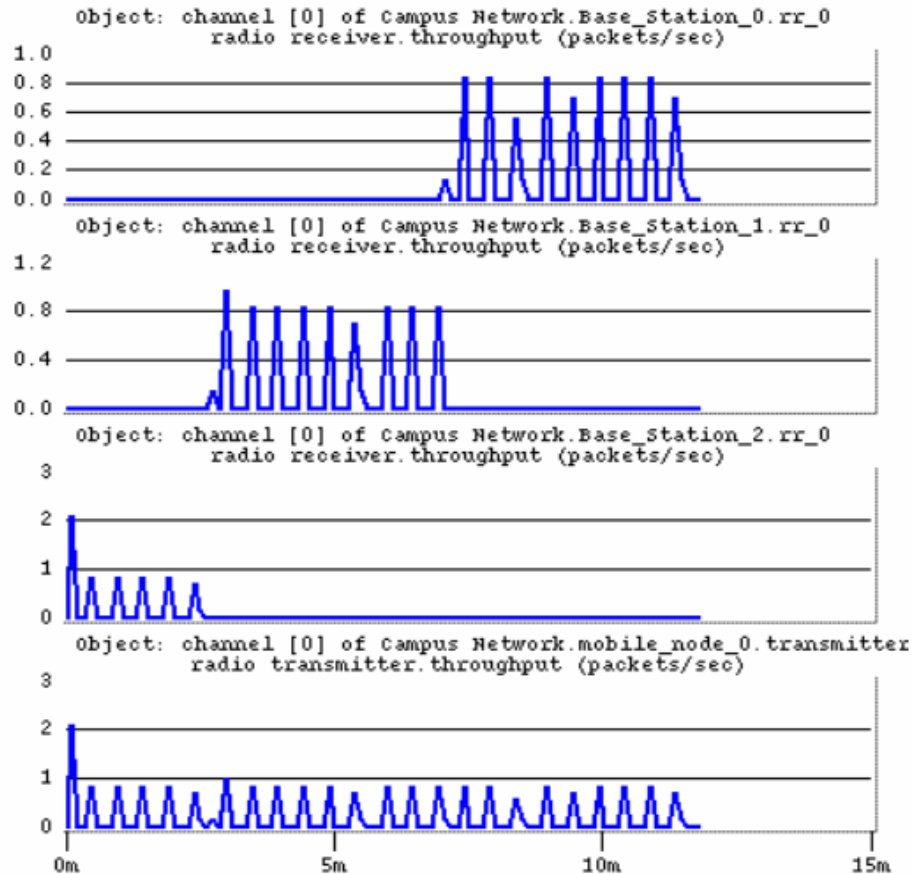


Рис.12. Пропускні спроможності каналу 0 на BS і передавача мобільної станції 0

ЛІТЕРАТУРА

1. Шелухин О.И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения / О.И. Шелухин – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 576 с.: ил.
2. Галактионова О.В. Моделирование и оценка параметров неоднородного входного потока в телекоммуникационных системах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / О.В. Галактионова. - Тверь, 2011. - 23 с.
3. Narayanan R. / Enhanced General Packet Radio Service OPNET Model // R. Narayanan, P. Chan, M. Johansson, F. Zimmermann, Lj.Trajkovic. — Vancouver, Canada.

Получено 10.02.2012 р.

УДК 519.711.3

Д.Ю. Кабаков, С.Є. Самохвалов

СПРЯЖЕНІ ПРОЦЕСИ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОПЕРЕНОСУ У КОВШІ ПІД ЧАС НАПОВНЕННЯ

У статті представлено математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів, які перебігають у ковші під час наповнення з одночасним продуванням розплаву інертним газом. Отримані завдяки розробленим програмам результати проаналізовані та порівняні з попередніми.

ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ, МЕХАНІКА СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ, КОВШОВА ОБРОБКА, ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ, ПРОГРАМУВАННЯ.

Важливою задачею розвитку промисловості України є ресурсозбереження при виробництві сталі, а також підвищення якості металопродукції та забезпечення її конкурентоспроможності на світовому ринку. Значне місце при цьому займають ковшова обробка сталі.

Математична модель теплопереносу у газорідинному середовищі розплав-газ, побудована у рамках концепції взаємодіючих та взаємопроникаючих континуумів по методиці, що описана у [1], була представлена у [2]. У [1], [2] та деяких інших роботах методи визначення теплового стану ковша не враховували гідродинамічні особливості поведінки розплаву металу, що вже не відповідає сучасним вимогам, так як процеси руху металу мають великий вплив на теплопереносні процеси. В статті [3] представлено тривимірну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші під час його продування.

В даній статті розглянуто математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші при продуванні крізь донні фурми під час наповнення, причому в даному випадку загальна гідродинамічна картина кардинально відрізняється від аналогічного стаціонарного випадку.

Динаміка газорідинного середовища описується наступною системою рівнянь. По-перше, це рівняння Нав'є-Стокса для випадку соленоїдального руху середовища газ-розплав:

© Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Є., 2012

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = R(\vec{v}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

де \vec{v} — барицентрична швидкість газорідного середовища, α — коефіцієнт об'ємного газозміщення, \tilde{p} — тиск, поділений на ρ_0 , t — час процесу і

$$R(\vec{v}, \alpha) = -(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} + v_e \Delta \vec{v} + \alpha \vec{g}, \quad (2)$$

де v_e — ефективний коефіцієнт в'язкості, \vec{g} — прискорення вільного падіння.

Рівняння (1) доповнено до повної системи рівнянь рівнянням нерозривності за умови соленоїдальності руху середовища:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0, \quad (3)$$

рівнянням переносу газової фази відносно α :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{v}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}) + \psi \quad (4)$$

та рівнянням конвективного теплопереносу в газорідному середовищі [1], записаному у наближенні малого α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{3}{2} \alpha) \vec{\nabla} T] / (1 - \alpha), \quad (5)$$

де ψ — об'ємне джерело газової фази, \vec{w} — дифузійна швидкість газової фази, T — температура середовища, a_e — коефіцієнт ефективною температуропровідності.

Система рівнянь згідно методу розщеплення за фізичними факторами, описаний у [4], може бути подана у наступному вигляді:

I етап

$$\vec{v} = \vec{v}^n + \tau R(\vec{v}^n, \alpha^n), \quad (6)$$

II етап

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = [\vec{\nabla} \cdot \vec{v}] / \tau, \quad (7)$$

III етап

$$\vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \tau \vec{\nabla} \tilde{p}^{n+1}, \quad (8)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau [-\vec{\nabla} \cdot (\alpha^n \vec{v}^{n+1}) - \vec{\nabla} \cdot (\alpha^n \vec{w}) + \psi], \quad (9)$$

$$T^{n+1} = T^n + \tau \left\{ -\vec{\nabla}^{n+1} \cdot \vec{\nabla} T^n + \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{3}{2} \alpha^n) \vec{\nabla} T^n] / (1 - \alpha^n) \right\}, \quad (10)$$

де τ — крок за часом, а верхні індекси означають номер часового шару.

На другому етапі розв'язується рівняння Пуассона відносно тиску. Для цього використано метод ітерацій, який не залежить від розрахункової області.

За розрахункову область взято усічений конус. Враховуючи тривимірну конфігурацію граничних умов та вільно розташовані аргонні фурми, задачу, що розглядається, розв'язано в повній тривимірній постановці в циліндричних координатах (r, ϕ, z) . Задачу розв'язано на шаховій сітці, що обрамлена шаром заграничних комірок. Скалярні величини задаються у центрах комірок, векторні – на гранях.

Граничні умови для швидкостей. Для паралельних швидкостей взято умову часткового прилипання на твердих поверхнях і умову вільного ковзання на осі симетрії. Для перпендикулярних швидкостей – умову непротікання. На вільній поверхні – умову вільного протікання.

Граничні умови для коефіцієнта газоміщення. На твердих поверхнях і осі симетрії прийнято умову непротікання, а на вільній поверхні – умову вільного протікання.

Граничні умови для теплопереносу. На стінках, вільній поверхні та днищі задано умови ефективною конвективної тепловіддачі з коефіцієнтами тепловіддачі, які лінійно залежать від температури (тобто різні на стінках, днищі та вільній поверхні).

Граничні умови, які враховують наповнення. Згідно заданого часу наповнення $T_{\text{нап}}$ вираховується середня швидкість дзеркала металу $V_{\text{дз}} = H / T_{\text{нап}}$, та час наповнення одного шару комірок по висоті $T_w = T_{\text{нап}} / MK$, де H – висота ковша, MK – кількість комірок по висоті. Швидкість струменю знаходиться по формулі:

$$V_{\text{стр}} = \frac{1^2}{(MI - 1)^2} V_{\text{дз}}, \quad (11)$$

де MI – кількість комірок по радіусу на поточній висоті (нагадаємо, що розрахункова область має форму усіченого конусу). $V_{\text{стр}}$ задається у перших комірках по радіусу на висоті поточного рівня металу, $V_{\text{дз}}$ – задається в усіх комірках на висоті поточного рівня металу, окрім тих, в яких задано швидкість струменю. Кожні T_w секунд рівень металу збільшується на одну комірку по висоті.

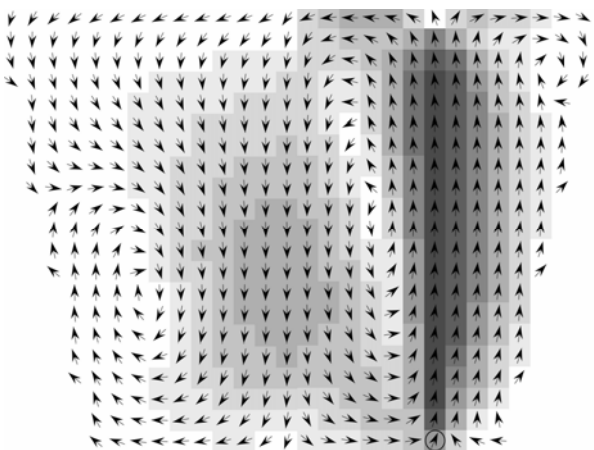
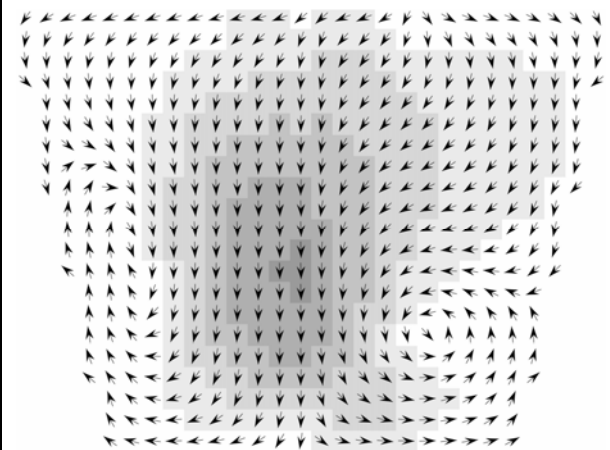
Подача газу через фурми проведена шляхом введення в місцях їх розташування джерела газової фази об'ємної густини:

$$\psi = \frac{q}{V_k}, \quad (12)$$

де q – розхід аргону через фурму в одиницю часу, V_k – об’єм зони формування барботажного режиму в області біля фурми (в розрахунках він дорівнює об’єму розрахункової комірки).

Подана математична модель була програмно реалізована у середовищі Qt на алгоритмічній мові C++. В розрахунках були прийняті наступні параметри: верхній радіус ковша: 2.8 м, нижній радіус ковша: 2 м, висота ковша: 4.2 м; донні фурми були розташовані кутах на 49° та 311° , відстань від осі симетрії до фурм: 1.2 м, розхід аргону через одну фурму: $0.0001 \text{ м}^3/\text{с}$ (6 л/хв); час наповнення: 300 с, початковий рівень металу: 1.5 м; початкова температура металу та струменю металу: 1600°C , температура навколишнього середовища: 30°C , теплопровідність на стінках: $35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, на дні: $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$, температура над вільною поверхнею металу: 1200°C , теплопровідність вільної поверхні: $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$.

Далі аналізуємо результати, отримані на 320 секунді після початку наповнення і продування.

<p>Розподіл швидкостей та поле їх напрямків у поперечному перерізі. Зафарбування від 0–0.02(білий) до 0.16 м/с. Колом позначена фурма.</p>	
	
<p>Рис. 1. Переріз, у якому розташована фурма</p>	<p>Рис. 2. Рівновіддалений від обох фурм переріз</p>

На рисунку 1 можна побачити, що найбільшого значення швидкості сягають над фурмою – 0.16 м/с . На рисунках 1 і 2 присутні «залишки» швидкостей від струменю по центру ковша. Потік струменю підхоплюється потоком, що утворився завдяки продуванням газом, утворюючи великий вихор, який зменшує інтенсивність підводу теплого металу зі струменю до стінок. Це

можна побачити на рисунку 1 – переваження вертикальних швидкостей над радіальними у зоні між потоком газу та стінкою очевидно. Саме завдяки цьому, згідно рис. 3 та 4, можна побачити, що найменшого охолодження зазнала зона між фурмою та стінкою.

Розподіл температур.

1 – більше 1598 °С; 2 – від 1596 до 1598 °С; 3 – від 1954 до 1956 °С; 4 – менше 1954 °С. Колом позначена фурма.

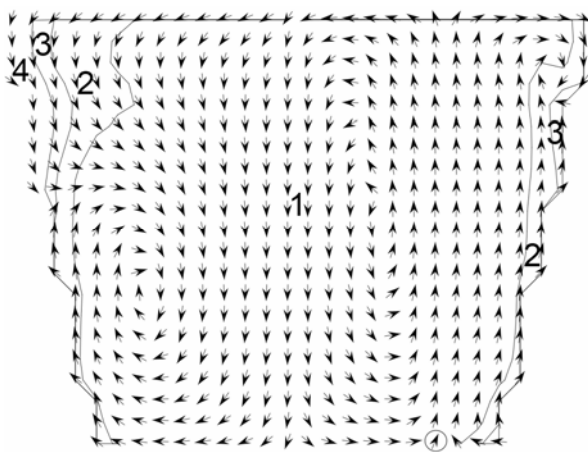


Рис. 3. Переріз, у якому розташована фурма

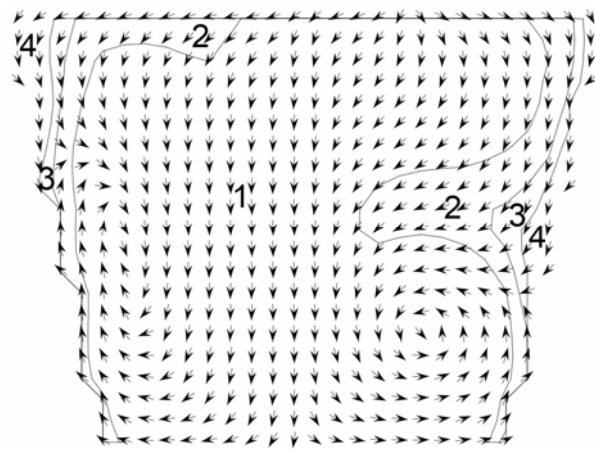


Рис. 4. Рівновіддалений від обох фурм переріз

Проаналізувавши поле напрямків швидкостей, бачимо, що найбільше охолоджується метал у тих зонах, де потоки металу постійно підганяють теплий метал до стінок, а охолоджений переносять від них (рис. 4). Рис. 2 зазначає наявність швидкостей відмінних від 0 у розглянутій зоні.

Ізоповерхні температур. Рівні від 1599 до 1600 °С з кроком 0.25.

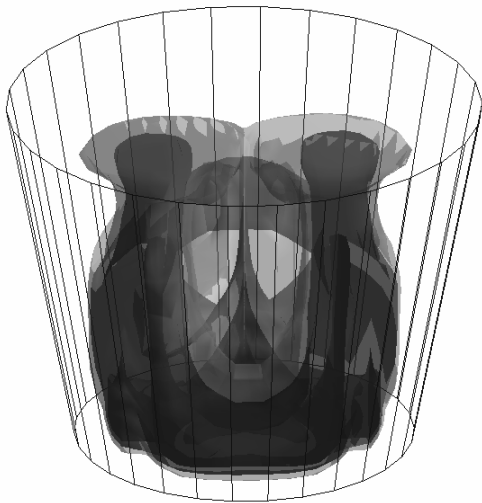


Рис. 5. Ізоповерхні температур

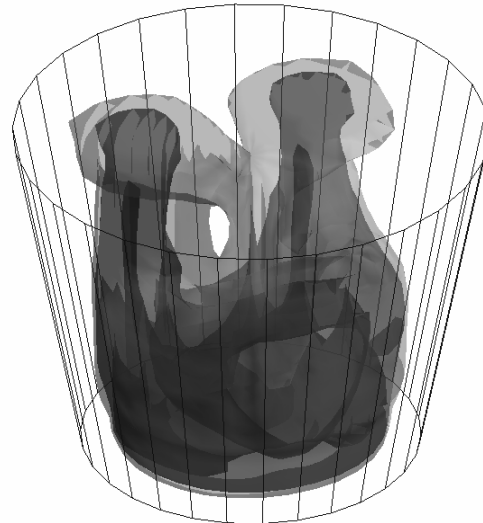


Рис. 6. Ізоповерхні температур

На рисунках 5 і 6 представлено ізоповерхні розподілу температур, що розглядаються під різними кутами. Для побудови таких поверхонь у розробленому пакеті програм реалізовано алгоритм Marching Cubes.

Висновки

Побудовано математичну модель спряжених гідродинамічних та теплопереносних процесів у ковші під час наповнення та продування. Для реалізації моделі було розроблено пакет програм. Ця стаття також показує, що якщо продування ведеться під час наповнення, то в околофурмених зонах можна спостерігати найменше охолодження по відношенню до інших зон у ковші.

У майбутньому планується реалізація моделювання наповнення з можливістю встановлення струменю не тільки по центру ковша, а також врахування кута падіння струменю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 174 с.;
2. Исследования тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Ч.1. Математическая модель /В.П. Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А. Павлюченков и др. //Теория и практика металлургии. – 2008. – № 3. – С. 3-5.;
3. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше /Гресс А.В., Самохвалов С.Е., Стороженко С.А., Кабаков Д.Ю. //Математичне моделювання. – 2011. – №2(25). – с. 119-122.;
4. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж.. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: «Системные технологии», 2003.

УДК 622.647.82:51.001.57

Р.В. Кирия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АККУМУЛИРУЮЩЕГО БУНКЕРА КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

На основе теории марковских процессов с помощью метода Ховарда получена математическая модель функционирования аккумулирующего бункера, работающего в системе подземного конвейерного транспорта угольных шахт. Определено среднее количество груза в бункере в зависимости от параметров загружаемого и разгружаемого грузопотоков для различных состояний надбункерной и подбункерной конвейерных линий.

АККУМУЛИРУЮЩИЙ БУНКЕР, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ, ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ.

В настоящее время широкое распространение в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт получили аккумулирующие бункеры.

Аккумулирующие бункеры предназначены для обеспечения независимой работы смежных технологических звеньев транспорта в периоды их кратковременных отказов в работе или остановок по той или иной причине, а также для уменьшения влияния простоев конвейерных линий на работу очистных и подготовительных забоев.

Применение аккумулирующих бункеров в системах подземного конвейерного транспорта позволяет значительно повысить пропускную способность и надежность их работы.

Для эффективной работы аккумулирующих бункеров в системе подземного конвейерного транспорта угольных шахт в бункере необходимо поддерживать некоторый объем груза. Причем величина этого объема зависит от места расположения бункера в системе конвейерного транспорта.

Однако эффективность функционирования аккумулирующих бункеров на угольных шахтах невысокая из-за недостаточной автоматизации процесса его управления.

Одним из путей повышения эффективности процесса управления аккумулирующими бункерами угольных шахт является применение

© Кирия Р.В., 2012

компьютерных технологий на основе контроллеров (промышленных компьютеров). Но для управления аккумулирующими бункерами на основе контроллеров необходимо моделировать процессы, происходящие в аккумулирующем бункере при его работе в системе подземного конвейерного транспорта угольных шахт.

При математическом моделировании функционирования аккумулирующих бункеров загружаемый в бункер грузопоток можно представить в виде прямоугольных импульсов с высотой, равной средней минутной производительности загружаемого грузопотока, и интервалов его отсутствия, распределенных по экспоненциальному закону (рис. 1).

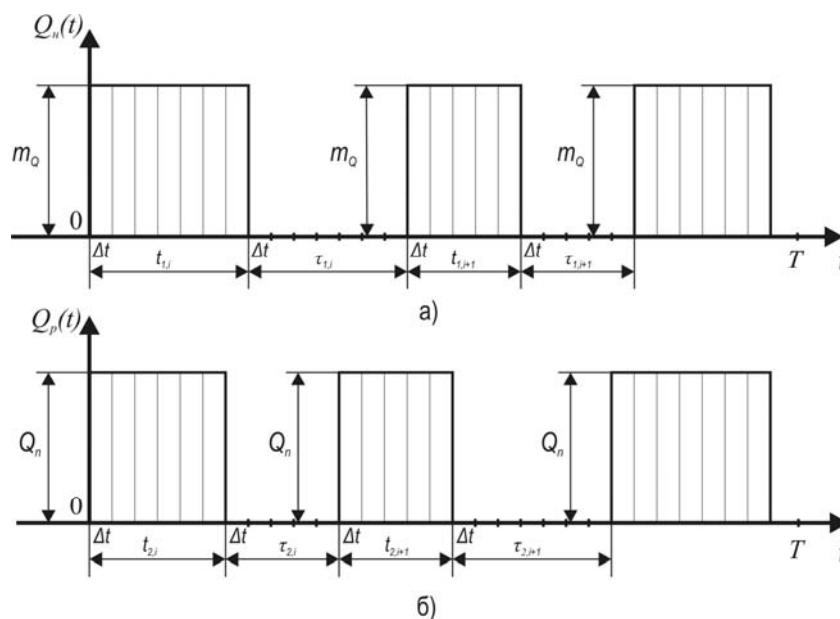


Рис. 1. Графики поступающего в аккумулирующий бункер грузопотока (а) и выходящего из аккумулирующего бункера грузопотока (б)

При этом, согласно [1,2], интервалы работы t и простоя τ конвейерного оборудования распределены по экспоненциальному закону с плотностью распределения

$$\begin{aligned} f(t) &= \lambda \exp(-\lambda t), \\ f(\tau) &= \mu \exp(-\mu \tau), \end{aligned}$$

где $\lambda = 1/T_{cp}$ – параметр распределения времени поступления груза в бункер, 1/мин; T_{cp} – среднее время поступления груза в бункер, равное среднему времени работы конвейерной линии, мин; $\mu = 1/T_{cn}$ – параметр распределения времени отсутствия груза, 1/мин; T_{cn} –

среднее время отсутствия поступления груза в бункер, равное среднему времени простоя конвейерной линии.

Предположим, что при поступлении груза в бункер средняя производительность надбункерной конвейерной линии постоянна и равная m_{Q1} , а в месте разгрузки бункера средняя производительность питателя постоянна и равна m_{Q2} . Тогда грузопоток, поступающий в бункер, согласно [3,4], описывается случайной функцией ζ_1 с математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией, равными

$$\begin{aligned} M[\zeta_1] &= m_{Q1} \cdot \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}, & D[\zeta_1] &= m_{Q1}^2 \cdot \frac{\lambda_1 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2}, \\ R_{Q1}(\tau) &= m_{Q1}^2 \frac{\lambda_1 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \cdot e^{-(\mu_1 + \lambda_1)\tau}, \end{aligned} \quad (1)$$

где λ_1, μ_1 – параметры экспоненциального закона распределения времени работы и времени простоя надбункерной конвейерной линии, соответственно, 1/мин.

По аналогии с предыдущим, разгружаемый из бункера грузопоток описывается случайной функцией ζ_2 с математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией, равными

$$\begin{aligned} M[\zeta_2] &= m_{Q2} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}, & D[\zeta_2] &= m_{Q2}^2 \cdot \frac{\lambda_2 \mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2}, \\ R_{Q2}(\tau) &= m_{Q2}^2 \frac{\lambda_2 \mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \cdot e^{-(\mu_2 + \lambda_2)\tau}, \end{aligned} \quad (2)$$

где λ_2, μ_2 – параметры экспоненциального закона распределения времени работы и времени простоя подбункерной конвейерной линии, соответственно, 1/мин.

При этом вероятности работы надбункерной и подбункерной конвейерных линий равны

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}, \quad P_2 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}. \quad (3)$$

Обозначим через V_σ количество груза, находящегося в данный момент t в бункере.

Рассмотрим вначале случай, когда $m_{Q1} > m_{Q2}$. Величина V_σ является случайной функцией, которая определяется согласно корреляционной теории [5] по формуле

$$V_\sigma = \int_0^t (\zeta_1 - \zeta_2) dt \quad (4)$$

или

$$V_6 = \int_0^t \zeta_1 dt - \int_0^t \zeta_2 dt \quad (5)$$

При больших m_{Q1} , на много больших m_{Q2} ($m_{Q1} \gg m_{Q2}$), согласно закону больших чисел [1], случайная функция V_6 распределена по нормальному закону, ее математическое ожидание и дисперсия равны

$$M[V_6] = \int_0^t M[\zeta_1] dt - \int_0^t M[\zeta_2] dt, \quad (6)$$

$$D_V = D_{V1} + D_{V2}, \quad (7)$$

где

$$D_{V1} = 2 \int_0^t (t - \tau) R_{Q1}(\tau) d\tau \quad ; \quad D_{V2} = 2 \int_0^t (t - \tau) R_{Q2}(\tau) d\tau$$

Подставляем значения $M[\zeta_1]$, $M[\zeta_2]$, $R_{Q1}(\tau)$, $R_{Q2}(\tau)$, определенные по формулам (1) и (2), в (6) и (7), после интегрирования получим

$$M[V_6] = (P_1 \cdot m_{Q1} - P_2 \cdot m_{Q2}) \cdot t, \quad (8)$$

$$D_{V1} = \frac{2\mu_1\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)} m_{Q1}^2 \left[\frac{e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t}}{(\lambda_1 + \mu_1)} + \frac{t}{\lambda_1 + \mu_1} - \frac{1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \right], \quad (9)$$

$$D_{V2} = \frac{2\mu_2\lambda_2}{(\lambda_2 + \mu_2)} m_{Q2}^2 \left[\frac{e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}}{(\lambda_2 + \mu_2)} + \frac{t}{\lambda_2 + \mu_2} - \frac{1}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \right]. \quad (10)$$

Среднее квадратическое отклонение функции V_6 определяется по формуле

$$\sigma_V = \sqrt{D_{V1} + D_{V2}}. \quad (11)$$

Полученные соотношения (8)–(11), описывающие процесс функционирования аккумулирующих бункеров, справедливы при $m_{Q1} > m_{Q2}$. Однако при $m_{Q1} \leq m_{Q2}$ эти соотношения не справедливы.

При $m_{Q1} \leq m_{Q2}$ процесс накопления угля в бункере можно описать уравнением Колмогорова, справедливым для двухфазных марковских процессов [2].

Решение этих уравнений связано с большими математическими трудностями, поэтому для исследования процессов, происходящих в аккумулирующих бункерах, применим метод Ховарда, справедливый для марковских процессов с доходами [6].

Рассмотрим процесс накопления груза в бункере как марковский процесс с непрерывным временем и четырьмя состояниями.

В первом состоянии этого процесса надбункерная и подбункерная конвейерные линии работают. В этом случае в аккумулирующий бункер в единицу времени поступает количество груза m_Q и убывает из него количество груза Q_n . Следовательно в этом состоянии количество груза в бункере в единицу времени увеличивается на величину $q_1 = (m_Q - Q_n)/\gamma$ (м³).

Во втором состоянии надбункерная конвейерная линия простаивает, подбункерная конвейерная линия работает. В этом случае количество груза в бункере в единицу времени увеличивается на величину $q_2 = -Q_n/\gamma$ (м³).

В третьем состоянии надбункерная конвейерная линия работает, а подбункерная конвейерная линия простаивает. В этом случае в аккумулирующем бункере в единицу времени количество груза увеличивается на величину $q_3 = m_Q/\gamma$ (м³).

В четвертом состоянии одновременно простаивают надбункерная и подбункерная конвейерные линии. В этом случае в аккумулирующем бункере количество груза в единицу времени не изменяется, т.е. $q_4 = 0$.

Полагая, что параметры потоков отказов и восстановлений надбункерной и подбункерной конвейерных линий равны соответственно λ_1, μ_1 и λ_2, μ_2 , систему уравнений доходов Ховарда [6] запишем в виде

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = q_1 - (\lambda_1 + \lambda_2)V_1 + \lambda_1 V_2 + \lambda_2 V_3, \\ \frac{dV_2}{dt} = q_2 + \mu_1 V_1 - (\lambda_2 + \mu_1)V_2 + \lambda_2 V_4, \\ \frac{dV_3}{dt} = q_3 + \mu_2 V_1 - (\lambda_1 + \mu_2)V_3 + \lambda_1 V_4, \\ \frac{dV_4}{dt} = q_4 + \mu_2 V_2 + \mu_2 V_3 - (\mu_1 + \mu_2)V_4, \end{cases} \quad (12)$$

где V_1, V_2, V_3, V_4 – объемы груза в бункере в начальный момент времени t , соответствующие первому, второму, третьему и четвертому состояниям процесса накопления груза в бункере, м³.

При этом начальные условия имеют вид: при $t = 0$ $V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = 0$.

Решение системы уравнений (12) в общем случае связано с большими математическими трудностями.

Поэтому упростим задачу, воспользуясь тем, что простой одновременно надбункерного и подбункерного конвейеров является маловероятным событием.

В этом случае система уравнений Ховарда (12) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = q_1 - (\lambda_1 + \lambda_2)V_1 + \lambda_1 V_2 + \lambda_2 V_3, \\ \frac{dV_2}{dt} = q_2 + \mu_1 V_1 - \mu_1 V_2, \\ \frac{dV_3}{dt} = q_3 + \mu_2 V_1 - \mu_2 V_3. \end{cases} \quad (13)$$

При этом выполняются начальные условия: при $t = 0$ $V_1 = V_2 = V_3 = 0$.

Запишем систему уравнений (13) в матричной форме:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{Q} + \bar{A} \cdot \bar{V}, \quad (14)$$

где

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}; \quad \bar{Q} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}; \quad (15)$$

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 \\ \mu_2 & 0 & -\mu_2 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Для решения (13) применим преобразование Лапласа [7]. С учетом начальных условий получим решение уравнения (14) в изображениях в матричном виде:

$$\bar{V}(s) = \frac{1}{s} (s\bar{I} - \bar{A})^{-1} \bar{Q}, \quad (17)$$

где \bar{I} – единичная матрица; s – параметр преобразований Лапласа.

Подставляя значения \bar{Q} и \bar{A} из (15) и (16) в (17), после преобразования получим

$$\begin{cases} \bar{V}_1(s) = \frac{(s + \mu_1)(s + \mu_2)}{\Delta} q_1 + \frac{\lambda_1(s + \mu_2)}{\Delta} q_2 + \frac{\lambda_2(s + \mu_1)}{\Delta} q_3, \\ \bar{V}_2(s) = \frac{\mu_1(s + \mu_2)}{\Delta} q_1 + \frac{(s + \lambda_1 + \lambda_2)(s + \mu_2) - \lambda_2\mu_2}{\Delta} q_2 + \frac{\lambda_2\mu_1}{\Delta} q_3, \\ \bar{V}_3(s) = \frac{\mu_2(s + \mu_1)}{\Delta} q_1 + \frac{\lambda_1\mu_2}{\Delta} q_2 + \frac{(s + \lambda_1 + \lambda_2)(s + \mu_1) - \lambda_1\mu_1}{\Delta} q_3, \end{cases} \quad (18)$$

где $\bar{V}_1(s), \bar{V}_2(s), \bar{V}_3(s)$ – изображения функций $V_1(t), V_2(t), V_3(t)$;

$$\Delta = s^2(s + \lambda_1 + \mu_1)(s + \lambda_2 + \mu_2).$$

Произведя обратные преобразования Лапласа к левым и правым частям выражения (18), получим решение системы уравнений (13) в виде:

$$\begin{aligned} V_1(t) = & (\mu_1\mu_2q_1 + \lambda_1\mu_2q_2 + \lambda_2\mu_1q_3)a_0t + \\ & + \{[\mu_1\mu_2b_0 + (\mu_1 + \mu_2)a_1]q_1 + (\lambda_1\mu_2b_0 + \lambda_1a_1)q_2 + (\lambda_2\mu_1b_0 + \lambda_2a_1)q_3\} + \\ & + \left\{ \left[\mu_1\mu_2c_0 + (\mu_1 + \mu_2)b_1 - \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_1 + (\lambda_1\mu_2c_0 + \lambda_1b_1)q_2 + \right. \\ & + (\lambda_2\mu_1c_0 + \lambda_2b_1)q_3 \left. \right\} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t} + \\ & + \left\{ \left[\mu_1\mu_2d_0 + (\mu_1 + \mu_2)c_1 + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_1 + (\lambda_1\mu_2d_0 + \lambda_1c_1)q_2 + \right. \\ & \left. + (\lambda_2\mu_1d_0 + \lambda_2c_1)q_3 \right\} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} V_2(t) = & (\mu_1\mu_2q_1 + \lambda_1\mu_2q_2 + \lambda_2\mu_1q_3)a_0t + \\ & + \{(\mu_1\mu_2b_0 + \mu_1a_1)q_1 + [\lambda_1\mu_2b_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)a_1]q_2 + \lambda_2\mu_1b_0q_3\} + \\ & + \left\{ (\mu_1\mu_2c_0 + \mu_1b_1)q_1 + \left[\lambda_1\mu_2c_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)b_1 - \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_2 + \right. \\ & + \lambda_2\mu_1c_0q_3 \left. \right\} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t} + \\ & + \left\{ (\mu_1\mu_2d_0 + \mu_1c_1)q_1 + \left[\lambda_1\mu_2d_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2)c_1 + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_2 + \right. \\ & \left. + \lambda_2\mu_1d_0q_3 \right\} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} V_3(t) = & (\mu_1\mu_2q_1 + \lambda_1\mu_2q_2 + \lambda_2\mu_1q_3)a_0t + \\ & + \{(\mu_1\mu_2b_0 + \mu_2a_1)q_1 + \lambda_1\mu_2b_0q_3 + [\lambda_2\mu_1b_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)a_1]q_3\} + \\ & + \{(\mu_1\mu_2c_0 + \mu_2b_1)q_1 + \lambda_1\mu_2c_0q_2 + \\ & + \left[\lambda_2\mu_1c_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)b_1 - \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_3 \left. \right\} e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t} + \\ & + \{(\mu_1\mu_2d_0 + \mu_2c_1)q_1 + \lambda_1\mu_2d_0q_2 + \\ & + \left[\lambda_2\mu_1d_0 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1)c_1 + \frac{1}{\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2} \right] q_3 \left. \right\} e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a_0 = a_1 &= \frac{1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}, \quad b_0 = -\frac{(\lambda_1 + \mu_1 + \lambda_2 + \mu_2)}{(\lambda_1 + \mu_1)^2(\lambda_2 + \mu_2)^2}, \\ c_0 &= -\frac{1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2(\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2)}, \quad d_0 = \frac{1}{(\lambda_2 + \mu_2)^2(\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2)}, \\ b_1 &= \frac{1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2)}, \quad c_1 = -\frac{1}{(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_1 + \mu_1 - \lambda_2 - \mu_2)}, \\ q_1 &= \frac{m_Q - Q_n}{\gamma}; \quad q_2 = -\frac{Q_n}{\gamma}; \quad q_3 = \frac{m_Q}{\gamma}. \end{aligned} \quad (22)$$

При достаточно больших t ($t \rightarrow \infty$) членами при экспонентах в формулах (19)–(21) можно пренебречь. После подстановки параметров из (22) для больших t ($t \rightarrow \infty$) формулы (19)–(21) после преобразования примут вид

$$\begin{cases} V_1(t) = \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma} \right) t + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma}, \\ V_2(t) = \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma} \right) t - \frac{\mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma}, \\ V_3(t) = \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma} \right) t + \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} + \frac{\mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma}. \end{cases} \quad (23)$$

Из последних равенств (23) следует, что при больших t ($t \rightarrow \infty$) и скорости питателя Q_n , близкой к значению Q_n^* , равному

$$Q_n^* = \frac{\mu_1}{\mu_2} \left(\frac{\lambda_2 + \mu_2}{\lambda_1 + \mu_1} \right) m_Q, \quad (24)$$

т.е. при $Q_n \rightarrow Q_n^*$ объем груза в бункере, независимо от первоначального состояния, принимает постоянное (стационарное) значение.

Из последнего равенства видно, что при $t \rightarrow \infty$, значениях Q_n , приближающихся к Q_n^* , средний объем груза в аккумулирующем бункере V_c приближается к нулю, т.е. при $Q_n \rightarrow Q_n^*$ ($t \rightarrow \infty$) $V_c \rightarrow 0$.

Среднее количество груза в бункере, независимо от начального состояния надбункерного и подбункерного конвейеров, согласно формуле полной вероятности [1] определяется по формуле:

$$V_c = P_1 V_1(t) + P_2 V_2(t) + P_3 V_3(t), \quad (25)$$

где P_1 – вероятность того, что надбункерный и подбункерный конвейеры работают одновременно; P_2 – вероятность того, что надбункерный конвейере простаивает, а подбункерный конвейер работает; P_3 – вероятность того, что надбункерный конвейере работает, а подбункерный конвейер простаивает.

Величины P_1 , P_2 , P_3 определяются как вероятности состояний системы, состоящей из последовательно независимых надбункерной и подбункерной конвейерных линий.

Согласно [8] имеем

$$P_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}; \quad P_2 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}; \quad P_3 = \frac{\lambda_2 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)}. \quad (26)$$

Подставляя последние равенства (26) в выражение (25), после преобразования получим

$$V_c = \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma} \right) t + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \left(\frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{m_Q}{\gamma} - \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{Q_n}{\gamma} \right). \quad (27)$$

В равенстве (27), в силу малости произведения $\lambda_1 \lambda_2$ ($\lambda_1 \lambda_2 \ll 1$), пренебрегаем вторым слагаемым. В результате средний объем груза в бункере определяется по формуле

$$V_c = \frac{1}{\gamma} (\bar{m}_Q - \bar{Q}_n) t. \quad (28)$$

Следовательно, средний объем груза в аккумулялирующем бункере прямо пропорционален разности средних производительностей поступающего и разгружаемого грузопотоков и времени работы бункера.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
2. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М.: Советское радио, 1974. – 296 с.
3. Шахмейстер Л. Г. Вероятностные методы расчета транспортных машин / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1983. – 256 с.
4. Кирия Р. В. Минимальный объем аккумулялирующего бункера / Р. В. Кирия, Д. Д. Брагинец // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 69. – С. 43–50.
5. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 464 с.

6. Ховард Р. А. Динамическое программирование и марковские процессы / Р. А. Ховард. – М.: Советское радио, 1964. – 192 с.
7. Лаврентьев М. А. Методы теории функций комплексного переменного / М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. – М.: Наука, 1987. – 688 с.
8. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОКОРРЕЛИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЖОРДАНОВЫХ ТРАЕКТОРИЯХ

Предложена модель автокоррелированных последовательностей измерений на жордановых траекториях, которая учитывает корреляционную связь между крайними её членами. Определены допустимые параметры такой модели и получены алгоритмы формирования соответствующих ей последовательностей, основные свойства которых были исследованы и подтверждены вычислительными экспериментами.

МОДЕЛЬ, АВТОРЕГРЕССИЯ, КОРРЕЛЯЦИЯ, ЖОРДАНОВА КРИВАЯ.

Постановка задачи

Знание моделей измерений технических объектов необходимо для проектирования информационно-измерительных технологий их неразрушающего контроля качества и мониторинга состояния. Без моделей измерений невозможна разработка решающих правил контроля, оценка их эффективности и прогноз остаточного ресурса [1].

В [2] рассматриваются объекты контроля, информативный параметр которых измеряется вдоль жордановой траектории. Примерами таких объектов могут быть сварные швы труб и железнодорожные колеса, в которых скорость распространения ультразвука и напряженность магнитного поля рассеяния измеряются по окружности, являющейся частным случаем кривой Жордана. Предполагается, что измерения объекта вдоль жордановой траектории выполняются с одинаковым шагом, и их модель может быть представлена в виде

$$H(i) = H_0(i) + \Delta H(i),$$

где i - номер точки измерения на жордановой траектории, $i \in [1, n]$ n - количество точек измерений, $i, n \in \mathbb{N}$; $H_0(i)$ - детерминированная медленно меняющаяся функция; $\Delta H(i)$ - флуктуации измеряемого параметра относительно $H_0(i)$.

Флуктуации $\Delta H(i)$ представляют собой автокоррелированную последовательность случайных величин. Ввиду того, что при измерениях по жордановой траектории за последней точкой измерений, с номером $i = n$, следует первая $i = 1$, то между членами последовательности $\{z_i\} = \{\Delta H(i)\}$, расположенных на концах, имеется корреляционная связь. В [3] предложена модель последовательностей с указанным свойством, которая имеет вид (1). Она получена на основе известной дискретной модели Марковской последовательности для точек $i > 1$ с добавленным условием замыкания в точке $i = 1$

$$\begin{cases} z_1 = \alpha z_n + \delta \xi_1, & i = 1, \\ z_i = \alpha z_{i-1} + \delta \xi_i, & i > 1; \end{cases} \quad (1)$$

где $\{\xi_i\}$ - последовательность независимых случайных величин; α и δ - постоянные множители.

Порядок модели (1) может оказаться недостаточным для адекватного описания последовательностей, полученных по результатам измерений. В данной работе предлагается модель, основанная на авторегрессионной модели m -го порядка AR(m), $0 < m < n$, которая имеет вид

$$z_i = \sum_{k=1}^m \alpha_k z_{i-k} + \delta \xi_i. \quad (2)$$

Если к (2) добавить условия замыкания, то получим модель замкнутых автокоррелированных последовательностей, которую можно представить следующим образом

$$z_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^m \alpha_k z_{n-k+1} + \delta \xi_1, & i = 1, \\ \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_k z_{i-k} + \sum_{k=i}^m \alpha_k z_{n-k+i} + \delta \xi_i, & 1 < i \leq m, \\ \sum_{k=1}^m \alpha_k z_{i-k} + \delta \xi_i, & m < i \leq n. \end{cases} \quad (3)$$

Например, подстановкой $m=2$ в (3), получим модель (4), прообразом которой является случайный процесс Юла для дискретного времени

$$z_i = \begin{cases} \alpha_1 z_n + \alpha_2 z_{n-1} + \delta \xi_1, & i = 1, \\ \alpha_1 z_1 + \alpha_2 z_n + \delta \xi_2, & i = 2, \\ \alpha_1 z_{i-1} + \alpha_2 z_{i-2} + \delta \xi_i, & 2 < i \leq n. \end{cases} \quad (4)$$

Для проведения вычислительных экспериментов по оценке эффективности решающих правил контроля качества объектов рассматриваемого типа необходимы алгоритмы формирования таких замкнутых последовательностей, описываемых моделью (3), а также знание их основных свойств, для этого предлагается следующий метод решения данной задачи.

Алгоритм формирования последовательностей

Модель (3) можно представить в виде векторного уравнения

$$\mathbf{z} = \sum_{k=1}^m \alpha_k A^k \mathbf{z} + \delta \boldsymbol{\xi}, \quad (5)$$

где $\mathbf{z} = \{z_i\}$ – случайный вектор, составленный из элементов замкнутой последовательности; $\boldsymbol{\xi} = \{\xi_i\}$ – случайный вектор независимых случайных величин с математическим ожиданием $M\{\xi_i\} = m_\xi$ и дисперсией $D\{\xi_i\} = \sigma_\xi^2$; A – оператор сдвига назад; $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$ – вектор коэффициентов; δ – постоянный множитель. Матрица линейного оператора A имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \dim A = n \times n.$$

Если обозначить $B = I - \sum_{k=1}^m \alpha_k A^k$, $\dim B = n \times n$, где I – единичная

матрица, то решение может быть записано в виде

$$\mathbf{z} = \delta B^{-1} \boldsymbol{\xi}, \quad (6)$$

при этом матрицу оператора B можно представить следующим образом:

$$B = I - \sum_{k=1}^m \alpha_k A^k = 1 \cdot A^0 + \sum_{k=1}^m (-\alpha_k) A^k = \sum_{h=0}^m b_h A^h = P_B(A), \quad (7)$$

где $P_B(x) = \sum_{h=0}^m b_h x^h$ – операторный полином;

Так как матрица B представима в виде (7), то она является матрицей циркулянтной формы [5]. В этом случае операторный

полином $P_B(x)$ является, так называемым, полиномом-представителем матрицы B , каждый столбец которой получается путем циклического сдвига первого столбца $\mathbf{b} = \{b_h\} = \{1, -\alpha_1, -\alpha_2, \dots, -\alpha_m\}$,

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & -\alpha_m & \cdots & -\alpha_3 & -\alpha_2 & -\alpha_1 \\ -\alpha_1 & 1 & \ddots & \vdots & 0 & \ddots & \vdots & -\alpha_3 & -\alpha_2 \\ -\alpha_2 & -\alpha_1 & \ddots & 0 & \vdots & \ddots & -\alpha_m & \vdots & -\alpha_3 \\ -\alpha_3 & -\alpha_2 & \ddots & 1 & 0 & \vdots & 0 & -\alpha_m & \vdots \\ \vdots & -\alpha_3 & \ddots & -\alpha_1 & 1 & \ddots & \vdots & 0 & -\alpha_m \\ -\alpha_m & \vdots & \ddots & -\alpha_2 & -\alpha_1 & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & -\alpha_m & \ddots & -\alpha_3 & -\alpha_2 & \ddots & 1 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & -\alpha_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -\alpha_m & -\alpha_{m-1} & \cdots & -\alpha_2 & -\alpha_1 & 1 \end{pmatrix}; \quad \dim B = n \times n.$$

Для существования обратного оператора B^{-1} необходимо и достаточно, чтобы $\det B \neq 0$. Определитель матрицы B равен произведению её собственных чисел, следовательно, с учетом циркулянтной формы матрицы B , можно записать

$$\det B = \prod_{j=1}^n \lambda_j = \prod_{j=1}^n P_B(\omega^{j-1}), \quad (8)$$

где $\lambda_j = P_B(\omega^{j-1}) = 1 - \sum_{k=1}^m \alpha_k \omega^{k(j-1)}$ – j -е собственное число матрицы B ,

$j \in [1, n]$; $\omega = \exp\left(\frac{2\pi i}{n}\right)$ – корень степени n из единицы, $i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Определитель матрицы отличен от нуля, если ни одно из собственных чисел не равно нулю, $\lambda_j \neq 0, \forall j$. В общем случае, для заданных коэффициентов $\{\alpha_1, \dots, \alpha_m\}$ требуется проверка по формуле (8). Для моделирования, их можно выбрать из частных случаев невырожденности матрицы циркулянтной формы, приведенных в [6]. Исходя из этого, матрица B будет невырожденной, если:

1) среди коэффициентов $\{\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m\}$ существует хоть один коэффициент α_j , для которого выполняется условие

$|\alpha_j| > 1 + \sum_{j \neq k} |\alpha_k|, \exists j$, или чтобы для всех коэффициентов $\{\alpha_k\}$

выполнялось $\sum_{k=1}^m |\alpha_k| < 1$;

2) коэффициенты $\{\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m\}$ - рациональные

числа, $\alpha_k \in \mathbb{Q}, \forall k$, причем $\sum_{k=1}^m \alpha_k \neq 1$, и $n \in \mathbb{P}$ - простое число.

Матрицу обратного оператора можно представить в виде

$$B^{-1} = F \Lambda^{-1} \bar{F} = \frac{1}{n} \bar{W} \Lambda^{-1} W, \quad (9)$$

где Λ^{-1} - диагональная матрица собственных чисел матрицы B^{-1} ;
 $F = n^{-\frac{1}{2}} \bar{W}$ - матрица дискретного преобразования Фурье (ДПФ матрица); W - матрица Вандермонда; \bar{F} и \bar{W} - соответствующие комплексно-сопряженные матрицы

$$\Lambda^{-1} = \begin{pmatrix} \lambda_1^{-1} & & & & & 0 \\ & \ddots & & & & \\ & & \lambda_i^{-1} & & & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & & & \lambda_n^{-1} \end{pmatrix}; W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 & \omega^3 & \dots & \omega^{(n-1)} \\ 1 & \omega^2 & \omega^4 & \omega^6 & \dots & \omega^{2(n-1)} \\ 1 & \omega^3 & \omega^6 & \omega^9 & \dots & \omega^{3(n-1)} \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega^{n-1} & \omega^{2n-2} & \omega^{3n-3} & \dots & \omega^{(n-1)(n-1)} \end{pmatrix},$$

Следует заметить, что матрица B^{-1} , которая является обратной для циркулянтной матрицы B , также будет иметь циркулянтную форму [6]. При этом каждый элемент b_{ij}^{-1} матрицы B^{-1} можно вычислить по формуле

$$b_{ij}^{-1} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\omega^{(t-1)(j-i)}}{\lambda_t} \quad (10)$$

Из (6) следует формула для определения i -й компоненты вектора \mathbf{z}

$$z_i = \delta \sum_{j=1}^n b_{ij}^{-1} \xi_j \quad (11)$$

По формуле (11) можно построить алгоритм расчета на ЭВМ последовательности $\{z_i\}$, с вычислительной сложностью не более $O(n^2)$, если учесть, что:

а) $\omega^a = \omega^{a \bmod n} = w_{a \bmod n}$, где $a \bmod n$ - остаток от деления a на n , $a \in \mathbb{N}, \forall a$.

$$\text{б) } b_{ij}^{-1} = \begin{cases} b_{i-j}^{-1}, & i \geq j, \\ b_{n+i-j}^{-1}, & i < j; \end{cases}$$

где $\{b_i^{-1}\}$ - элементы первого столбца матрицы $B^{-1} = \{b_{ij}^{-1}\}$; $\mathbf{w} = \{w_i = \omega^i\}$ - вектор корней n -й степени из единицы; $i, j \in [0, n-1]; i, j \in \mathbb{N}$.

Рассмотренный выше операторный полином $P_B(x) = 1 - \alpha_1 x - \alpha_2 x^2 - \dots - \alpha_m x^m$ также является характеристическим уравнением авторегрессионного процесса m -го порядка $AR(m)$, который является стационарным, только если все корни $\{x_1 \dots x_k \dots x_m\}$ характеристического уравнения $P_B(x)$ лежат вне единичного круга $|x_k| > 1, \forall k$ [4]. Если параметры $\{\alpha_1 \dots \alpha_m\}$ такие, что указанное условие выполняется, то для формирования замкнутой автокоррелированной последовательности может использоваться формула (3), после предварительного вычисления m начальных значений $\{z_{n-k+1}\}, k \in [1, m]$ по формуле (11). В этом случае вычислительная сложность алгоритма уменьшится, поскольку $(n-m)$ элементов последовательности будут вычисляться рекурсивно по формуле (3).

Докажем, что если параметры $\{\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m\}$ выбраны так, что выполняется условие $\sum_{k=1}^m |\alpha_k| < 1$, то в этом случае кроме существования обратного оператора B^{-1} также будет обеспечена стационарность процесса (2). Допустим, что такой выбор приводит к тому, что один из корней $x = x_k, k \in [1, m], \exists k$ характеристического уравнения $P_B(x)$ лежит внутри единичного круга $|x| < 1$, тем самым нарушая условие стационарности. Так как x - корень $P_B(x)$, то должно выполняться тождество $1 = |\alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_m x^m|$. Ввиду того, что $|x| < 1$, имеет место неравенство $1 > |x| > |x^2| > \dots > |x^m|$ и, следовательно:

$$1 > (|\alpha_1| + |\alpha_2| + \dots + |\alpha_m|)|x| > (|\alpha_1||x| + |\alpha_2||x^2| + \dots + |\alpha_m||x^m|) \geq |\alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_m x^m|.$$

В этом случае, получается, что левая часть строго больше правой, и поэтому никакое $|x| < 1$ не обращает $P_B(x)$ в тождество и, следовательно, не может быть корнем. Таким образом, если сумма модулей коэффициентов меньше единицы, то все корни характеристического полинома $P_B(x)$ лежат вне единичного круга $|x| > 1$, обеспечивая стационарность авторегрессионного процесса $AR(m)$.

Основные свойства

Математическое ожидание всех компонент вектора \mathbf{z} одинаково и равно

$$M[z_i] = \delta \sum_{j=1}^n b_{ij}^{-1} M[\xi_h] = \delta m_\xi \sum_{j=1}^n b_{ij}^{-1} = \delta m_\xi \sum_{j=1}^n b_{j1}^{-1} = \delta m_\xi \lambda_1^{-1} = \frac{\delta m_\xi}{1 - \sum_{k=1}^m \alpha_k}. \quad (12)$$

Ковариационная матрица случайного вектора \mathbf{z} равна

$$R_z = M[\mathbf{z}\mathbf{z}^T] - \mathbf{m}_z \mathbf{m}_z^T = \delta^2 \sigma_\xi^2 B^{-1} (B^{-1})^T. \quad (13)$$

Ковариационная матрица R_z симметричная и положительно определенная, так как для любого ненулевого вектора \mathbf{v} выполняется неравенство $\mathbf{v}^T \left(\delta^2 \sigma_\xi^2 B^{-1} (B^{-1})^T \right) \mathbf{v} = \delta^2 \sigma_\xi^2 \left| (B^{-1})^T \mathbf{v} \right|^2 > 0, \forall \mathbf{v} \in \mathbb{R}^n$.

Если обозначить $k = i - j$, то используя (13), (10) и формулу суммы геометрической прогрессии, можно получить выражение для ковариационной функции, которое примет вид

$$R(k) = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\omega^{k(t-1)}}{\left| 1 - \sum_{h=1}^m \alpha_h \omega^{h(t-1)} \right|^2} = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\omega^{k(t-1)}}{|\lambda_t|^2}, \quad k \in [0, n], k \in \mathbb{N}. \quad (14)$$

Множество $\{|\lambda_i|^{-2}\}, i \in [1, n], i \in \mathbb{N}$ является множеством

собственных чисел матрицы $B^{-1} (B^{-1})^T$, которая является матрицей циркулянтной формы, поскольку произведение двух циркулянтных матриц дает циркулянтную. У вещественных матриц циркулянтной формы всегда есть кратные собственные числа, порядок следования которых зависит от четности n . Для матрицы $B^{-1} (B^{-1})^T$ они будут встречаться в таком порядке

$$\left\{ |\lambda_i|^{-2} \right\} = \begin{cases} \left\{ |\lambda_1|^{-2}, \dots, |\lambda_s|^{-2}, |\lambda_{s+1}|^{-2}, |\lambda_s|^{-2}, \dots, |\lambda_2|^{-2} \right\}, & n = 2s, s \in \mathbb{N}, \\ \left\{ |\lambda_1|^{-2}, \dots, |\lambda_s|^{-2}, |\lambda_{s+1}|^{-2}, |\lambda_{s+1}|^{-2}, |\lambda_s|^{-2}, \dots, |\lambda_2|^{-2} \right\}, & n = 2s + 1; \end{cases} \quad (15)$$

С учетом (15) можно представить функцию ковариации следующим образом:

$$R(k) = \begin{cases} \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \left[\frac{1}{|\lambda_1|^2} + \frac{\omega^{\frac{n}{2}}}{|\lambda_{n/2+1}|^2} + \sum_{t=2}^{n/2} \frac{\omega^{k(t-1)} + \omega^{-k(t-1)}}{|\lambda_t|^2} \right], & n \bmod 2 = 0, \\ \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \left[\frac{1}{|\lambda_1|^2} + \sum_{t=2}^{(n+1)/2} \frac{\omega^{k(t-1)} + \omega^{-k(t-1)}}{|\lambda_t|^2} \right], & n \bmod 2 = 1. \end{cases} \quad (16)$$

Так как значения выражений $\omega^{\frac{n}{2}} = \cos(k\pi) = \pm 1$ и $\omega^{k(t-1)} + \omega^{-k(t-1)} = 2 \cos\left(\frac{2k(t-1)\pi}{n}\right)$ не зависят от знака k , то из (16) следует, что $R(k) = R(-k) = R(n-k)$: таким образом ковариационная функция симметрична относительно точки $k = n/2$.

Дисперсия последовательности равна

$$D[z_i] = R(0) = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \sum_{t=1}^n |\lambda_t|^{-2} = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{n} \operatorname{tr} \left(B^{-1} (B^{-1})^T \right) = \delta^2 |B^{-1}|^2 \sigma_\xi^2, \quad (17)$$

где $|B^{-1}|$ - норма Гильберта-Шмидта матрицы линейного оператора B^{-1} .

Если дисперсия $D[z_i]$ задана, то значение δ рассчитывается по формуле (17), полагая известной дисперсию σ_ξ^2 .

Корреляционная функция может быть определена как $r(k) = R(k) / R(0)$.

Если компоненты $\{\xi_i\}$ вектора ξ независимые нормальные случайные величины, тогда (6) представляет собой их линейное преобразование и вектор $\mathbf{z} = \{z_i\}$ имеет многомерное нормальное распределение с корреляционной матрицей R_z и математическим ожиданием $M[z_i]$. В этом случае замкнутые последовательности одинаковой длины n отвечают требованию стационарности в узком смысле.

Вычислительный эксперимент

Для проверки правильности работы алгоритмов формирования замкнутых автокоррелированных последовательностей можно вычислить длину вектора невязки $|\Delta\xi| = |\xi - \xi^*|$, где компоненты вектора $\xi^* = \{\xi_i^*\}$ определяются по вектору z и известным параметрам модели, следующим образом

$$\xi_i^* = \begin{cases} \frac{1}{\delta} \left[z_1 - \sum_{k=1}^m \alpha_k z_{n-k+1} \right], & i = 1, \\ \frac{1}{\delta} \left[z_i - \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_k z_{i-k} - \sum_{k=i}^m \alpha_k z_{n-k+i} \right], & 1 < i \leq m, \\ \frac{1}{\delta} \left[z_i - \sum_{k=1}^m \alpha_k z_{i-k} \right], & m < i \leq n. \end{cases}$$

В результате вычислительного эксперимента была получена величина невязки для последовательностей с различным порядком модели m равным количеству элементов вектора $\alpha = \{\alpha_1 \dots \alpha_m\}$ и при постоянных параметрах $n = 100$, $\sigma_\xi^2 = 1$ и $\delta = 1$. Результаты представлены в табл.1-табл.3 для двух алгоритмов: I – линейного преобразования по формуле (6) и II – по формуле (3), с предварительно вычисленными начальными значениями по формуле (6). В табл. 1 вектор α задан таким образом, чтобы соблюдались условия стационарности авторегрессионной модели, а параметр $m_\xi = 0$. В табл.2 вектор α такой же, как и в табл.1, но параметр $m_\xi = 100$. В табл.3 $m_\xi = 0$ и вектор α выбран так, чтобы условия стационарности нарушались.

Таблица 1

α	{0.9}	{-0.9}	{0.7; 0.2}	{0.6; -0.2; 0.1}	{0.1; 0.1; 0.6; 0.1}
$ \Delta\xi _I$	2.3×10^{-14}	1.7×10^{-14}	1.4×10^{-14}	8.3×10^{-15}	8.7×10^{-15}
$ \Delta\xi _{II}$	4.2×10^{-15}	1.2×10^{-15}	2.5×10^{-15}	1.8×10^{-15}	2.1×10^{-15}

Таблица 2

α	{0.9}	{-0.9}	{0.7; 0.2}	{0.6; -0.2; 0.1}	{0.1; 0.1; 0.6; 0.1}
$ \Delta\xi _I$	1.4×10^{-12}	4.2×10^{-12}	1.8×10^{-12}	1.7×10^{-12}	1.7×10^{-12}
$ \Delta\xi _{II}$	3.5×10^{-13}	2.1×10^{-13}	9.7×10^{-13}	4.4×10^{-13}	4.5×10^{-13}

Таблица 3

α	{1.5}	{-1.5}	{0.9; 0.5}	{0.9; 0.5; 0.7}	{0.9; 0.7; 0.3; 0.1}
$ \Delta\xi _{\text{I}}$	1.1×10^{-14}	8.9×10^{-15}	9.2×10^{-15}	9.1×10^{-15}	8.3×10^{-15}
$ \Delta\xi _{\text{II}}$	133.6	153.3	0.121	282.1	331,3

Как следует из табл.1 рассмотренные алгоритмы обеспечивают малую величину невязки $|\Delta\xi| \approx 10^{-14} \approx 0$. Анализ табл.2 показывает, что величина m_ξ может отличаться от нуля, а необходимость выполнения требования стационарности авторегрессионной модели для алгоритма II, видна из табл.3.

На рис.1, в полярной системе координат, показаны траектории случайных последовательностей 1-го и 2-го порядка с постоянными параметрами модели $n = 30, \sigma_\xi^2 = 1, m_\xi = 0, \delta = 1$ и разными коэффициентами $\{\alpha_k\}$. Значение полярного угла рассчитывается по формуле $\varphi_i = \Delta\varphi \cdot (i - 1)$, где $\Delta\varphi = 2\pi / n$. Значение полярного радиуса определяется по формуле $\rho(\varphi_i) = H_0 + \Delta H(i)$, где $H_0 = 5, \Delta H(i) = z_i$. Замкнутые последовательности, показанные на рис.1, были сформированы из одной и той же выборки независимых случайных величин по алгоритму II.

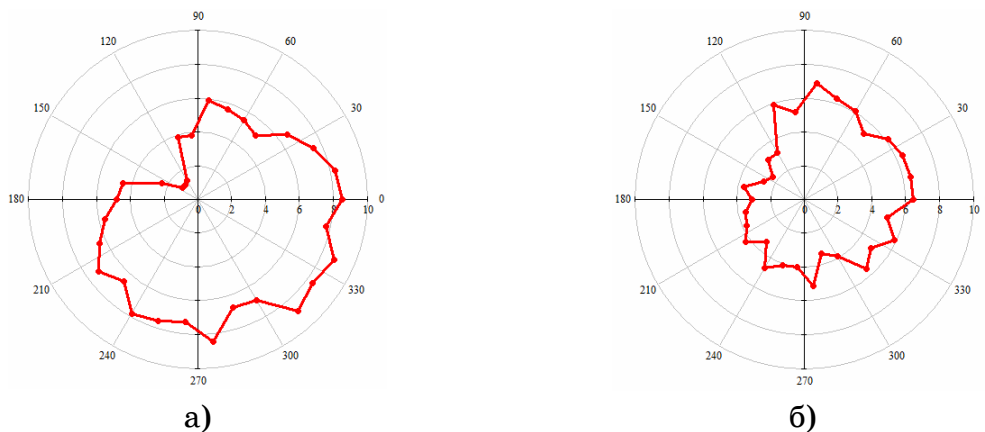


Рисунок 1 - Примеры траекторий замкнутых случайных последовательностей;

а) $\alpha = \{0.9\}$; б) $\alpha = \{0.9, -0.4\}$

Для параметров $\delta = 1, m_\xi = 0, \sigma_\xi^2 = 1$ модели было выполнено сравнение расчетных значений коэффициентов корреляции со значениями, полученными на основе вычислительного эксперимента.

Для этого генерировалось $N=10000$ последовательностей размером $n=30$ каждая. Для полученных последовательностей было зафиксировано сечение в точке $i=1$, после чего с шагом $k \in [0, n]$, $k \in \mathbb{N}$ вычислялся коэффициент корреляции между 1-м и $i+k$ -м сечениями. Результаты представлены в виде графика на рисунке 2, где точки – это выборочные значения коэффициентов корреляции, а линии соединяют точки, полученные расчетным путем по формуле (14).

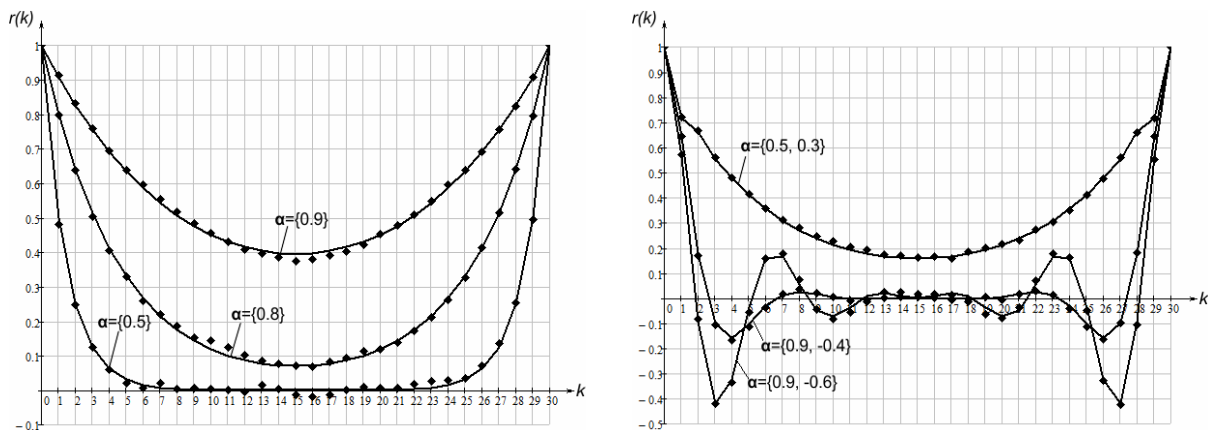


Рисунок 2 - Эмпирическая и теоретическая функция корреляции

Как видно на рис.2 экспериментальные значения корреляции практически такие же, как и расчетные, а увеличение порядка модели позволяет получать последовательности с различными корреляционными характеристиками.

Выводы

1. Предложена модель автокоррелированных последовательностей измерений вдоль жордановых траекторий, которая учитывает корреляционную связь между крайними её членами. Возможность выбора порядка модели позволяет получать последовательности с широким разнообразием корреляционных свойств.

2. Разработаны алгоритмы формирования таких последовательностей, работоспособность которых проверена на основе вычислительного эксперимента. Для формирования каждого члена последовательности можно использовать либо линейное преобразование независимых случайных величин, либо, с помощью этого преобразования, получить только m начальных значений, а остальные, рассчитать, используя известную формулу авторегрессии m -го порядка. Установлено, что в первом случае параметры модели

должны удовлетворять только условию существования обратного оператора, а во втором, еще дополнительно и требованию стационарности (асимптотической устойчивости) авторегрессионной модели m -го порядка AR(m).

3. Исследованы основные свойства последовательностей: их дисперсии и функции автокорреляции зависят от размера выборки, причем автокорреляционная функция симметрична относительно точки $n/2$. Последовательности одинакового размера с нормальным законом распределения вероятностей удовлетворяют требованию стационарности в узком смысле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малайчук В.П. Математическая дефектоскопия: Монография / В.П. Малайчук, А.В. Мозговой.-Д.:Системные технологии, 2005. -180 с.
2. Кошулян А.В. Сингулярный спектральный анализ замкнутых пространственных рядов / А.В. Кошулян, В.П. Малайчук -Д.: Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Выпуск 3 (74), 2011, с. 46-51.
3. Кошулян А.В. Моделирование автокоррелированных последовательностей измерений вдоль жордановой траектории / А.В. Кошулян, В.П. Малайчук -Д.: Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Выпуск 1(78), 2012, с. 9-17.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. // Под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974, кн. 1. – 406 с.
5. Golub, Gene H.; van Loan, Charles F. (1996), Matrix Computations, 3rd edition, Johns Hopkins University Press; ISBN 978-0-8018-5414-9.
6. Irwin Kra, Santiago r. Simanca. On circulant matrices. State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, NY 11794, U.S.A.

СОДЕРЖАНИЕ

Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Сливинский В.И., Харченко М.Е. Определение рациональной схемы армирования углесотопласта при помощи МКЭ-поддержки	3
Гуда А.И., Михалев А.И. Физические основы при синтезе критерия адаптивно-поисковой идентификации динамической системы Лоренса	13
Гожий А.П. Многокритериальные эволюционные методы и алгоритмы в задачах принятия решений сценарного планирования.	20
Мешалкин А.П., Пшигоцкий С.В., Камкина Л.В. Повышение интенсивности перемешивания жидкой ванны АОД-конвертера на основе результатов физического моделирования глубинной продувки	29
Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В., Доценко Ю.В., Бура Ю.Н. Особенности определения термовременных условий осуществления газодинамического вытеснения расплава из сифонной литниковой системы крупных отливок или слитков	38
Зайцев В.Г. Применение инвариантных многообразий в теории оптимального управления	48
Капитонов А.Г. Определение тока коррозии по результатам релаксационных измерений	57
Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Белошапка Е.А., Шумельчик Е.И., Семенов Ю.С. Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи	63
Поляков М.А. Теоретико-множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления	75
Прокопчук Ю.А., Белецкий А.С. Технологический аудит и субоптимизация на основе принципа предельных обобщений	82
Чумаков Л.Д. Ценка гарантийного срока для технического устройства	88
Бабичев С.А., Погребняк И.Ф., Шарко А.В. Комплексное использование сети байеса и системы нечеткого логического вывода в модели определения прочностных характеристик металлов	95

Денисенко А.И. Применения временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах.....	104
Недоспасов А.О., Михальов О.И. Оцінювання міри самоподібності Інтернет – трафіку методами мультифрактального аналізу.....	111
Астіоненко І.О., Литвиненко О.І., Хомченко А.Н. Згладжені апроксимації триквадратичного скінченного елемента	118
Михалёв А.И., Бабенко Ю.В. Оценка работы генетического алгоритма с модифицированными операторами мутации и генерации начальной популяции	124
Бирюков А.Б. Математическое моделирование как инструмент мониторинга теплового состояния непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения.....	130
Гнатушенко В.В., Алі Данладі, Михальов О.І. Імітаційне моделювання GPRS-мережі та дослідження управління трафіком.....	137
Кабаков Д.Ю., Самохвалов С.Є. Спряжені процеси гідродинаміки та теплопереносу у ковші під час наповнення.....	146
Кирия Р.В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера конвейерных линий угольных шахт	152
Кошулян А.В. Стохастическая модель автокоррелированных измерений на жордановых траекториях	162

РЕФЕРАТЫ

УДК 629.7.023

Гайдачук В.Е., Кондратьев А.В., Сливинский В.И., Харченко М.Е. **Определение рациональной схемы армирования углесотопласта при помощи МКЭ-поддержки** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 3-12.

Оценено влияние различных схем армирования наполнителя углепластиковых сотов на физико-механические характеристики углесотопласта. При помощи МКЭ-поддержки оценено влияние различных схем армирования наполнителя углесотопласта на приведенные модули сдвига. Выбрана рациональная схема армирования углесотопласта [$\pm 64^\circ$], обеспечивающая одновременно высокий уровень всех физико-механических характеристик.

Библ.7, ил.7, табл.3.

УДК 681.876.2

Гуда А.И. , Михалев А.И. **Физические основы при синтезе критерия адаптивно-поисковой идентификации динамической системы Лоренса** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 13-19.

В статье показаны физические основы при создании работоспособного критерия идентификации нелинейной хаотической системы Лоренса. Проведены исследования свойств полученного критерия. Создана и проверена модель системы идентификации на основе полученного критерия.

Библ. 10, ил. 5.

УДК 004.93:681.32

Гожий А.П. **Многокритериальные эволюционные методы и алгоритмы в задачах принятия решений сценарного планирования** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 20-28.

Рассмотрены многокритериальные эволюционные методы и алгоритмы. Проанализированы основные особенности реализации основных эволюционных алгоритмов. Рассмотрена и проанализирована возможность применения эволюционных алгоритмов в задачах сценарного планирования .

Библ. 10, ил. 2, табл.1.

УДК 669. 183. 012.

Мешалкин А.П., Пшигоцкий С.В., Камкина Л.В. **Повышение интенсивности перемешивания жидкой ванны АД-конвертера на основе результатов физического моделирования глубинной продувки** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 29-37.

Уточнены особенности перемешивания жидкой ванны при подаче дутья через боковые фурмы. Установлена возможность значительного повышения интенсивности дутья при изменении вариантов размещения фурм.

Библ. 3, ил. 4.

УДК 621.746.6.001.2

Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В., Доценко Ю.В., Бура Ю.Н. **Особенности определения термовременных условий осуществления газодинамического вытеснения расплава из сифонной литниковой системы крупных отливок или слитков** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 38-47.

Приведено описание физической и математической модели процесса затвердевания металла в системе стояк - устройство для ввода газа. С помощью разработанной модели возможно моделирование процесса затвердевания расплава с различными вариантами конфигурации и размеров холодильника, диаметра стояка, теплофизических свойств металла и формы.

Библ. 11, ил. 2.

УДК 681.51

Зайцев В.Г. **Применение инвариантных многообразий в задачах оптимального управления** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 48-56.

Рассматриваются проблемы использования подходов в задачах синтеза управления техническими объектами с помощью оптимальных инвариантных многообразий. На приведенном примере показываются новые возможности, которые дает использование ОИМ в задачах синтеза регуляторов.

Библ. 9.

УДК 004.9:518.5

Капитонов А.Г. **Определение тока коррозии по результатам релаксационных измерений** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 57-62.

В рамках уточненной математической модели релаксации потенциала в кулоностатических условиях разработана методика определения мгновенной скорости коррозии. Методика реализована на базе компьютерной системы и апробирована на реальных электрохимических системах.

Библ. 6.

УДК 669.162.212:669.083.133

Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Белошапка Е.А., Шумельчик Е.Ю., Семенов Ю.С. **Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 63-74.

Рассматривается оценка воздействия расплавов на футеровку металлоприемника в нестационарный период работы доменной печи. Предлагается проводить оценку с использованием комплексного критерия оценки. Предложен вариант такого критерия и методы его дальнейшего применения для продления кампании доменных печей на примере ДП-9 «Арселор-Миттал Кривой Рог».

Библ. 6, ил. 2, табл. 1.

УДК 519.86:681.51

Поляков М.А. **Теоретико-множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 75-81.

Рассматривается иерархическая структура интегрированных контроллерных систем управления. На теоретико-множественном уровне описаны типовые элементы функциональных уровней управления – управляющие автоматы и операционные автоматы данных и знаний. Предложены теоретико-множественные модели уровня управления и интегрированной контроллерной системы управления.

Библ. 10.

УДК 519+61:681.3

Прокопчук Ю.А., Белецкий А.С. **Технологический аудит и субоптимизация на основе принципа предельных обобщений** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 82-87.

В работе рассматривается специфика применения принципа предельных обобщений к технологическому аудиту и субоптимизации, в частности, металлургических процессов. Дано описание Банка тестов, с помощью которого формируется база прецедентов и контекст для построения моделей знаний.

Библ. 5.

УДК 519.2:658.8

Чумаков Л.Д. **Оценка гарантийного срока для технического устройства** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 88-94.

Обсуждаются вопросы оценки и выбора величины гарантийного срока эксплуатации для технического устройства на этапе его разработки.

Библ. 10, ил. 2.

УДК 620.179.16

Бабичев С.А., Погребняк И.Ф., Шарко А.В. **Комплексное использование сети Байеса и системы нечеткого логического вывода в модели определения прочностных характеристик металлов** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 95-103.

Разработана модель нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов при использовании методов неразрушающего контроля, основанная на комплексном использовании сети Байеса и системы нечеткого логического вывода. Представлена база знаний, на основании которой произведена настройка нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов.

Библ. 5, ил. 2, табл. 5.

УДК 681.5:620.18:621.793

Денисенко А.И. **Применение временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 104-110.

Рассмотрены специфические особенности применений временных интервалов в качестве измеряемой величины в информационно-измерительных системах на уровнях оцифровки при замерах физических величин, сопряженной регистрации временных зависимостей двух и более диагностируемых параметров, диагностики функций распределений по параметрам, связанных с скоростями счета событий.

Библ. 10, ил. 1.

УДК 004.725.4:519.216

Недоспасова А.А., Михалев А.И. **Оценка степени самоподобия Интернет - трафика методами мультифрактального анализа** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 111-117.

В данной работе выполнен оригинальный эксперимент по сбору сетевого трафика и исследованию существующих методов фрактального и мультифрактального анализа с помощью которых можно определить степень самоподобия, показатель Херста и наличие мультифрактальности в трафике.

Библ. 14, ил. 4, табл. 3.

УДК 519.3

Астионенко И.А., Литвиненко Е.И., Хомченко А.Н. **Сглаженные аппроксимации трикватричного конечного элемента** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 118-123.

В работе выполнено сглаживание (по методу наименьших квадратов) многопараметрических базисных функций, полученных с помощью аналитического метода конструирования иерархических форм на трикватричном конечном элементе серендипова семейства.

Библ. 4, ил. 2, табл. 2.

УДК 681.876.2

Михалёв А.И., Бабенко Ю.В., **Оценка работы генетического алгоритма с модифицированными операторами мутации и генерации начальной популяции** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 124-129.

В работе рассматривается влияние хаотических генераторов на результаты работы генетического алгоритма. Для работы генетического алгоритма предлагается вместо последовательностей псевдослучайных чисел использовать фрактальные последовательности, созданные при помощи фрактального гауссовского шума и хаотических генераторов Лоренца, Чуа, Ресслера. В результате проведенных экспериментов улучшение результатов генетического алгоритма выявлено лишь при применении фрактальных последовательностей, созданных хаотическими генераторами.

Библ. 10, табл. 3.

УДК 621.746

Бирюков А.Б. **Математическое моделирование как инструмент мониторинга теплового состояния непрерывнолитой заготовки в зоне вторичного охлаждения** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 130-136.

Рассмотрено применение математической модели тепловой работы машины непрерывного литья заготовок как вспомогательного инструмента для автоматического управления технологическим процессом и мониторинга теплового состояния заготовок, формирующихся в зоне вторичного охлаждения.

Разработан алгоритм идентификации математической модели при помощи средств пирометрии, что позволяет в последующем получать эталонные значения температуры поверхности заготовки для заданных технологических параметров.

Решен вопрос определения уровня корректирующего воздействия на тепловое состояние заготовки путем изменения расхода охлаждающей воды на сектора зоны вторичного охлаждения при рассогласовании заданных и реальных параметров температурного состояния заготовки.

Библ. 3., ил. 1.

УДК.621.39

Гнатушенко В.В., Али Данлади, А.И. Михалев **Имитационное моделирование GPRS – сети и исследование управления трафиком** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 137-145.

Разработана имитационная модель мобильной связи и проведенны исследования процессов передачи сигнала при использовании одной и нескольких мобильных станций.

Библ.3, ил. 12.

УДК 519.711.3

Кабаков Д.Ю, Самохвалов С.Е. **Сопряженные процессы гидродинамики и теплопереноса в ковше во время наполнения** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 146-151.

Построена математическая модель сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса расплавленного металла в ковше при продувке инертным газом во время наполнения. Модель реализована в среде Qt на алгоритмическом языке C++.

Библ. 4, ил. 6.

УДК 622.647.82:51.001.57

Кирия Р.В. **Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера конвейерных линий угольных шахт** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 152-161.

На основе теории марковских процессов с помощью метода Ховарда получена математическая модель функционирования аккумулирующего бункера, работающего в системе подземного конвейерного транспорта угольных шахт. Определено среднее количество груза в бункере в зависимости от параметров загружаемого и разгружаемого грузопотоков для различных состояний надбункерной и подбункерной конвейерных линий.

Библ. 8, ил. 1

УДК 519.24:681

Кошулян А.В. **Стохастическая модель автокоррелированных измерений на жордановых траекториях** //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 2 (79). – Днепропетровск, 2012. – С. 162-173.

Предложена модель автокоррелированных последовательностей измерений вдоль жордановых траекторий, которая учитывает корреляционную связь между крайними её членами. Определены допустимые параметры такой модели и получены алгоритмы формирования соответствующих ей последовательностей, основные свойства которых были исследованы и подтверждены вычислительными экспериментами.

Библ. 6, ил. 2, табл. 3.

УДК 629.7.023

Гайдачук В.Є., Кондрат'єв А.В., Сливинський В.І., Харченко М.Є. **Визначення раціональної схеми армування вуглестопласту за допомогою МКЕ-підтримки** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 3-12.

Оцінено вплив різних схем армування наповнювача вуглепластикових стільників на фізико-механічні характеристики вуглепласту. За допомогою МКЕ-підтримки оцінено вплив різних схем армування наповнювача вуглепласту на наведені модулі зсуву. Обрана раціональна схема армування вуглепласту [$\pm 64^\circ$], що забезпечує одночасно високий рівень всіх фізико-механічних характеристик.

Бібл.7, іл.7, табл.3.

УДК 681.876.2

Гуда А.І., Михальов О.І. **Фізичні основи при синтезі критерію адаптивно-пошукової ідентифікації динамічної системи Лоренса** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 13-19.

У статті показані фізичні основи при створенні працездатного критерію ідентифікації нелінійної хаотичної системи Лоренса. Проведено дослідження властивостей отриманого критерію. Створено та перевірено модель системи ідентифікації на основі отриманого критерію.

Бібл. 10, іл. 5.

УДК 004.93:681.32

Гожий О.П. **Багатокритеріальні еволюційні методи і алгоритми в задачах прийняття рішень сценарного планування** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 20-28.

Розглянуто багатокритеріальні еволюційні методи і алгоритми. Проаналізовано основні особливості реалізації основних еволюційних алгоритмів. Розглянуто та проаналізовано можливість застосування еволюційних алгоритмів у задачах сценарного планування.

Бібл. 10, іл. 2, табл. 1.

УДК 669. 183. 012.

Мешалкин А.П., Пшигоцкий С.В., Камкина Л.В. **Підвищення інтенсивності перемішування рідкої ванни АОД-конвертера на основі результатів фізичного моделювання заглибленої продувки** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 29-37.

Уточнено особливості перемішування рідкої ванни при подачі дуття через бокові фурми. Встановлено можливість значного підвищення інтенсивності дуття при зміні варіантів розміщення фурм.

Бібл. 3, іл. 4.

УДК 621.746.6.001.2

Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В., Доценко Ю.В., Бура Ю.М. **Особливості визначення термочасових умов здійснення газодинамічного витиснення розплаву із сифонної ливникової системи крупних виливків або злитків** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 38-47.

Приведений опис фізичної та математичної моделі процесу затвердіння металу в системі стояк-пристрій для введення газу. За допомогою розробленої моделі можливо моделювання процесу затвердіння розплаву з різними варіантами конфігурації та розмірів холодильника, діаметру стояка, теплофізичних властивостей металу та форми.

Бібл. 11, іл. 2.

УДК 681.51

Зайцев В.Г. **Використання інваріантних многовидів до задач оптимального керування** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 48-56.

Розглядаються проблеми використання підходів до задач синтезу оптимального керування технічними об'єктами за допомогою методу побудови оптимальних інваріантних многовидів. На прикладі однієї задачі наведені нові можливості, що надає використання ОІМ підходу до задач синтезу регуляторів.

Бібл. 9.

УДК 004.9:518.5

Капітонов О.Г. **Визначення струму корозії за результатами релаксаційних вимірювань** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 57-62.

В рамках уточненої математичної моделі релаксації потенціалу в кулоностатичних умовах розроблена методика визначення миттєвої швидкості корозії. Методика реалізована на базі комп'ютерної системи та апробована на реальних електрохімічних системах..

Бібл. 6.

УДК 669.162.212:669.083.133

Муравйова І.Г., Тогобіцкая Д.Н., Білошапка Е.А., Шумельчik Є.Ю., Семенов Ю.С. **Розробка комплексного критерію оцінки впливу розплавів на футерівку металоприймача доменної печі** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 63-74.

Розглядається оцінка впливу розплавів на футерівку металоприймача в нестационарний період роботи доменної печі. Пропонується проводити оцінку з використанням комплексного критерію оцінки. Запропоновано варіант такого критерію і методи його подальшого застосування для подовження кампанії доменних печей на прикладі ДП-9 «Арселор-Міттал Кривий Ріг».

Бібл. 6, іл. 2, табл. 1.

УДК 519.86:681.51

Поляков М.О. **Теоретико-множинні моделі елементів та структур інтегрованих контролерних систем керування** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 75-81.

Розглядаються ієрархічна структура інтегрованих контролерних систем керування. На теоретико-множинному рівні описані типові елементи функціональних рівней керування – керуючі автомати та операційні автомати даних, знань. Запропоновані теоретико-множинні моделі рівня керування та інтегрованої контролерної системи керування.

Бібл. 10.

УДК 519+61:681.3

Прокопчук Ю.О., Белецькій О.С. **Технологічний аудит та субоптимізація на основі принципу граничних узагальнень** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 82-87.

В роботі розглядається специфіка запровадження принципу граничних узагальнень в технологічному аудиті та субоптимізації, зокрема, металургійних процесів. Наведено опис Банку тестів, за допомогою якого формується база прецедентів та контекст створення моделей знань.

Бібл. 5.

УДК 519.2:658.8

Чумаков Л.Д. **Оцінка гарантійного строку для технічного пристрою** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 88-94.

Обговорюються питання оцінки й вибору величини гарантійного терміну експлуатації для технічного пристрою на етапі його розробки.

Бібл. 10, іл. 2.

УДК 620.179.16

Бабічев С.А., Погребняк І.Ф., Шарко О.В. **Комплексне використання мережі Байєса та системи нечіткого логічного висновку в моделі визначення міцнісних характеристик металів** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 95-103.

Розроблено модель нечіткої системи визначення міцнісних характеристик металів при використанні методів неруйнівного контролю, що основана на комплексному використанні мережі Байєса та системи нечіткого логічного висновку. Надана база знань, на основі якої проведено налаштування нечіткої системи визначення міцнісних характеристик металів.

Бібл. 5, іл. 2, табл. 5.

УДК 681.5:620.18:621.793

Денисенко О.І. **Застосування інтервалів часу в якості вимірюваної величини в інформаційно-вимірювальних системах** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 104-110.

Розглянуті специфічні особливості застосувань інтервалів часу в якості вимірюваної величини в інформаційно-вимірювальних системах при вимірах фізичних величин, зв'язаній через час реєстрації взаємозалежностей двох і більше вимірюваних параметрів, діагностиці функцій розподілів за параметрами, вимірюваних швидкостями рахунку подій.

Бібл. 10, іл. 1.

УДК 004.725.4:519.216

Недоспасов А.О., Михальов О.І. **Оцінювання міри самоподібності Інтернет – трафіку методами мультифрактального аналізу** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 111-117.

В данній роботі виконаний оригінальний експеримент по збору мережевого трафіку та дослідженню існуючих методів фрактального та мультифрактального аналізу за допомогою яких можна визначити міру самоподібності, показник Хьорста та наявність мультифрактальності у трафіку.

Бібл. 14, іл. 4, табл. 3.

УДК 519.3

Астіоненко І.О., Литвиненко О.І., Хомченко А.Н. **Згладжені апроксимації трикватричного скінченного елемента** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 118-123.

В роботі виконано згладжування (за методом найменших квадратів) багатопараметричних базисних функцій, що отримані за допомогою аналітичного методу конструювання ієрархічних форм на трикватричному скінченному елементі серендипової сім'ї.

Бібл. 4, іл. 2, табл. 2.

УДК 681.876.2

Михальов О.І., Бабенко Ю.В. **Оцінка роботи генетичного алгоритму з модифікованими операторами мутації та генерації початкової популяції** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 124-129.

У роботі розглядається вплив хаотичних генераторів на результати роботи генетичного алгоритму. Для роботи генетичного алгоритму пропонується замість послідовностей псевдовипадкових чисел використовувати фрактальні послідовності, створені за допомогою фрактального гауссовського шуму та хаотичних генераторів Лоренца, Чуа, Ресслера. В результаті проведених експериментів поліпшення результатів генетичного алгоритму виявлено лише при використанні фрактальних послідовностей, утворених хаотичними генераторами.

Бібл. 10, табл. 3

УДК 621.746

Бірюков О.Б. **Математичне моделювання як інструмент моніторингу теплового стану безперервнолитої заготовки в зоні вторинного охолодження** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 130-136.

Розглянуто використання математичної моделі теплової роботи машин безперервного лиття заготовок як допоміжного інструменту для автоматичного керування технологічним процесом і моніторингу теплового стану заготовок, що формуються в зоні вторинного охолодження.

Розроблено алгоритм ідентифікації математичної моделі за допомогою засобів пірометрії, що дозволяє в подальшому визначати еталонні значення температури поверхні заготовки для заданих технологічних параметрів.

Вирішено питання визначення коригуючого впливу на тепловий стан заготовки шляхом зміни витрати води, що охолоджує, на сектори зони вторинного охолодження при розбіжності заданих і реальних параметрів теплового стану заготівки.

Бібл. 3., іл. 1.

УДК 621.39

Гнатушенко В.В., Данладі Алі, Михальов О.І. **Імітаційне моделювання GPRS-мережі та Дослідження управління трафіком** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С.137-145.

Розроблено імітаційну модель мобільного зв'язку та проведені дослідження процесів передачі сигналу при використанні однієї та кількох мобільних станцій.

Бібл. 3, іл. 12.

УДК 519.711.3

Кабаков Д.Ю, Самохвалов С.Є. **Спряжені процеси гідродинаміки та теплопереносу у ковші під час наповнення** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 146-151.

Побудовано математичну модель спряжених процесів гідродинаміки та теплопереносу розплавленого металу у ковші при продуванні інертним газом під час наповнення. Модель реалізовано у середовищі Qt на алгоритмічній мові C++.

Бібл. 4, іл. 6.

УДК 622.647.82:51.001.57

Кірія Р.В. **Математична модель функціонування акумулюючого бункера конвеєрних ліній вугільних шахт** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 152-161.

На основі теорії марківських процесів за допомогою методу Ховарда одержано математичну модель функціонування акумулюючого бункера, що працює в системі підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт. Визначено середню кількість вантажу в бункері залежно від параметрів завантажувального і розвантажувального вантажопотоків для різних станів надбункерної і підбункерної конвеєрних ліній.

Бібл. 8, іл. 1

УДК 519.24:681

Кошулян О.В. **Стохастична модель автокорельованих вимірювань на жорданових траєкторіях** //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). –Дніпропетровськ, 2012. – С. 162-173.

Запропонована модель автокорельованих послідовностей вимірювань уздовж жорданових траєкторій, в якій врахований кореляційний зв'язок між крайніми членами послідовності. Визначено допустимі параметри такої моделі і отримані алгоритми формування відповідних їй послідовностей, основні властивості яких були досліджені і підтверджені обчислювальними експериментами.

Бібл. 6, іл. 2, табл.3.

UDC 629.7.023

Gajdachuk V.E., Kondratyev A.V., Slyvynskiy V.I., Kharchenko M.E. **Definition of rational reinforcement scheme uglesotoplasta using FEM-support** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 3-12.

The effect of different schemes of reinforcement carbon fiber honeycomb filler on the physico-mechanical properties uglesotoplasta. With the support of the FEM-evaluated the effect of different schemes of reinforcement filler uglesotoplasta listed on the shear moduli. You have selected a rational scheme of reinforcement uglesotoplasta [$\pm 64 \epsilon$], while providing a high level of physical and mechanical characteristics.

Bibliogr.7, Fig.7, Table 3.

UDC 681.876.2

Guda A.I., Michalev A.I. **The physical background for the identification adaptive-search criterion synthesis of Lorenz dynamic systems** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 13-19.

The article describes the physical basis for creating workable criterion for identifying Lorenz nonlinear chaotic system. Investigations of the properties of the resulting criterion are performed. Created and tested a identification model system for on the basis of this criterion.

Bibl. 10 ill. 5.

UDC 004.93:681.32

Gozhyi A.P. **Multiobjective evolutionary algorithms and methods in decision-making scenario planning** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 20-28.

We consider multi-criteria methods and evolutionary algorithms. Analyzed the main features of the implementation of the basic evolutionary algorithms. Review and analyze the possibility of using evolutionary algorithms in problems of scenario planning.

Bibliogr.10, Fig.2, Table 1.

UDC 669. 183. 012.

Mishalkin A.P., Pshigotskiy S.V., Kamkina L.V. **Increasing the intensity mixing of the liquid bath AOD-converter based on the results of physical modeling of deep blowing** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 29-37.

Specified especially of the mixing bath when applying lateral blast through tuyeres. The possibility of a significant increase in the intensity of the blast when changing placement options tuyeres .

Bibliogr. 3, Fig. 4.

UDC 621.746.6.001.2

Seliverstov V.Yu., Mikhaylovska T.V., Dotsenko Yu.V., Bura U.N. **Features of determination of temperature and temporal parameters of realization of the gaz - dynamyc expulsing of fusion from the siphon gate system of the large casts or bars** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 38-47.

Description of physical and mathematical model of process of thermosetting of metal is resulted in the system sprue - device for the input of gas. By the developed model possibly design of process of thermosetting of fusion with the different variants of configuration and sizes of refrigerator, diameter of sprue, thermophysical properties of metal and form.

Bibliogr. 11, Fig. 2.

UDC 681.51

Zaytsev V.G. **The application of invariant manifolds in problems of optimal control** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 48-56.

Considers the problems of the use of approaches to problems of synthesis of control of technical objects using the optimal invariant manifolds. In the above example shows the new features that makes the use of OIM in problems of synthesis of controllers.

Bibliogr. 9.

UDC 004.9:518.5

Kapitonov A.G. **Determiation of the corrosion current from relaxation measurements** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 57-62.

Within the framework of advanced mathematical model of the potential relaxation under coulono static conditions the method for instant corrosion rate determiation was proposed. The method was relized on the base of computer system and was tested on real electrochemical systems.

Bibliogr. 6.

UDC 669.162.212:669.083.133

Muravieva I.G., Togobitskaya D.N., Beloshapka E.A., Shumelchik E.Yu., Semenov, Yu.S. **Development of integrated criterion for assessing the impact melts in the hearth lining of the blast futnace** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 63-74.

The estimation of impact melts in the hearth lining in the transient period of the blast furnace. It is proposed to be assessed using a integrated evaluation criteria. A variant of this criterion and methods for its further application to extend the campaign of blast furnaces on the example of the DP-9, "Arcelor-Mittal Krivoy Rog."

Bibliogr.6, Fig.2, Table 1.

UDC 519.86:681.51

Poliakov M.O. **The theoretical-multiple models elements and structures of the controller integrated control systems** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 75-81.

The hierarchical structure of the controller integrated control systems is considered. In the set-theoretic level describes typical elements of the functional levels of the controller integrated control systems – control machines and operational machine data and knowledge are described. The set-theoretic model of the control level and the controller integrated control systems are proposed.

Bibliogr. 10.

UDC 519+61:681.3

Prokopchuk Iu.A., Beletsky A.S.. **Technological audit and suboptimization based on the principle of limiting generalizations** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 82-87.

The paper addresses the features of the application of the principle of limiting generalizations to technological audit and suboptimization, in particular of processes in metallurgy. The paper describes a test bank that that is used in the formation of a precedent base and context for knowledge model construction.

Bibliogr. 5.

UDC 519.2:658.8

Chumakov L.D. **Evaluation of the warranty period for technical devices** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 88-94.

Questions of valuing and choice of warranty period for technical device during its working out are discussed.

Bibliogr. 10, Fig.2.

УДК 620.179.16

Babichev S.A., Pogrebnyak I.F., Sharko A.V. **Integrated use of Bayesian networks and fuzzy inference system in a model of determination of the strength characteristics of metals** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 95-103.

A model of fuzzy system determine the strength characteristics of metals using the methods of nondestructive testing based on the integrated use of Bayesian networks and fuzzy inference system. We present a knowledge base upon which the system is tuned fuzzy definition of the strength characteristics of metals.

Bibliogr. 5, Fig. 2, Table 5

UDC 681.5:620.18:621.793

Denysenko O.I. **Application of time intervals as a measured quantity in information and measuring systems** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 104-110.

The paper looks into specifics of applications of time intervals as a measured quantity in information and measuring systems on the levels of digitizing when measuring physical quantities, conjugated registration of time dependences of two and more diagnosed parameters, parameter diagnostics of distribution functions connected with event counting rates.

Bibliogr. 10, Fig. 1.

UDC 004.725.4:519.216

Nedospasov S.A, Myhalov O.I. **Evaluation of self similarity measure Internet - traffic multifractal analysis methods** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 111-117.

To this scenario work the original experiment to collect network traffic and study the existing methods of fractal and multifractal analysis can help you define the extent of self similarity, rate and availability Hirst multyfraktalnosti in traffic.

Bibliogr. 14, Fig. 4, Table 3.

UDC 519.3

Astionenko I.O., Litvinenko O.I., Khomchenko A.N. **Smoothed Approximations of Triquadratic Finite Element** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 118-123.

Smoothing of (according to the least squares method) multiparameter basis functions obtained with the help of analytic method of hierarchy forms construction on a triquadratic finite element is performed in the work.

Bibliogr. 4, Fig. 2, Table 2.

UDC 681.876.2

Mikhalyov O.I., Babenko Yu.V. **Estimation of the work of genetic algorithm with modified operators of mutation and generation of initial population** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 124-129.

In this paper we examine the impact of random generators on the results of work of genetic algorithm. It is proposed to use fractal sequences generated by fractal Gaussian noise as well as by Lorenz, Chua, Roessler chaotic generators instead of the pseudo-random number sequences for the work of genetic algorithm. After experiments the improvement of the results in genetic algorithm revealed while using fractal sequences generated by chaotic generators.

Bibliogr. 10, Table 3

UDC 621.746

Birukov A.B. **Mathematical simulation as instrument for continuous cast ingot heat state in secondary cooling zone monitoring** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 130-136.

Continuous casters heat work mathematical model application as auxiliary tool for automatic control of technological process and ingots forming in secondary cooling zone thermal state monitoring is considered.

The algorithm of mathematical model identification by means of pyrometry that allows to receive in the subsequent reference values of ingot surface temperature for specified set of technological parameters is developed.

The problem of correcting influence onto ingot heat state definition by cooling water for sectors of secondary cooling zone flow rate change depending on specified and real parameters of ingot heat state mismatch is solved.

Bibliogr. 3, Fig. 1.

UDC 621.39

Gnatushenko V.V., Danladi Ali, Michalev A.I. **Research of control of GPRS-network traffic through simulation model** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 137-145.

Capabilities of the most actual for optimisation of soft handover algorithm with relative thresholds are parsed. Agency of an interference on performance of a mobile communication network as a whole is investigated.

Bibliogr. 3, Fig. 12.

UDC 519.711.3

Kabakov D., Samokhvalov S. **Conjugate heat transfer and hydrodynamic processes in the ladle while it is filling** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 146-151.

Mathematical model of conjugate heat transfer and hydrodynamic of the ladle, while it is filling and blowing by inertial gas, was built. The model was implemented in Qt environment using programming language C++.

Bibliogr. 4, Fig. 6.

UDC 622.647.82:51.001.57

Kiriya R.V. **Accumulator bunker mathematical model for conveyer lines of coal mines** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 152-161.

On the basis of markov theory processes by the Howard method the accumulator bunker mathematical model working in the system of underground conveyer transport of coal mines is proposed. The average weight value in bunker is depending on loaded and off-loaded weight flow for different up and under bunker conveyer lines.

Bibliogr. 8, Fig. 1.

UDC 519.24:681

Koshulyan A. **The model of autocorrelated measurement sequences along Jordan trajectory** //System technologies. N 2(79) - Dnipropetrovsk, 2012.- P. 162-173.

There was proposed a stochastic model of autocorrelated measurement sequences along Jordan trajectory that takes into account the correlation between its members "on its tails". The valid parameters of this model and formation algorithms of corresponding sequences were obtained. The basic properties were investigated and confirmed by simulation experiments.

Bibliogr. 6, Fig. 2, Table 3.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Астіоненко Ігор Олександрович – ст. викладач кафедри вищої математики, Херсонський національний технічний університет.

Бабенко Юлія Васильевна – аспірантка кафедри Інформаційних технологій і систем, Національна металургічна академія України.

Бабічев Сергій Анатолійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформатики, Університет Яна Євангеліста Пуркіне, Чехія, Усті-над-Лабем.

Белецький Олександр Семенович – к.т.н., доцент, Український державний хіміко-технологічний університет.

Белошанка Елена Алексеевна – м.н.с. ОТОСУ ТО-1, Інститут чорної металургії ім. З.И. Некрасова НАН України.

Бірюков Олексій Борисович – к.т.н., доцент, доцент кафедри Технічної теплофізики, Донецький національний технічний університет.

Бура Юлія Николаевна – студентка 4-го курсу, кафедри Литейного виробництва, Національна металургічна академія України.

Гайдачук Віталій Євгенєвич – д.т.н., професор, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «Харьківський авіаційний інститут».

Гнатушенко Вікторія Владимировна – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Національна металургічна академія України.

Гожий Олександр Петрович – к.т.н., доцент, декан факультета комп'ютерних наук, Черноморський державний університет ім. П. Могилы.

Гуда Антон Ігоревич – к.т.н., доцент кафедри Інформаційних технологій і систем, Національна металургічна академія України.

Данлади Али – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем, Національна металургічна академія України.

Денисенко Олександр Іванович – к.т.н., доцент кафедри Фізики, Національна металургічна академія України.

Доценко Юрій Валерієвич – к.т.н., доцент кафедри Литейного виробництва, Національна металургічна академія України.

Зайцев Вадим Григорьєвич – к.ф.м.н., доцент, в.о. завідуючого кафедрою Комп'ютерних технологій, Факультет прикладної математики, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.

Кабаков Данііл Юрійович – студент, Дніпродзержинський Державний Технічний Університет.

Камкина Людмила Владимировна – д.т.н., проф., заведующая кафедрой Теории металлургических процессов и физической химии, Национальная металлургическая академия Украины.

Капітонов Олександр Георгійович – к.т.н., доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем, ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет».

Кирия Руслан Виссарионович – к.т.н., ст. научн. сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Кондратьев Андрей Валериевич – к.т.н., доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

Кошуляк Олексій Валентинович – викладач кафедри Радіоелектронної автоматики фізико-технічного факультету, Днепропетровский національний університет им. О. Гончара.

Литвиненко Олена Іванівна – к.т.н., доцент кафедри прикладної математики та математичного моделювання, Херсонський національний технічний університет.

Мешалкин Анатолий Павлович – к.т.н., доцент кафедры Теории металлургических процессов и физической химии, Национальная металлургическая академия Украины.

Михайловская Татьяна Витальевна – к.т.н., доцент кафедры Информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Михалёв Александр Ильич – д.т.н, профессор, заведующий кафедрой Информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Муравьева Ирина Геннадьевна – д.т.н., с.н.с. ОТОСУ ТО-1, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Недоспасов Андрей Александрович – аспирант кафедри Информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Погребняк Ирина Федорівна – аспірантка, асистент кафедри загальної та прикладної фізики, Херсонський національний технічний університет.

Поляков Михаил Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры электрические аппараты, Запорожский национальный технический университет.

Прокопчук Юрий Александрович – к.ф.м.н., доцент, ст. научн. сотр., Институт технической механики НАНУ и ГКАУ.

Пшигоцкий Сергей Владимирович – аспирант кафедры Теории металлургических процессов и физической химии, Национальная металлургическая академия Украины.

Самохвалов Сергей Евгенович – проф., д.т.н., завідувач кафедри Прикладна математика, Дніпродзержинський Державний Технічний Університет.

Селиверстов Вадим Юрьевич – д.т.н., професор кафедри Литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины.

Семенов Юрий Станиславович – к.т.н., научн. сотр. ОТОСУ ТО-1, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Сливинский Владимир Иванович – д.т.н., главный научный сотрудник, Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения».

Тогобицкая Дарья Николаевна – д.т.н., професор, с.н.с. ОФХП, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Харченко Максим Евгеньевич – аспирант, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

Хомченко Анатолий Никифорович – д.ф.-м.н., професор, завідувач кафедри прикладної та вищої математики, Чорноморський державний університет ім. П. Могилы (м. Миколаїв).

Чумаков Лев Дмитриевич – д.т.н., с.н.с., заведующий кафедрой Специализированных компьютерных систем, Украинский государственный химико-технологический университет.

Шарко Александр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри загальної та прикладної фізики, Херсонський національний технічний університет.

Шумельчик Евгений Юрьевич – м.н.с. ОМЧ, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.