

К.В. Баюл, В.И.Петренко

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ БАНДАЖЕЙ ВАЛКОВЫХ ПРЕССОВ

Аннотация. Разработана экспертная система для оптимизации условий эксплуатации бандажей валковых прессов, с помощью которой реализуется комплексный подход к решению задач по определению рациональных режимов работы бандажей на различных стадиях их износа с учетом многофакторности процессов брикетирования мелкофракционных шихт брикетирования и изнашивания бандажей.

Ключевые слова: валковые прессы, бандаж, износ, экспертная система, параметры брикетирования.

Введение. Исследование влияния износа бандажей на параметры брикетирования и работу прессового оборудования требует комплексного подхода, позволяющего учесть многовариантность условий процесса брикетирования и большое количество факторов, влияющих на характер износа рабочей поверхности бандажей.

Целью работы и задачей исследований является создание экспертной системы (ЭС), которая позволит выполнить прогнозную оценку влияния износа на технологические и энергосиловые параметры брикетирования с учетом совокупности всех факторов и возможных их изменения, выбрать наиболее благоприятные режимы работы пресса на разных стадиях износа бандажей, обеспечивающие получение брикетов требуемого качества.

Структура и алгоритм экспертной системы. Для разработки системы использованы основные компоненты и структура типичных ЭС [1]. Структурная схема ЭС представлена на рис. 1.

Базу знаний составляют данные о свойствах шихты, конструкции и характеристиках материала бандажей, параметрах, определяющих условия взаимодействия шихты с рабочими поверхностями бандажей в процессе их изнашивания.

Расчетно-аналитический компонент с помощью данных базы знаний и рабочей памяти, используя расчетно-аналитические методы и модели, заложенные в систему, обеспечивает решение поставленных задач.

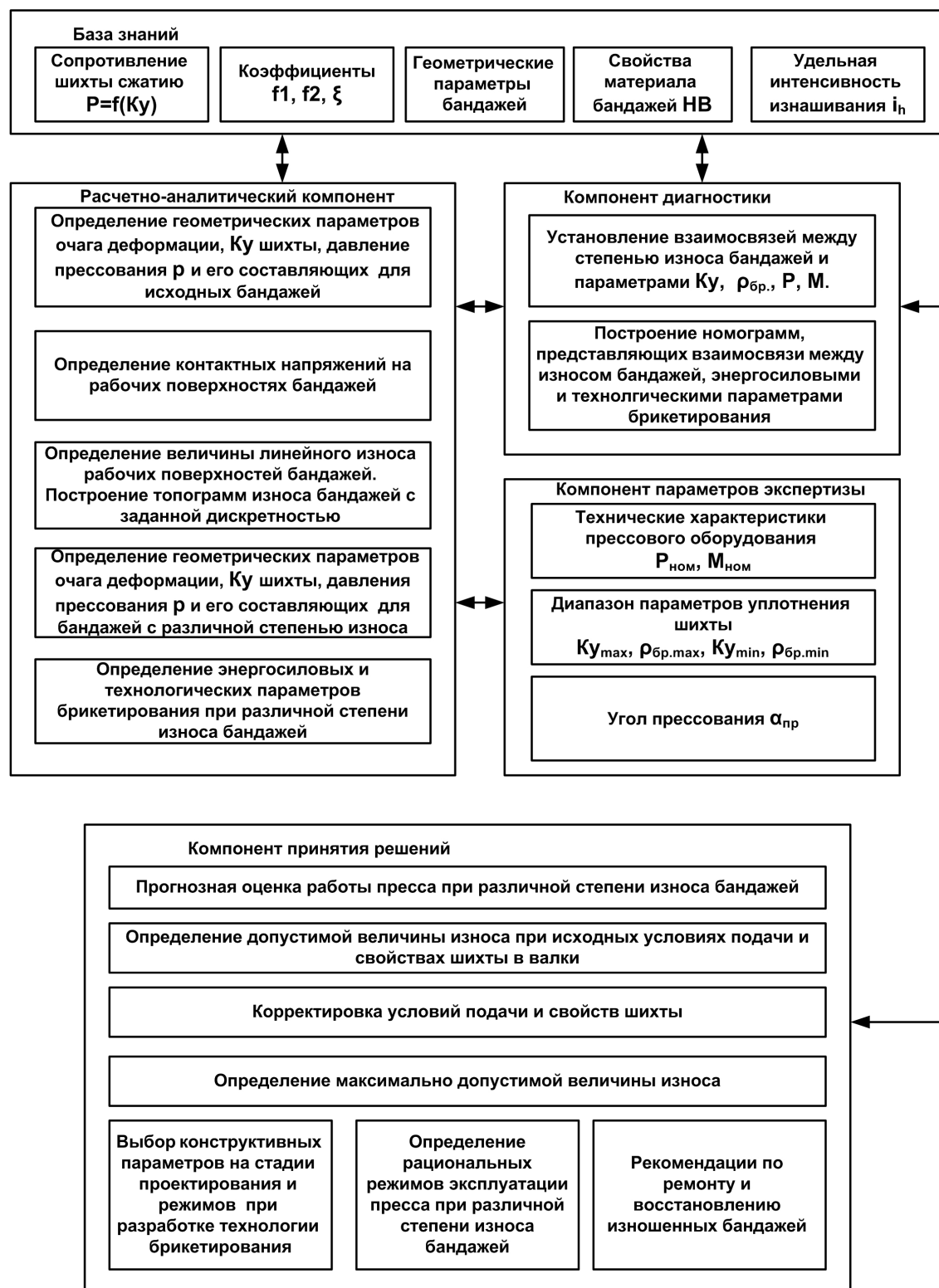


Рисунок 1 – Структурная схема экспертной системы

Полученный в расчетно-аналитическом компоненте массив расчетных данных используется системой в компоненте диагностики для получения аналитических и графических зависимостей, характеризующих взаимосвязи между величиной износа бандажей и характеристиками процесса.

Для их использования сформирован компонент параметров экспертизы, в котором содержатся условия проведения экспертизы: диапазон изменения плотности брикетов, определяемый технологическим регламентом, и технические характеристики прессы.

Компонент принятия решений предлагает варианты возможных решений, рекомендации по их применению. С его помощью можно менять условия задачи, уточнять и корректировать данные из базы данных и базы знаний.

На этом этапе выполняется интегральный анализ факторов, определяющих работу прессы на разных стадиях износа бандажей. Формируется прогнозная оценка работы прессы и бандажей, определяется ресурс их эксплуатации. ЭС позволяет определить границы управления параметрами брикетирования, оказывающими влияние на качество брикетов и режимы работы прессы.

Варьируя данные в базе знаний (изменяя характеристики шихты, выбирая параметры формующих элементов), разрабатываются рекомендации по увеличению продолжительности эксплуатации изношенных бандажей. В результате ЭС формирует блок данных и рекомендаций по рациональной эксплуатации бандажей на различных стадиях их износа.

Использование ЭС при проектировании прессового оборудования позволяет для конкретной шихты с учетом ее свойств определить наиболее рациональные конфигурации и размеры прессующих калибров с точки зрения их износа, выбрать характеристики привода с учетом влияния износа бандажей. Предлагаемая система является прототипом, т.е. начальной стадией разработки ЭС. После апробации ЭС и проверки эффективности ее применения в производственных условиях необходимо создать единый программный аппарат. Для этого выполнена алгоритмизация работы ЭС. На рис. 2 представлена схема алгоритма ЭС. Работа ЭС в соответствии с алгоритмом происходит следующим образом.

Исходные данные в алгоритме объединены в группы и представляют собой базу знаний ЭС.

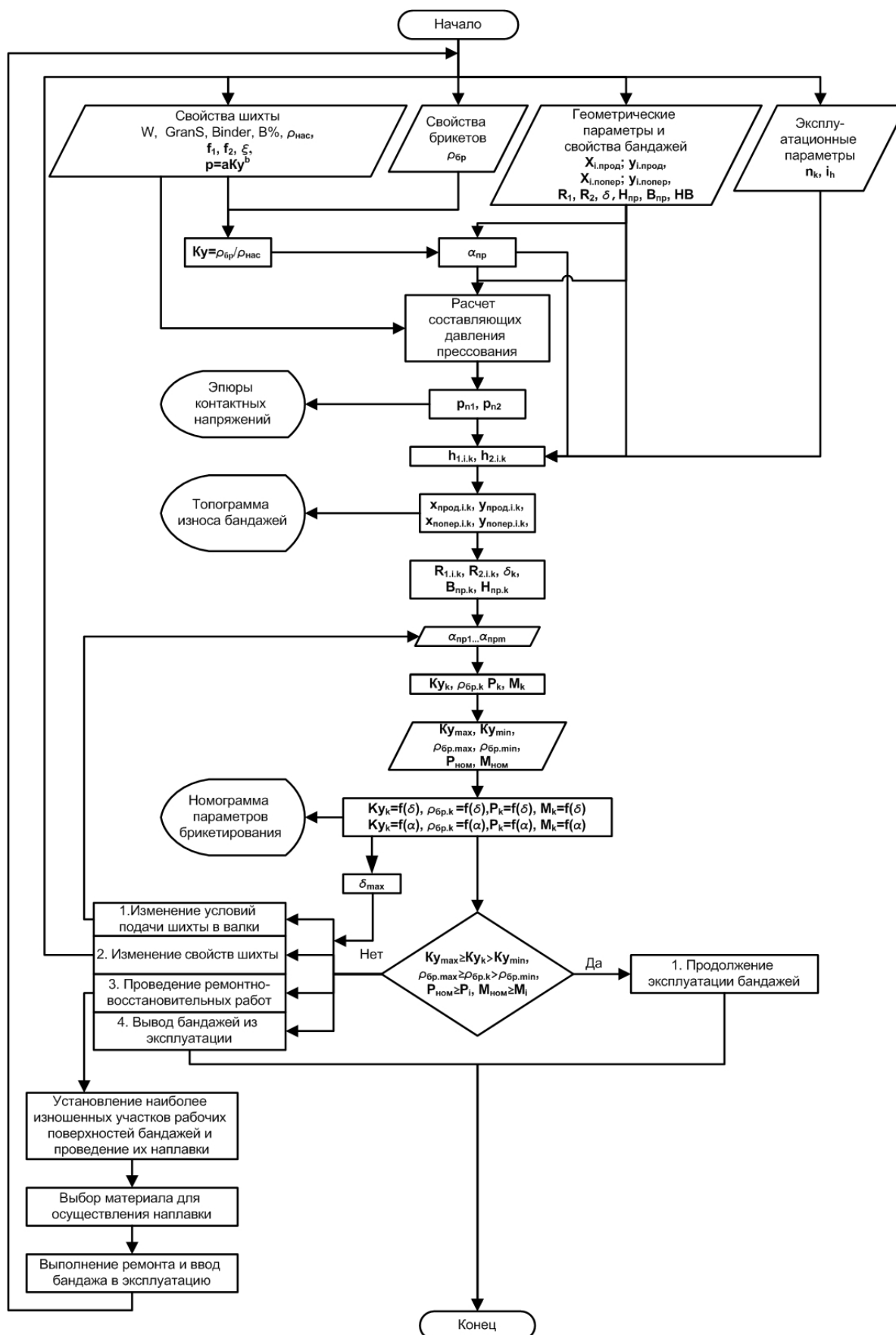


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма экспертной системы

Свойства шихты характеризуются следующими параметрами: влажность шихты W ; гранулометрический состав GranS ; вид связующего Binder ; содержание связующего в шихте $B\%$; насыпная плотность шихты $\rho_{\text{нас}}$; коэффициенты внешнего трения f_1 , внутреннего трения f_2 , бокового давления ξ ; коэффициент уплотнения Ky ; уравнение сопротивления шихты сжатию $p = f(Ky)$.

В качестве параметра, определяющего свойства и качество брикетов, задается их плотность $\rho_{\text{бр}}$. При дальнейшем развитии прототипа экспертной системы возможно дополнение параметров, характеризующих свойства брикетов (например, прочность).

Характеристики бандажей валкового пресса: конфигурация формующего элемента представлена координатами контура формующего элемента в поперечном $x_{\text{попер}}$, $y_{\text{попер}}$ и продольном $x_{\text{прод}}$, $y_{\text{прод}}$ сечениях, а также приведенной высотой $H_{\text{пр}}$ и шириной $B_{\text{пр}}$ формующего элемента; геометрия очага деформации задана радиусами R_1 , R_2 и зазором между валками δ ; указана твердость рабочих поверхностей бандажей HB .

Параметры эксплуатации бандажей включают удельную интенсивность изнашивания i_h и периоды их эксплуатации k , выраженные в количестве оборотов валков $n_1, \dots, n_k$ с заданной дискретностью.

Используя зависимость $p = f(Ky)$, определяются давление прессования и его составляющие в очаге деформации валкового пресса. На основании полученных силовых характеристик процесса выполняется расчет значений контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей.

Алгоритмом предусмотрено графическое представление распределения контактных напряжений на рабочих поверхностях бандажей в виде эпюр.

Следующей стадией работы ЭС является расчет и построение топограмм износа бандажей – графического отображения контуров рабочей поверхности бандажей, соответствующих различной степени их износа. Для заданных периодов эксплуатации k с помощью математической модели износа бандажей определяются значения линейного износа $h_{1.i.k}$, $h_{2.i.k}$, координат контуров рабочих поверхностей $x_{\text{попер.i.k}}$,

$U_{\text{попер.i.k}}$; $X_{\text{прод.i.k}}$, $U_{\text{прод.i.k}}$ бандажей в их поперечных и продольных сечениях. На основе полученных массивов расчетных данных выполняется построение топограмм износа бандажей.

Далее с помощью топограмм определяются технологические Ky_k , $\rho_{\text{бр.k}}$ и энергосиловые параметры P_k , M_k брикетирования на разных стадиях износа бандажей. Используя полученный массив данных, строится номограмма – графическое отображение взаимосвязей между величиной износа бандажей, технологическими и энергосиловыми параметрами брикетирования для различных условий подачи материала в валки (для исходного значения угла прессования и для возможного диапазона его изменения $\alpha_{\text{np1}}, \dots, \alpha_{\text{npm}}$). Полученная номограмма используется компонентом принятия решений ЭС для выполнения прогнозных и экспертных оценок условий эксплуатации бандажей.

На основании полученных прогнозных оценок, для каждой величины износа определяется режим эксплуатации пресса: величина угла прессования α_{np} , значения усилия P_k , и момента прессования M_k , а также предельные значения износа рабочей поверхности бандажей - зазор между валками δ_k и угла прессования α_{np} , при достижении которых принимается решение о выведении бандажей из эксплуатации.

Одной из задач, решаемой с помощью ЭС, является корректировка технологического режима получения брикетов из заданного материала, т.е. изменение свойств шихты с целью достижения требуемых технологических показателей на разных стадиях износа бандажей. Возможно несколько вариантов решения этой задачи. Достижение требуемой величины уплотнения шихты в значительной мере зависит от ее сопротивления сжатию, описываемого уравнением $p = a \cdot Ky^b$, где p - давление прессования, a и b - коэффициенты, характеризующие свойства шихты. Корректировка свойств шихты выполняется таким образом, чтобы уменьшить силовые характеристики процесса брикетирования за счет изменения ее сопротивления сжатию, что позволит увеличить пределы регулирования подачи шихты в валки и расширить диапазон эксплуатации бандажей. Изменение сопротивления шихты сжатию можно достичь путем изменения таких параметров, как влажность шихты W , гранулометрический состав GranS , вид связующего Binder и его процентное $B\%$ содержание в шихте.

Следующей задачей, решаемой ЭС, является определение способа и объема ремонтно-восстановительных работ. Для восстановления исходного контура рабочей поверхности бандажей используются топограммы износа. Ремонтно-восстановительные работы состоят в наплавке изношенных участков бандажей и последующей механической обработке наплавленного слоя металла с целью обеспечения исходных геометрических параметров рабочих поверхностей бандажей. С помощью ЭС устанавливается распределение износа по контуру формирующего элемента, выделяются локальные зоны наибольшего износа, определяется толщина наплавленного слоя на различных участках рабочей поверхности бандажей.

На каждой стадии работы ЭС эксперт оценивает целесообразность применения описанных выше способов увеличения ресурса эксплуатации бандажей или принимает решение о выводе изношенных бандажей из эксплуатации.

Например, изменение вида связующего может потребовать значительных изменений в технологической линии.

Условия возможности выполнения ремонтно-восстановительных работ бандажей также зависят от наличия технических возможностей предприятия, технического состояния бандажа, особенно в том варианте, если ранее он уже подвергался ремонту путем наплавки.

Особенно эффективно применение ЭС на стадии проектирования прессового оборудования и выбора технологических режимов брикетирования. ЭС позволяет оценить влияние большого количества факторов на условия эксплуатации бандажей и их износ, оптимизировать выбор конструктивных параметров пресса и характеристик брикетируемого материала.

Варианты решения задач по прогнозированию и увеличению ресурса эксплуатации бандажей. С использованием разработанной системы, показаны варианты решений практических задач для реальных шихт и конструктивных параметров бандажей, используемых на существующих установках по производству брикетов. В табл. 1 приведены основные расчетные данные, использованные для данных вариантов задач.

В первом варианте выполнена прогнозная оценка параметров брикетирования на разных стадиях износа бандажей для шихты, на основе силикомарганца фр. -6мм. Определена предельно допустимая

величина износа бандажей 8,5мм и диапазон регулировки подачи шихты в валки 10,0°... 15,7°.

В варианте 2 показана возможность увеличения ресурса эксплуатации бандажей за счет изменения свойств шихты. Изменение фракционного состава отсева силикомарганца фр. -6мм на фр.-3мм позволило увеличить ресурс эксплуатации бандажей на 26%.

В варианте 3 показано влияние геометрических параметров формующего элемента на величину достигаемого уплотнения и на износ бандажей. Изменение конфигурации формующих элементов позволило увеличить ресурс эксплуатации бандажей на 12%. Разработанная экспертная система позволяет учесть неоднозначность влияния этого параметра и оценить его возможные сочетания и комбинации с другими характеристиками процесса брикетирования, т. е. оптимизировать работу по выбору рациональных конфигурации и размеров формующих элементов.

Таблица 1

№ Вар-ианта	Шихта	Размеры формующих элементов, мм	$\delta_{\max}$, мм	$n_{\max}$, об.	$\rho_{бp.k}$	Ky_k	α , град	P_k , кН	M_k , кН·м
1.	96,5% SiMn (фр. -6мм) + 3,5% ОС	39,8×36,0×17,5	8,5	87816	3,6... 4,5	1,80... 2,14	10,0... 15,7	200... 520	18... 56
2.	98,5% SiMn (фр. -3мм) + 1,5% ОС	39,8×36,0×17,5	9,3	118190	3,6... 4,7	1,80... 2,17	12,4... 16,2	75... 530	7... 56
3.	96,5% SiMn (фр. -6мм) + 3,5% ОС	62,6×60,0×27,0	11,3	100247	3,6... 4,3	1,80... 2,05	15,2... 18,9	200... 540	20... 56
4.	Каолин W=10%	31,4×33,0×14,5	2,8	28049	1,9... 2,1	1,90... 2,10	13,5... 16,0	75... 180	20... 45
	Каолин W=15%	31,4×33,0×14,5	5,4	60975	1,9... 2,1	1,90... 2,10	13,5... 16,0	60... 125	15... 35
5.	97% коксовой мелочи + 3% ОС	39,8×36,0×17,5	3,5	55700	1,3... 1,5	2,42... 2,79	14,3... 19,8	230... 580	20... 56
	85% коксовой мелочи + 7,5% извести + 7,5% мелассы	39,8×36,0×17,5	3,5	79950	1,3... 1,5	2,42... 2,79	13,3... 20,0	139... 500	12... 50

Вариант 4 показывает возможность оптимизировать выбор технологических режимов брикетирования. Изменение влажности каолина с 10% на 15% существенно изменило сопротивление шихты сжатию. Уменьшились давление прессования и контактные напряжения на поверхностях бандажей. Это привело к значительному снижению изнашивания бандажей.

В варианте 5 показано влияние связующего вещества на изменение параметров брикетирования и ресурс эксплуатации бандажей. Величина максимально допустимого износа бандажей при использовании обоих видов связующего одинакова – 3,5мм, но при этом она достигается за разное количество оборотов валков пресса. При использовании органического связующего максимальный износ достигается за 55700 оборотов валков пресса, а при использовании в качестве связующего вещества извести и мелассы – за 79950, т.е. замена связующего вещества позволила увеличить ресурс эксплуатации бандажей на 30%.

Таким образом, на конкретных примерах показаны возможности системы в решении задач прогнозирования и оценки влияния износа на энергосиловые и технологические параметры процесса брикетирования, установления предельных величин износа и выбора путей повышения ресурса бандажей за счет технологических и технических приемов.

Выводы. Разработанная экспертная система позволяет в условиях действующего производства в оперативном режиме осуществлять оценку возможности эксплуатации изношенных бандажей, корректировать режим работы пресса и технологические характеристики шихты с целью увеличения рабочего ресурса комплекта бандажей.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://khpi-iip.mipk.kharkiv.edu/library/ai/conspai/> Морозов М.Н. Курс лекций по дисциплине "Системы искусственного интеллекта" Лаборатория систем мультимедиа, Марийский государственный технический университет.

С.А. Борзов, В.Н. Журавлев

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРОЦЕССА ВИБРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: Исследованы современные методы обнаружения процесса вибрационного горения в узлах камер сгорания газотурбинных двигателей. Выполнен анализ «сильных» и «слабых» сторон каждой группы методов. Рассматриваются физические процессы виброгорения как в основных, так и в форсажных камерах сгорания. Приведены результаты экспериментальных замеров вибраций корпуса камеры сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, виброгорение, горение, пульсации давления, сертификационные испытания.

Введение. Постановка задачи. При проектировании и сертификации газотурбинных двигателей для гражданских и военных летательных аппаратов нормативной документацией [1] оговаривается необходимость проведения расчетно-экспериментальных работ по определению границ устойчивой работы камеры сгорания. Признаками стабильной работы камеры сгорания является работа без срывов пламени и вибрационного горения, которое можно характеризовать как неустойчивое горение, с изменяющимися во времени динамическими характеристиками давления.

Нормативной документацией [1] оговариваются:

- 1) схема препарировки основной и форсажной камеры сгорания (в случае ее применения);
- 2) измерительная аппаратура для проведения работ;
- 3) методы обработки результатов.

Данная методика проведения работ применяется в течение длительного периода времени и, в связи с развитием средств измерений и методов цифровой обработки сигналов, требует, на наш взгляд, - оптимизации и адаптации к существующему уровню техники и научно-техническому потенциалу научных организаций авиационной промышленности.

Основная часть. Для анализа методик нами выбраны следующие параметры:

1. Информативность и точность критериев обнаружения процесса вибрационного горения и определения его параметров;
2. Финансовые затраты необходимые для реализации всего комплекса работ;
3. Трудоемкость методик в процессе испытаний изделия.

Третий параметр является обобщающим, во многом перекликается с первыми двумя, но он дополняет их для получения объективного производственного результата оценки.

Виброгорение, возникающее при сжигании газообразных и жидких топлив является частным случаем процесса горения как такового. Горение это экзотермическая реакция между топливом и окислителем, в роли которого выступает кислород атмосферного воздуха. Высвобождение энергии в химической реакции наиболее существенная стадия такого процесса. Считается, что частота колебаний давления газа в основной камере сгорания (при наличии процесса вибрационного горения) принимает значение от 100 до 800 Гц. В форсажных камерах сгорания диапазон частот шире и составляет от 300 до 1200 Гц. Следует отметить тот факт, что колебания давления газа происходят во всех направлениях, как в окружном, так и в продольном, и могут наблюдаться как на установившихся, так и на переходных режимах работы системы двигатель-летательный аппарат. Важную роль в определении опасности последствий играют его параметры, такие как: частота пульсаций, амплитуда пульсаций, декремент затухания амплитуды, режим работы двигателя (переходной или стационарный). В большинстве случаев необходимо точно определить параметры работы двигателя, при которых может проявиться вибрационное горение.

Качественная оценка наличия виброгорения основана на анализе колебаний давления газа по всей длине камеры сгорания. Датчики избыточного давления [3] и дифференциально-индуктивные малогабаритные датчики [2] рекомендованы для проведения работ и имеют паспортную погрешность до 10% от величины максимально допустимого измеряемого давления. Для определения характеристик колебаний используется специальный программный комплекс с лицензионным программным обеспечением [4]. Следует отметить, что

для установки датчиков давления требуется выполнение дополнительных, трудоемких работ по конструкторско-технологическому проектированию и изготовлению препарированных (лабораторных) корпусов камер сгорания. Как правило, для дальнейшей эксплуатации препарированная материальная часть не допускается, в результате чего предприятие несёт существенные затраты. Часто (в гондоле двигателя) при испытаниях может возникнуть ситуация когда физически не достаточно места для размещения приборов препарировки дополнительно к уже имеющейся. Крупногабаритные двигатели не всегда можно испытать в термобарокамере и испытания в таких случаях проводятся на самолете летающей лаборатории, это может вызывать дополнительные трудности в проведении работ.

Если проанализировать современные методики обнаружения признаков процесса вибрационного горения, то можно выделить несколько основных направлений выполнения работ.

Во-первых, описанная выше классическая методика. Она имеет ряд преимуществ, главным из которых является то, что она проверена на большом количестве двигателей различной типовой конструкции. Благодаря этой методике обнаруживаются области нестабильной работы системы летательный аппарат-двигатель во всем диапазоне эксплуатационных характеристик летательного аппарата, которые впоследствии можно исключить из области выполнения полетных заданий и она также предоставляет возможность проверки эффективности найденных средств нейтрализации процесса виброгорения. Однако наравне с преимуществами, такая методика имеет и ряд недостатков:

1. Необходима доработка базового конструкторского профиля деталей и сборочных единиц узла камеры сгорания, что вызывает временные и финансовые издержки.

2. Необходимо наличие дополнительного сертифицированного программного обеспечения.

3. Необходима установка и привязка датчиков давления к горячим частям двигателя (обычно рабочая температура датчиков давления не должна превышать 80°C).

4. Необходима периодическая тарировка датчиков.

5. Погрешность измерения параметров пульсаций датчиками давления относительно высока.

6. При включении анализа пульсаций давлений в автоматическую систему управления двигателем (на постоянной основе) происходит ее усложнение.

Вторая группа может быть охарактеризована как бесконтактные методики. Метод [5] основан на регистрации света с помощью волоконной оптики т.е. световод передает энергию излучения на фотоэлектронный умножитель. Он является наиболее информативными и передовыми, поскольку одновременно с обнаружением виброгребня он позволяет визуализировать реагирующие потоки и количественно определять концентрации основных химических веществ. На режимах вибрационного горения частота колебаний излучения радикалов СН и С₂ (продукты сгорания углеводородных топлив) совпадает с частотой колебаний давления газа в камере сгорания. Для оценки бесконтактных методов можно сделать несколько следующих замечаний.

1. Необходима доработка базового конструкторского профиля деталей и сборочных единиц узла камеры сгорания, что вызывает временные и финансовые издержки.

2. Необходимо наличие дополнительного программного обеспечения.

3. Необходима установка и привязка датчиков к конфигурации обводов двигателя.

4. Необходима периодическая тарировка датчиков. Опыт работы нашего предприятия с оптическими регистраторами типа пирометров говорит о том, что с увеличением времени наработки, вследствие загрязнения оптических элементов датчиков продуктами сгорания топлива, их чувствительность значительно снижается и может достичь неприемлемой.

5. При включении анализа пульсаций давлений в автоматическую систему управления двигателем происходит ее усложнение.

6. Трудно обеспечить доступ луча света в разные зоны внутреннего объема жаровой трубы. Пока не выполнен набор статистических данных о зоне, генерирующей вибрационное горение,

необходимо производить замеры в каждой из трех зон жаровой трубы - в первичной вторичной и зоне разбавления.

Имеются патентные формулы по использованию методики, которая регистрирует изменение частот колебаний параметров газодинамического движения частиц в газе и определяет наличие или отсутствие вибрационного горения. При этом регистрацию изменения параметров газодинамического движения производят электростатическими антеннами без контакта с двигателем и его газодинамической струей, фиксируют временную реализацию сигнала колебаний электростатического поля, определяют спектральную плотность в спектре мощности временной реализации этого сигнала, сравнивают с эталонным значением спектральной плотности и в случае превышения определяемого параметра заданного эталонного значения, определяют частоту, на которой произошло превышение, сравнивают эту частоту со значениями частот вибрационного горения данной камеры сгорания и вырабатывают сигнал в систему контроля двигателя о наличии вибрационного горения [6]. К недостаткам такого метода регистрации следует отнести сложность обработки сигнала. Также вызывает вопросы эффективность переноса места замера процесса виброгорения с узла камеры сгорания в выходное сечение всего двигателя. В такой компоновке размещения датчиков трудно определить источник колебаний, и как следствие, затруднен подбор мероприятий по преодолению проявления признаков режима виброгорения.

В третьей группе методик используются датчики вибраций для определения наличия режима вибрационного горения на газотурбинном двигателе. Методика основана на регистрации вибрационных сигналов с последующей их обработкой методами узкополосные спектрального анализа [7,8]. Поскольку виброгорение есть колебательный процесс то возможно измерить вибрации корпуса камеры сгорания. Физическая модель данного метода основана на главном законе теории упругости – законе Гука. Этот закон связывает величину напряжения с величиной деформации упругой среды. В корпусе камеры сгорания при его деформации пульсациями давления газа возникает сила упругости, которая прямо пропорциональна величине этой деформации. Датчик вибраций как раз и фиксирует возникающие упругие деформации. При проведении

испытаний на двигателе Д-27 на стенде предприятия ГП «Ивченко-Прогресс» была проведена работа по измерению уровня вибраций корпуса камеры сгорания одновременно с замером пульсаций давления газа в полости камеры сгорания – результат работы представлен на рис. 1. Результаты исследований и обработки сигнала показали, что процесс виброгорения отсутствует. Такой результат подтверждается измерениями, проведенными ранее на летательном аппарате. Сигнал вибрационного датчика был обработан согласно методике представленной в [1]. Программное обеспечение разработано сотрудниками предприятия ГП «Ивченко-Прогресс».

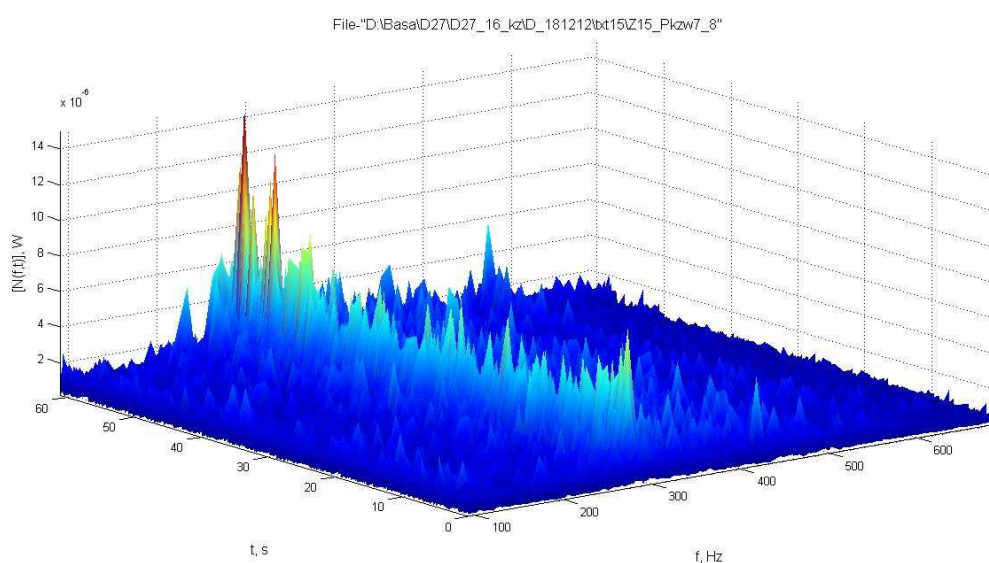


Рисунок 1 - Зависимость величины амплитуды колебаний от их частоты

В наземных газотурбинных двигателях проблема вибрационного горения решается более успешно [6] благодаря отсутствию жестких требований по габаритно-массовым характеристикам (практически не ограничивается количество и геометрические параметры устанавливаемых датчиков и их коммуникаций). С другой стороны, можно с определенностью сказать, что это произошло вследствие его частого обнаружения при их создании и эксплуатации. Появление процесса вибрационного горения в камерах сгорания наземных ГТД обусловлено особенностью их работы. К наземным двигателям применяются значительно более жесткие нормы ограничения эмиссий в выхлопных газах, что в свою очередь диктует работу узла камеры сгорания на предельно

обедненных топливно-воздушных смесях (для снижения температуры газов в первичной зоне жаровой трубы). Работа на «бедных» смесях, как широко известно, и служит «катализатором» вибрационного горения.

В настоящее время считается прогрессивным шагом обеспечение (на двигателях наземного применения) постоянного контроля величины пульсаций газа в узле камеры сгорания, что позволяет быстро и адекватно реагировать на возникновение вибрационного горения в двигателе во время его штатной работы [6]. За время длительной эксплуатации характеристики двигателя могут претерпеть изменения в сторону ухудшения (увеличиваются зазоры между ротором и статором, происходит частичный износ узлов подшипников, изменяются параметры топливных насосов и т.д.) и, как правило, увеличивается вероятность возникновения процесса вибрационного горения. Вследствие этих факторов и появились системы следящие за работой двигателя в режиме реального времени изначально интегрированные разработчиками двигателей в систему управления двигателем.

Результаты анализа сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Сравнение характеристики методик анализа процесса виброгорения

Наименование методики	Замер пульсаций давления газа датчиками давления	Замер пульсаций давления газа бесконтактно	Замер пульсаций давления газа датчиками вибраций
Достоинства	1) Успешно опробована на большом количестве различных двигателей. 2) признана сертификационными организациями	1) Возможно измерение большого количества дополнительных параметров, таких как концентрации химических веществ 2) визуализация потоков	1) Успешно опробована на достаточном количестве двигателей наземного применения. 2) не требует значительных финансовых затрат 3) низкая погрешность измерений

Недостатки	1) Требуются значительные временные и финансовые затраты 2) Сложность получения результатов в режиме реального времени 3) Высокая погрешность измерений	Требуются значительные временные и финансовые затраты	Не признана сертификационным и органами
Степень готовности промышленного применения	Максимальная	Минимальная	Максимальная

Выводы. Для газотурбинных двигателей метод использования датчиков вибраций для определения наличия режима вибрационного горения имеет ряд преимуществ по сравнению с перечисленными выше. Соотношение между величиной затрат для его проведения и качеством получаемых результатов можно считать оптимальным.

1. Никаких доработок стандартной (серийной) материальной части не требуется. Датчик устанавливается на любой болт – шпильку с помощью волновода длиной 100...300 мм.

2. Вибродатчик устанавливается на волноводе и имеет невысокую рабочую температуру, что увеличивает срок его службы. При обнаружении области с высокой температурой в подкапотном пространстве двигателя, можно увеличить длину волновода и переместить датчик в зону с более низкой температурой.

3. Не требуется постоянная тарировка датчика.

4. Погрешность измерения на порядок ниже.

Поскольку на данный момент времени применяется несколько методов обнаружения процесса вибрационного горения при работе двигателя - это подтверждает серьезное отношение к этой проблеме у ведущих фирм [5,6,7] производителей и разработчиков газотурбинных двигателей. Также с определенностью можно сказать и о том, что попытки оптимизировать решение данной проблемы не прекращаются до сих пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные правила часть 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов. Международный авиационный комитет. с. 82.
2. Датчики давления индуктивные дифференциальные малогабаритные ТУ-ДМИ-67.
3. Датчики давления МИДА 13П и взрывозащищенные МИДА-13П-Ех ТУ 4345-044-18004487-98.
4. Прибор для измерения, регистрации и анализа параметров вибрационных процессов. Руководство по эксплуатации с. 37 НПП "Мера" Россия г. Королев. Режим доступа <http://www.nppmera.ru/documentation>
5. Экспериментальная обработка методов исследования вибрационного горения в камерах сгорания ГТУ. А.Н. Дубовицкий, С.В. Иванова ФГУП «ЦИАМ им. Баранова» г. Москва. Режим доступа: http://www.avid.ru/upload/pages/5914/sbornik_137-138.pdf
6. Способ контроля вибрационного горения в камере сгорания газотурбинного двигателя. Голенцов Д. А., Божков А. И. Заявка: 2004125512/06, 23.08.2004 Федеральное государственное унитарное предприятие "ЦИАМ им. П.И. Баранова". Режим доступа <http://bd.patent.su/2272000-2272999/pat/servlet/servletcf8e.html>
7. Потерянский Л.И. Исследование вибрационного состояния газотурбинной установки SIMENS V64.3A на пусковых режимах и под нагрузкой при опытно-промышленной эксплуатации. Потерянский Л.И, Потерянский С.Л ЗАО «Кварц – Западная Сибирь». Режим доступа http://www.nppmera.ru/assets/files/vibro-expert_example.pdf
8. Беляев В.В. Повышение экологической безопасности путем организации малоэмисионного горения в камерах сгорания ГТД. Самарский научно-технический комплекс имени Н.Д Кузнецова. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Режим доступа <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-ekologicheskoi-bezopasnosti-gtu-putem-organizatsii-maloemissionnogo-goreniya-v-ka>

О.П. Гожий, І.А. Кобилінський

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ СПІВВІДНОШЕНЬ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ВИБОРУ

Анотація. В статті розглянуто методи вирішення багатоцільових задач на основі методу аналізу співвідношень. Було розглянуто особливості побудови співвідношень та точок відліку для методів MULTIMOORA, та MULTIMOORA-FG. Наведені результати порівняння методів.

Вступ. Серед значної кількості методів вирішення багатоцільових задач (оптимізаційних, еволюційних, експертних та інш.) останнім часом динамічно розвиваються група методів на основі методу аналізу співвідношень [1-5].

Метод аналізу співвідношень (MOORA) вперше був представлений Брауерсом і Завадскасом в 2006 році. Вхідними даними для даного методу є набір визначених альтернатив і цілей, що представляються у вигляді матриці $m \times n$, де елементи матриці x_{ij} – відношення альтернативи i до цілі j ; i m – число альтернатив; n – число цілей. В методі спочатку визначається система співвідношень, а потім визначається точка відліку.

Система співвідношень (*RatioSystem*) визначається як відношення альтернативи до цілі, що порівнюється зі знаменником, який є сумою всіх відношень альтернатив до даної цілі. Для цього знаменника найкращим рішенням буде квадратний корінь із суми квадратів відношення кожної альтернативи до цілі:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad (1)$$

де x_{ij} – відношення альтернативи i до цілі j ; $i = 1, 2, \dots, m$, m – кількість альтернатив; $j = 1, 2, \dots, n$, n – кількість цілей; x_{ij}^* – число, яке представляє нормоване відношення альтернативи i до цілі j [2].

Нормовані відношення альтернатив до цілей знаходяться в інтервалі $[0; 1]$. Але, інколи інтервал може бути $[-1; 1]$. Для оптимізації, такі значення будуть додаватися у випадку максимізації і відніматися у випадку мінімізації:

$$y_i^* = \sum_{j=1}^{j=g} w_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^{j=n} w_j x_{ij}^*, \quad (2)$$

де $j = 1, 2, \dots, g$ – цілі, які повинні максимізуватися; $j = g + 1, g + 2, \dots, n$ – цілі, які повинні мінімізуватися; w_j – коефіцієнт важливості цілі (нормований або ненормований); y_i^* – оцінка альтернативи i з врахування всіх цілей [1, 2].

Значення y_i^* може бути як додатнім, так і від'ємним, в залежності від кількості цілей, що максимізуються та мінімізуються. Порядкове ранжування y_i^* за спаданням і визначає кінцевий вибір [7].

Теорія точки відліку (*ReferencePoint*) заснована на системі співвідношень [1, 2]. Використання теорії точки відліку починається з уже нормалізованих співвідношень. Далі обирається найбільше значення нормалізованої оцінки альтернативи для кожної цілі, у випадку, коли ціль максимізується, та найменше – коли мінімізується. Точка відліку називається реалістичною і не суб'єктивною, коли координати, підібрані для точки відліку, реалізовані в одному з варіантів альтернатив [3]. Наприклад, у нас є три альтернативи, що описані наступним способом: $A(10, 100)$, $B(100, 20)$ і $C(50, 50)$, а також всі цілі повинні максимізуватися, то в даному випадку ідеальна точка відліку R_m має координати $(100, 100)$. Для визначення метрики для точки відліку найкраще підходить метрика мінімаксуЧебишева, за якою оптимальне рішення визначається як [1, 2, 4]:

$$y^* = \min_i y_i^*, \quad (3)$$

де y_i^* – пріоритет альтернативи – визначається як

$$y_i^* = \max_j \left(w_j \cdot \left| r_j - x_{ij}^* \right| \right), \quad (4)$$

де x_{ij}^* – нормалізоване відношення альтернативи i до цілі j ; $i = 1, 2, \dots, m$, m – кількість альтернатив; $j = 1, 2, \dots, n$, n – кількість ці-

лей; w_j – коефіцієнт важливості цілі (нормований або ненормований); r_j – точка відліку для цілі j (якщо ціль максимізується, максимальне значення нормованих оцінок альтернатив для цілі j , якщо мінімізується – мінімальне значення); y_i^* – оцінка альтернативи i з врахування всіх цілей. Порядкове ранжування y_i^* за зростанням i визначає кінцевий вибір[1].

Мультиплікативна форма для багатьох цілей (*Full Multiplicative Form*) була представлена Міллером і Старом в 1969 році. Це нелінійна, неадитивна форма, яка не використовує коефіцієнти важливості для кожної з цілей [6].

Для визначення безрозмірної корисності альтернативи використовується мультиплікативна форма Міллера і Стара:

$$U_i = \prod_{j=1}^n x_{ij}, \quad (5)$$

де x_{ij} – оцінка альтернативи i до цілі j ; $i = 1, 2, \dots, m$, m – кількість альтернатив; $j = 1, 2, \dots, n$, n – кількість цілей; U_i – безрозмірна корисність альтернативи i [6].

Використання вагових коефіцієнтів для визначення корисності альтернативи не є необхідним, оскільки в результаті отримаємо пропорційні величини корисності.

Для використання мультиплікативної форми як для цілей, що мінімізуються, так і для цілей, що максимізуються, будемо користуватись формулою

$$U'_i = \frac{A_i}{B_i}, \quad (6)$$

де $A_i = \prod_{j=1}^g x_{ij}$ та $B_i = \prod_{j=g+1}^n x_{ij}$; де $j = 1, 2, \dots, g$ – цілі, які повинні максимізуватися; $j = g + 1, g + 2, \dots, n$ – цілі, які повинні мінімізуватися; U'_i – безрозмірна корисність альтернативи i з врахуванням всіх цілей [6].

Формула (6) називається *повною мультиплікативною формою*.

Метод MULTIMOORA – наступний крок у вирішенні задач багатоцільового прийняття рішень і був представлений Брауерсом і Завадскасом у 2010 році. MULTIMOORA є найбільш стійкою системою

багатоцільової оптимізації з сумісним використанням методу Delphi [6, 10].

Метод MULTIMOORA комбінує в собі стандартний підхід MOORA і повну мультиплікативну форму [6, 9]. Схема методу наведена на рис. 1.

Для визначення остаточного ранжування альтернатив, використовується теорія домінування рангів, отриманих для всіх альтернатив на всіх етапах методу MULTIMOORA [8, 9].

Основні аксіоми теорії домінування рангів

1. Для порядкової шкали ранжування завжди можливе.
2. Порядкова шкала не може створити набір кардинальних чисел
3. Порядкова шкала одного типу може бути переведена в порядкову шкалу іншого.

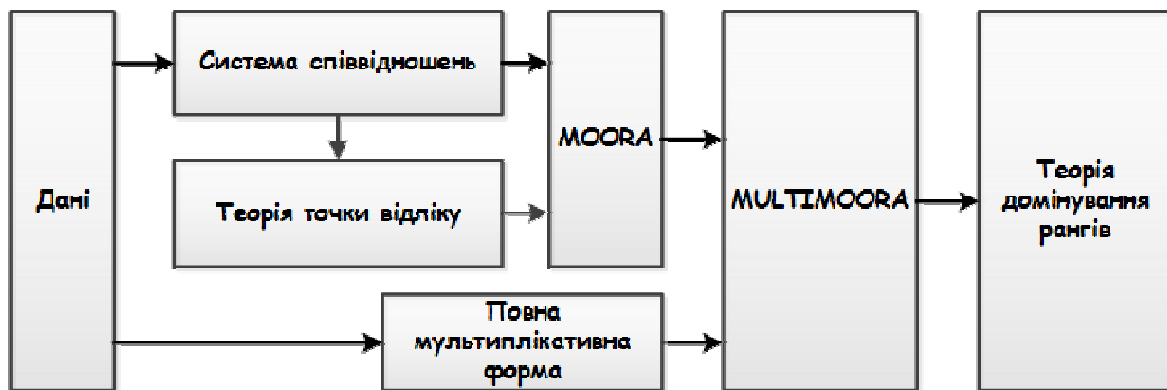


Рисунок 1 - Схема методу MULTIMOORA

Порівняння рангів з використанням теорії домінування

В методі MULTIMOORA для визначення рангів використовується елементи теорії домінування. В даному випадку корисність альтернативи представляється у безрозмірному вигляді, тому і важливість кожного методу буде однаковою [8, 9].

Абсолютне домінування означає, що альтернатива має найвищий ранг за кожним з методів (1; 1; 1).

Загальне домінування у 2-ох із 3-ох випадків для рангів альтернатив $a < b < c < d$:

- $(d; a; a)$ в загальному переважає $(c; b; b)$;
- $(a; d; a)$ в загальному переважає $(b; c; b)$;
- $(a; a; d)$ в загальному переважає $(b; b; c)$.

Транзитивність. Якщо a домінує над b , а b домінує над c , то a домінує над c .

Повна перевага однієї альтернативи над іншою. Наприклад $(a; a; a)$ повністю переважає $(b; b; b)$ і $(b; b; b)$ іде одразу після $(a; a; a)$ за рангом.

Абсолютна рівність має форму, наприклад, для двох альтернатив з $(e; e; e)$.

Часткова рівність у двох із трьох випадків має форму $(5; e; 7)$ і $(6; e; 3)$, коли неможливо встановити загальне домінування.

Замкненість рангів з порушенням транзитивності має форму, наприклад:

–Об’єкт А $(11; 20; 14) \succ$ Об’єкт В $(14; 16; 15)$;

–Об’єкт В $(14; 16; 15) \succ$ Об’єкт С $(15; 19; 12)$, але

–Об’єкт С $(15; 19; 12) \succ$ Об’єкт А $(11; 20; 14)$;

В даному випадку в кожному рядку альтернатива в загальному домінує ($\succ$) над іншою, однак умова транзитивності не виконується. В такому випадку всім альтернативам присвоюється однаковий ранг [8, 9].

Метод MULTIMOORA-FG. Fuzzy MULTIMOORA for Group Decision Making (MULTIMOORA-FG) було представлено у 2011 році Брауерсом як метод групового вирішення проблем вибору з використанням апарату нечіткої логіки [11].

Опис методу наводиться з використанням нечітких трикутних чисел як найбільш розповсюдженої форми подання нечіткої інформації.

Вхідними даними для даного методу є набір визначених альтернатив і цілей, що представляються у вигляді матриці X^k розміром $m \times n$, де елементи матриці $x_{ij}^k = (x_{ij1}^k; x_{ij2}^k; x_{ij3}^k)$ – оцінка альтернативи i до цілі j призначена експертом k ; $i = 1, 2, \dots, m$, m – кількість альтернатив; $j = 1, 2, \dots, n$, n – кількість цілей; $k = 1, 2, \dots, K$, K – кількість експертів. Значення x_{ij}^k можуть представляти як оцінки для кількісних критеріїв, так і для якісних у вигляді лінгвістичного значення із обраної шкали [11].

Далі агрегуються всі думки експертів з використанням оператора зваженого нечіткого усереднення (FWA – FuzzyWeightedAverage)

$$x_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K w^k x_{ij}^k}{\sum_{k=1}^K w^k}, \quad (14)$$

де w^k – нечіткий коефіцієнт значимості оцінок експерта k . Якщо комітет, що приймає рішення гомогенний, то вагові коефіцієнти всіх експертів будуть рівними і становитимуть $w^k = \left(\frac{1}{K}; \frac{1}{K}; \frac{1}{K}\right)$. В результаті ми отримуємо матрицю зважених усереднених оцінок альтернатив X з елементами $x_{ij} = (x_{ij1}; x_{ij2}; x_{ij3})$ [11].

Нечітка система співвідношень (FuzzyRatioSystem)

Нечітка система співвідношень проводить внутрішню нормалізацію оцінок експертів і переводить їх у безрозмірний вигляд, порівнюючи кожне значення із знаменником [10, 11].

$$x_{ij}^* = (x_{ij1}^*; x_{ij2}^*; x_{ij3}^*) = \begin{cases} x_{ij1}^* = \frac{x_{ij1}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(x_{ij1})^2 + (x_{ij2})^2 + (x_{ij3})^2]}}, \\ x_{ij2}^* = \frac{x_{ij2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(x_{ij1})^2 + (x_{ij2})^2 + (x_{ij3})^2]}}, \\ x_{ij3}^* = \frac{x_{ij3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(x_{ij1})^2 + (x_{ij2})^2 + (x_{ij3})^2]}}. \end{cases} \quad \forall i, j \quad (15)$$

Далі визначаються нечіткі значення пріоритетів альтернатив y_i^* . Нормовані оцінки будуть додаватися у випадку максимізації і відніматися у випадку мінімізації:

$$y_i^* = \sum_{j=1}^{j=g} w_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^{j=n} w_j x_{ij}^*, \quad (16)$$

де $j = 1, 2, \dots, g$ – цілі, які повинні максимізуватися; $j = g + 1, g + 2, \dots, n$ – цілі, які повинні мінімізуватися; w_j – чітке значення коефіцієнту

важливості цілі (нормоване або ненормоване); y_i^* – нечітка оцінка альтернативи i з врахування всіх цілей [11].

Для визначення чіткого значення пріоритету альтернативи необхідно провести дефазифікацію нечіткого трикутного числа, використовуючи формулу (13).

$$\text{BNP}_{y_i^*} = \frac{(y_{i3}^* - y_{i1}^*) + (y_{i2}^* - y_{i1}^*)}{3} + y_{i1}^*, \quad (17)$$

Порядкове ранжування $\text{BNP}_{y_i^*}$ за спаданням i визначає кінцевий вибір [11].

Нечітка теорія точки відліку (Fuzzy Utopian Reference Point)

Нечітка теорія точки відліку заснована на базовій теорії точки відліку. Однак, за точки відліку обираються не максимальні (мінімальні) значення оцінок альтернатив, а ідеальні значення $r_j = (1; 1; 1)$ для цілей, що максимізуються та $r_j = (0; 0; 0)$ для цілей, що мінімізуються. Для визначення метрики для точки відліку найкраще підходить метрика мінімаксу Чебишева, за якою оптимальне рішення визначається як [1]:

$$y^* = \min_i y_i^*, \quad (18)$$

де y_i^* – пріоритет альтернативи – визначається як

$$y_i^* = \max_j (w_j \cdot d(r_j, x_{ij}^*)), \quad (19)$$

де x_{ij}^* – нечітке нормалізоване відношення альтернативи i до цілі j ; $i = 1, 2, \dots, m$, m – кількість альтернатив; $j = 1, 2, \dots, n$, n – кількість цілей; w_j – чіткий коефіцієнт важливості цілі (нормований або ненормований); r_j – точка відліку для цілі j ; $d(r_j, x_{ij}^*)$ – відстань (12) між трикутними числами r_j та x_{ij}^* ; y_i^* – оцінка альтернативи i з врахування всіх цілей. Порядкове ранжування y_i^* за зростанням i визначає кінцевий вибір [1, 11].

Нечітка повна мультиплікативна форма (Fuzzy Full Multiplicative Form)

Для використання мультиплікативної форми як для цілей, що мінімізуються, так і для цілей, що максимізуються, будемо користуватись формулою

$$U'_i = \frac{A_i}{B_i}, \quad (20)$$

де $A_i = (A_{i1}; A_{i2}; A_{i3}) = \prod_{j=1}^g x_{ij}$ та $B_i = (B_{i1}; B_{i2}; B_{i3}) = \prod_{j=g+1}^n x_{ij}$; де $j = 1, 2, \dots, g$ – цілі, які повинні максимізуватися; $j = g + 1, g + 2, \dots, n$ – цілі, які повинні мінімізуватися; U'_i – безрозмірна корисність альтернативи i з врахуванням всіх цілей [11].

Для визначення чіткого значення пріоритету альтернативи необхідно провести дефазифікацію нечіткого трикутного числа, використовуючи формулу (13). Порядкове ранжування $BNP_{y_i}^*$ за *спаданням* y_i і визначає кінцевий вибір [11]. Для визначення остаточного порядку альтернатив використовується теорія домінування рангів.

Методи на основі аналізу співвідношень були реалізовані в фреймворку [14]. За допомогою фреймворку було вирішено декілька задач багатоцільового вибору: вибір кандидата на посаду, вибір і оцінювання проектів реінжинірингу, вибір технологічного обладнання. Обчислення показують, що найбільш ефективним і гнучким, з точки зору вирішення багатокритеріальних задач являється метод MULTIMOORA-FG.

ЛІТЕРАТУРА

1. W. Karel, M. Brauers, E. Zavadskas, F. Peldschus, Z. Turskis – The MOORA method and its application to privatization in a transition economy // Control and Cybernetics, vol 35, No. 2, 2006.
2. W. Karel, M. Brauers, E. Zavadskas, F. Peldschus, Z. Turskis – Multi-objective decision-making for road design, – TRANSPORT 2008, p.183-193.
3. M. Brauers, W. Karel.; E. Zavadskas, E. Kazimieras. – Robustness of the multi-objective MOORA method with a test for the facilities sector – In: Technological and economic development of economy, 15:2(2009), p. 352-375.
4. M. Brauers, W. Karel.; E. Zavadskas, E. Kazimieras; Turskis, Zenonas; Vilutiene, Tatjana – Multi-objective contractor's ranking by applying the Moora method – In: Journal of business economics and management, 9:4(2009), p. 245-255.
5. D. Kalibatas, Z. Turskis. Multicriteria evaluation of inner climate by using MOORA method // Information Technology and Control, 2008, Vol.37, No.1.
6. M. Kracka, Willem K., M. Brauers, E.K.Zavadskas Ranking Heating Losse in a Building by Applying the MULTIMOORA // Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics, 2010, 21(4), p. 352-359.

7. Shankar Chakraborty Applicationsofthe MOORA method for decision making in manufacturing environment // Int J AdvManufTechnol (2011) 54:p. 1155–1166
8. Willem K.. Brauers M., Baležentis A., Baležentis T. Economic rankingof the Europe anunion countries by multimooraoptimization // 7th International Scientific Conference “Business and Management 2012”, May 10-11, 2012, Vilnius, LITHUANIA
9. Willem K.. Brauers M., Ginevicius R., Podvieszko A. Evaluation of performance of Lithuanian commercial banks by multi-objective optimization // 7th International Scientific Conference “Business andManagement 2012”, May 10-11, 2012, Vilnius, LITHUANIA
10. Stanujkic D., Magdalinovic N., Stojanovic N., Jovanovic R.. Extension of Ratio System Part of MOORA Method for Solving Decision-Making Problems with IntervalData // Informatica, 2012, Vol. 23, No. 1, 141–154.
11. Alvydas BALEŽENTIS, Tomas BALEŽENTIS, Willem K.M. BRAUERS MULTIMOORA-FG: A Multi-Objective Decision Making Method for Linguistic Reasoning withan Application to Personnel Selection // INFORMATICA, 2012, Vol. 23, No. 2, 173–190.
12. Гожий А. П., Дыхта Л. М., Краснов Н. Е. Организация выбора вариантов реинжиниринга информационных систем для предприятия теплоснабжения // Комп’ютерні технології. Наукові праці. Випуск 130 Том 143. – Миколаїв: видавн. ЧДУ ім. Петра Могили, 2010.
13. Гожий А.П. Применение метода анализа соотношений в СППР для оценки сценарных альтернатив // Системныетехнологии. Региональный межвузовский сборник научныхтрудов. – Днепропетровск, 2010.
14. Гожий А.П., Кобылинский И.А. Разработка фреймворка для решения задач многокритериального анализа и принятия решений // Праці Одеського політехнічного університету:Науковий та науково виробничий збірник. – Одесса, 2013.- Вип. 1(40) -162-169 с.

A.I. Guda , A.I. Mikhalyov

**CHAOTIC SYSTEM WITH RELAY HYSTERESIS IN
RETURN FORCE: SIMULATION AND ANALYSIS**

Abstract. This article is devoted to problem of simulation of semi-harmonic dynamic system, with non-linear return force, presented by relay hysteresis. Different modes of operation are researched. Influences of system parameters are investigated.

Keywords: dynamic chaotic system, hysteresis, simulation.

Introduction

Modern control systems often have many non-linear elements as its parts, mainly to provide properties and opportunities, unavailable for linear system. But in some condition such complex systems tends to demonstrate chaotic behaviour. In some cases chaotic dynamics is treated as bad and inadmissible. In others – may provide required features. So, the problems of simulation such systems and operation mode investigation are actual.

Aims and model

Let's consider nonlinear oscillating system with relay-alike hysteresis in return force:

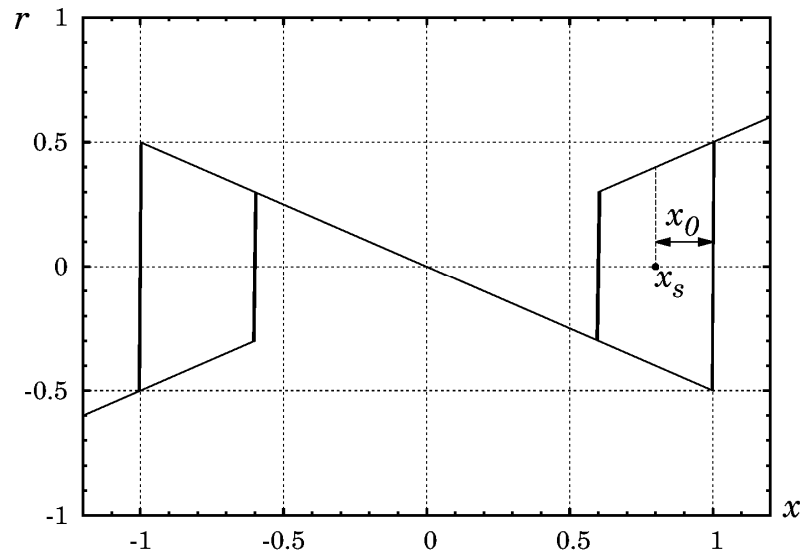
$$\ddot{x} + c\dot{x} + r(x, \dots) = u(t), \quad (1)$$

where x – coordinate, c – dumping coefficient, $r(x, \dots)$ – return force with hysteresis, $u(t) = U_{in} \sin(\omega_{in} t)$ – harmonic external force.

Return force is combined from two parts:

a) Linear: $r_l(x) = -ax, a > 0$. This part lead to instability is area near zero point.

b) Relay stabilization part. This part is zero near $x=0$, but began to limit system dynamics near $|x| \approx x_s$. Due to relay hysteresis with given width x_0 , this part activates when $x = x_s + x_0$, and deactivates when $x = x_s - x_0$. Left branch of graphical representation is symmetrical to right. Net return force represented in fig. 1.

Fig 1 – Return force $r(x,...)$

Thus, system (1) demonstrates instability near $x=0$, but its motion is limited in general. This condition provides good background for chaotic dynamics appearance. In absence of external perturbation, system under consideration may show different kinds of self-oscillation movement. In case of harmonic external force, different modes of interaction between oscillations will occur, and may lead to chaotic behaviour.

So, the main aim of this paper is to simulate the dynamic of given system (1) in different conditions, and to determine, is chaotic modes occurs. In this case, the aim is to investigate and discover values of parameters, which result to such behaviour.

Simulation

Simulation of dynamic system (1) was done by the means of developed computer simulation program “qmo2”. This program appointed to simulation of different kinds of dynamic systems. The main difference between this program and analogs is specialization on essential nonlinear systems. The view of the simulated system with example of result plot is shown in fig. 2.

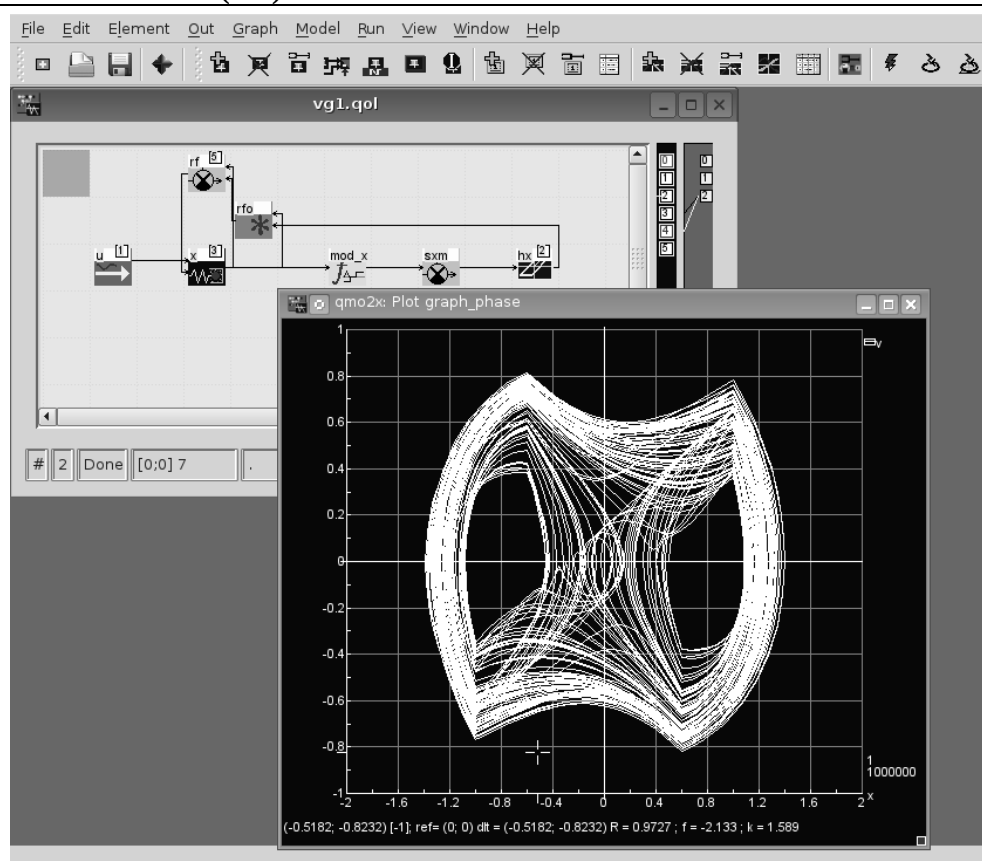


Fig.2 – Simulation of system (1) in “qmo2” program

First of all, the simulation in case of zero external force was done. Some results (phase portrait and spectrum) are show in fig. 3.

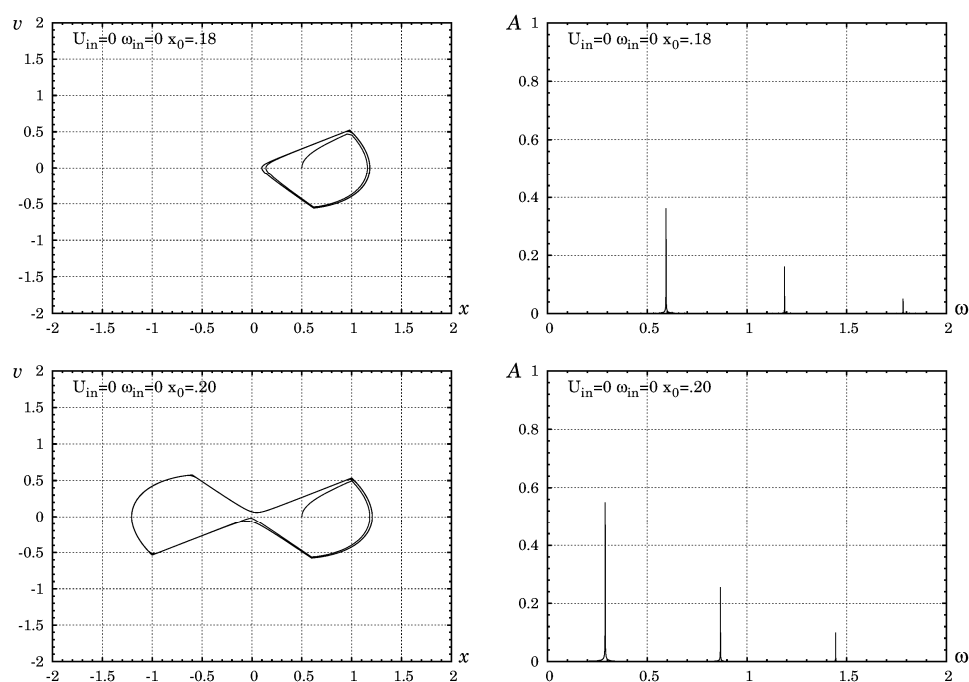


Fig. 3 – System dynamic in case of $U_{in} = 0$

These results shows, that small alteration of system parameters results to essential realignment of trajectories. Nevertheless, the dynamic is quite simple, which confirmed with pure spectrum, with peaks on 3, 5, 7 order of base frequency.

Then series of simulation was held with fixed amplitude and frequency of input signal $u(t)$. The values of ω_{in} was chosen quite far apart of system base frequency. The value of parameter x_0 – with of hysteresis was altered in area $(0, x_s)$. Most prominent results are show on fig. 4.

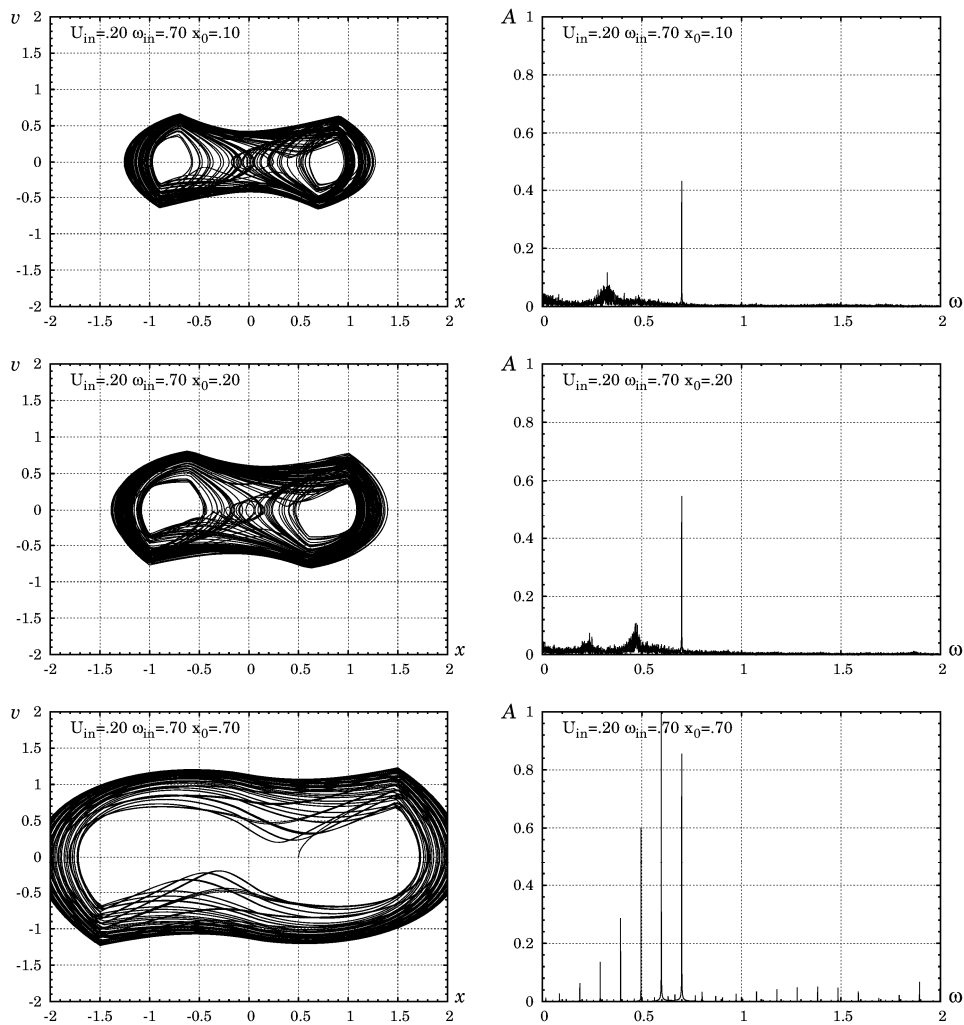


Fig. 4 – System dynamic in case of $U_{in} = 0.2$, $\omega_{in} = 0.7$

First of all, it worth to mention, that in case of even small input signal two-looped phase portrait is appears on lesser values of x_0 . Moreover, the system response in ω_{in} is increasing while x_0 raised. It may be due to fact, that value of x_0 determines the square of loop in fig. 5.

This, in order, defined the amount of energy, what system receives at one oscillation.

The complexity of phase portraits and contiguous spectrum is a good indicator of chaotic dynamic. While x_0 raises to maximum (x_s), the influence of the input signal became more negligible, and system demonstrates complex-periodic movement.

Next series of simulation was held on fixed x_0 , ω_{in} , and altering U_{in} (fig. 5).

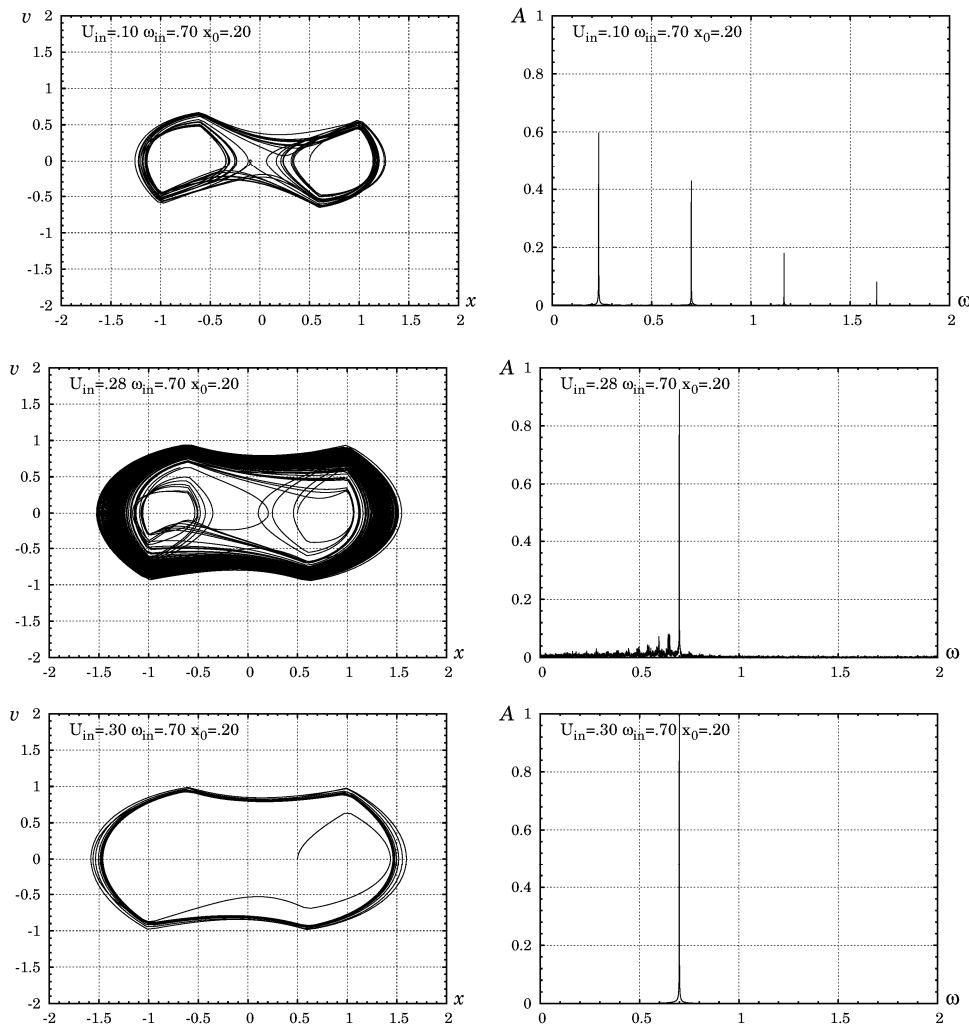


Fig 5 – System dynamic with different U_{in}

As a predicted, it exist a quite small range of U_{in} , in which system displays chaotic dynamic. At small values of U_{in} the influence of input signal is negligible. Otherwise, at large values of U_{in} , input signal fully quells this inner system dynamic.

The last series of simulation was held with fixed x_0 , U_{in} , and variation of ω_{in} was done.

It was found, that in this case multiple alternations of system mode occurs. The system behaviour changes from complex-periodic to chaotic and vice versa. In case of “frequency capture” inner and external oscillations became synchronous, which lead to pure spectrum and simple phase portrait. In different condition chaotic movement was appears.

In comparison with well-known Van-der-Pole system, system under consideration show chaotic behaviour in much wide ranges of parameters. For example, all simulation shown above results was simulated with value of damping coefficient $c=0.4$. This value is large enough to suppress complex dynamic of many systems. Such wide range of chaotic mode in system (1) is conditioned by essential non-linearity of return force.

Conclusions

Results of simulation allow us to make some conclusions:

- system (1) demonstrates both complex-periodic and chaotic dynamic;
- the most order of influence to dynamic belong to parameters x_0 and ω_{in} ;
- due to essential non-linearity of return force the ranges of parameters values, in which chaotic mode is observed, is comparatively large.

REFERENCES

1. Mikhalyov A.I., Guda A.I. The choice of criterion for adaptive-search identification of a Van der Pol dynamic system // Adaptive systems of automatic control. – 2010. – № 16(36). – P. 154–160 (in russian).
2. Mikhalyov A.I., Guda A.I., Novikova K.Yu. Synthesis of criterion of nonlinear dynamic systems identification on physical principles // Adaptive systems of automatic control. – 2007. – № 11(31). – P. 136–142 (in russian).
3. Magnitskii N.A. Sidorov S.V. New methods if chaotic dynamic M.: Edutorial URSS, 2004 – 320 p (in russian).
4. Moon F. Chaotic vibrations: An introduction for applied scientists and engineers. – M.: Mir, 1990. – 312 p (in russian).
5. A.I. Guda, A.I. Mikhalyov. Physical principles on adaptive-search identification criterion synthesis for Lorentz dynamic system // System technologies № 2(79). - Dnepropetrovsk, 2012. - p. 13–10 (in russian).
6. Simulation and investigation of chaotic dynamics of coupled relaxation oscillators / Guda A.I., Mikhalyov A.I.// Adaptive systems of automatic control. – 2011. – № 19(39). – P. 164–170 (in russian).

ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ В ПРОЦЕССАХ САМООРГАНИЗАЦИИ

Анотація. Досліджуються умови, що мають місце у процесах самоорганізації: нелінійність, нестійкість, незворотність, випадковість, детермінізм. Наведені приклади показують, які твердження Г. Хакена та І. Пригожина можливо є наслідками, а які є причинами синергетичних процесів.

Ключові слова: самоорганізація, нелінійність, нестійкість, незворотність, випадковість, детермінізм.

Возникновение синергетики и предположения создателей

Исследование разнообразных процессов окружающего нас мира, детальный анализ которых, впервые был представлен в работах Г.Хакена, И.Пригожина и других ученых[1-6], послужил началом новому направлению исследования, которое получило название синергетика – направлению, связанному с исследованием процессов самоорганизации и кооперации в живом мире. Их первоначальные исследования основывались на поведении некоторых реальных физических и химических процессов в условиях обмена с окружающей средой [1 - 6]. Основатели синергетики считали, что непременными условиями синергетических процессов являются обмен с окружающей средой, случайная природа внешних или внутренних воздействий, а также неустойчивость, нелинейность и необратимость. Эти выводы получили распространение сначала на биологические системы, а затем в естественнонаучных и гуманитарных областях науки.

Анализ и реалии синергетики

1. Действительно, синергетические процессы характеризуются нелинейностью и неустойчивостью, но на определенных этапах эволюции процесса. При этом система переходит из одного устойчивого состояния в другое, причем качественно иное. Этот переход всегда является нелинейным, причем в процессе эволюции системы всегда есть одна или несколько точек разветвления развития системы, так

называемые точки бифуркации. В этот момент система определяет путь своего движения к качественно новому устойчивому состоянию, которому соответствует понижение энтропии объекта. Таким образом, нелинейность и неустойчивость – всего лишь характеристики этого процесса. Заметим, что устойчивость – это свойство консервативное, оно присуще всем процессам и обеспечивается действующими в природе силами и законами. Наша Вселенная слишком сложна, чтобы быть неустойчивой. Консерватизм, стремление к устойчивости играет огромную положительную роль (это условие выживаемости на всех уровнях), не допуская моментального разрушения всего создаваемого и являясь своеобразным барьером для новых неустойчивых форм.

2. Рассматривая процессы самоорганизации, создатели всегда указывали на определяющую роль необратимости, считая ее необходимым условием этих процессов. Процесс, происходящий в системе под воздействием тех или иных факторов, следует считать обратимым (необратимым), если при прекращении воздействия этих факторов процесс прекращается и система возвращается (не возвращается) в свое первоначальное состояние. Можно привести ряд процессов и показать, что утверждение о главенствующей роли необратимости в процессах самоорганизации на макроуровне не подтверждается. На микроуровне многие процессы действительно необратимы. Это некоторые химические реакции и физические процессы. В качестве примера можно привести получение искусственных алмазов из графита при высоких температуре и давлении. С другой стороны некоторые процессы, которые мы относим к заболеваниям, до определенной стадии обратимы. Таким образом, синергетические процессы могут быть как обратимыми, так и необратимыми. Это связано с природой конкретного процесса, но не является условием и причиной самоорганизации.

3. Ученый мир давно спорит о роли случайности и детерминизма. Примеры из истории науки говорят о том, что многие детерминированные процессы были переведены в разряд случайных для удобства их математического описания или из-за неизвестности на данный момент тех законов и сил, которые определяют исследуемый процесс. Особенно, если речь идет о явлениях, которые происходят под воздействием большого количества факторов, детерминистское описание которых отсутствует. В конце прошлого века появляется

теория физического вакуума Г. Шипова [7], которая дает детерминистское объяснение поведения квантовых частиц. Многие, так называемые случайные процессы в природе являются условно случайными. И эта случайность - непознанная закономерность наблюдаемых явлений. Сторонники же синергетики отводят случайности главенствующую роль в эволюционном процессе. Все больше природных явлений: извержения вулканов, землетрясения, ураганы и тайфуны, в результате их изучения переходят из разряда случайных в детерминированные, обусловленные силами и законами, действующими в природе. В качестве примера можно привести погодные явления, которые еще несколько веков назад считались случайными и непредсказуемыми. Эти явления определяются рядом факторов: циклической активностью планет, составом атмосферы, а также взаимодействием отдельных потоков воздуха, процессами испарения, переноса и конденсации влаги и др. По мере развития науки и изучения указанных процессов случайность занимает в них все меньшее место, а прогноз погоды становится все более достоверным. Можно привести еще много интересных примеров процессов и явлений, которые на первый взгляд кажутся случайными, но при более глубоком рассмотрении проявляют свою детерминистскую природу.

4. Главной заслугой синергетики является открытие ею процессов самоорганизации и кооперации в природе. Безусловно, это шаг вперед в нашем познании мира. И хотя авторы синергетики вначале подметили явления самоорганизации только для отдельных физических и химических процессов, но в дальнейшем синергетика была распространена практически на все уровни иерархии Вселенной. При этом все выводы, сделанные авторами синергетики в части причин и условий синергетических процессов, автоматически были перенесены на новые области. В результате, как уже отмечалось выше, наша Вселенная стала неустойчивой, а основным фактором ее эволюции стала случайность. Вместе с тем анализ показывает, что самоорганизация – это не кооперация под воздействием случайных факторов в состоянии неустойчивости, а процессы, причины которых заложены в природе. Из всех условий протекания синергетических процессов, сформулированных авторами синергетики, самым важным является условие открытости системы, в которой протекает процесс. Открытость, возможность обмена с тем, что находится за ее пределами, является ус-

ловием жизни, развития и эволюции. Без обмена со средой ни одна система развиваться не может. В косной материи действует второй закон термодинамики, говорящий, что изолированная система стремится к полному выравниванию всех потенциалов, т.е. к разрушению, хаосу. Для обеспечения созидания необходимо поступление во Вселенную огромного количества энергии, направленной на уменьшение энтропии, для создания новых более сложных форм и структур. Открытость Вселенной и поступление в нее энергии извне приводят к изменению соотношения сил созидания и разрушения, динамический баланс которых обеспечивает изменения в системе, ее эволюцию. И при этом сложном и противоречивом процессе наблюдается общее стремление всей системы к состоянию устойчивости и равновесия. Гармония процессов сохранения, разрушения и созидания есть основа существования и эволюции Вселенной.

Технические объекты и синергетика

Безусловно, следует отдать дань уважения и приоритет, создателю синергетической школы управления, профессору Колесникову Анатолию Аркадьевичу и его ученикам [8-12]. Именно в его работах были заложены те идеи и подходы для решения практических задач построения управления сложными техническими объектами, которые в дальнейшем получили и научное и философское обоснование с позиций синергетики. Была создана синергетическая теория управления.

Любой процесс, с точки зрения динамики, можно представить двумя этапами в его развитии – переходным этапом и стационарным этапом его движения на соответствующем аттракторе. Как говорил академик Н.Н. Моисеев, «развитие любой динамической системы происходит в окрестности некоторого аттрактора». Принципы «расширения-сжатия фазового пространства» и компенсации (эквивалентности) положены в основу синергетической теории управления и метода АКАР. Именно они позволили построить синергетическую теорию системного синтеза, которая принципиально по-новому решает проблему синтеза нового класса искусственных технических систем. Однако законы, которые используются для описания поведения динамических систем на любых ее этапах развития – едины. И если это не так, то значит, мы в данный момент времени их не знаем, а используем те, которые общеприняты. Поэтому и результаты анализа управляемого поведения

того или иного объекта нас не устраивают, так как не соответствуют реалиям действительности.

Включение понятия самоорганизации в процесс решения задач управления техническими объектами, что естественно для биологических систем (и аналогичным им), без реализации принципов расширения и компенсации не понятно и невозможно. Таким образом, повышение размерности систем позволяет, вообще говоря, придать им своего рода свойство эмерджентности – ключевое свойство синергетического подхода в науке о сложных системах. Именно такой подход и позволил разработать принципиально новую теорию гарантирующего адаптивного управления, разрешившую сложную проблему синтеза гарантирующих регуляторов без текущего измерения внешних наилучших возмущений. Но в этом и есть смысл дальнейшего развития науки и человечества.

Выводы. Причинами возникновения процессов самоорганизации являются не случайность, необратимость, нелинейность и неустойчивость, они лишь следствия либо характеристики этих процессов. Самоорганизация в природе обеспечивается ее законами и силами, являясь сама, по сути, ее основным законом. Заслуга синергетика в том, что она признала нашу Вселенную открытой. Все процессы во Вселенной стремятся к равновесию и устойчивости, а гармония сил сохранения, разрушения и созидания обеспечивают жизнь и эволюцию во Вселенной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хакен Г. Синергетика /Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – с. 404.
2. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах/ Г. Хакен. – М.: Мир, 1985. – с. 387.
3. Пригожин И. От существующего к возникающему/И.Пригожин. – М.:УРСС,2002, – с. 287.
4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса/ И.Пригожин, И. Стенгерс. – М.,1986. – с. 431.
5. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах/Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – с. 512.
6. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах/В. Эбелинг. – М.: Мир, 1979. – с. 277.
7. Шипов Г.И. Теория физического вакуума/Г.И. Шипов. – М.: НТ-Центр,1993. – с. 363.
8. Колесников А.А. Синергетическая теория управления/А. А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – с. 344.

9. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза/ А. А. Колесников. – М.: КомКнига, 2006. – с. 240.
10. Колесников А.А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза/ А. А. Колесников. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007.- с. 384.
11. Синергетические методы управления сложными системами: механические и электромеханические системы/Под ред. А.А. Колесникова. – М.: КомКнига, 2006.
12. Колесников А.А. Кибернетика и синергетика: концептуальный альянс. Размышления о новой научной концепции/ А.А. Колесников. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011.

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ КУЛОНОСТАТИЧЕСКИХ КРИВЫХ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Аннотация. В рамках уточненной математической модели релаксации потенциала в кулоностатических условиях разработана методика восстановления импедансного спектра изучаемого объекта. Методика реализована на базе компьютерной системы и апробирована на реальных электрохимических процессах.

Ключевые слова: релаксация, импеданс, модель.

1. Постановка проблемы

Ранее ([1]) было показано, что для адекватного описания процесса релаксации потенциала в кулоностатических условиях необходимо производную по времени в соответствующем уравнении математической модели заменить функционалом

$$\frac{D^n E}{Dt^n} \equiv \frac{1}{\Gamma(1-n)} \int_0^t \frac{dE(\tau) / d\tau}{(t-\tau)^n} d\tau \quad (1)$$

где n – безразмерный параметр, изменяющийся в интервале от 0,5 до 1. В простейшем случае, когда в электрохимической системе возможны лишь два процесса, а именно: а) заряджение границы фаз электрод-электролит; б) протекание фарадеевского тока i_F , уравнение релаксации принимает вид:

$$K(D^n E / Dt^n) = -i_F \quad (2)$$

Применяя к (2) преобразование Лапласа, имеем:

$$Z(s) = \bar{E}(s) s^{1-n} / E_0 \quad (3)$$

$Z(s)$ – операционный импеданс системы, E_0 – начальный потенциал релаксации.

Если же в системе протекают и другие процессы, то уравнение (2) уже не может быть использовано в представленном виде. Для сложных систем соответствующее соотношение может быть записано только в том случае, когда известны все участвующие в релаксации

составляющие. С другой стороны, необходимую информацию об этих составляющих зачастую получают именно из кулоностатических измерений. Для того чтобы разрешить это противоречие, необходимо отказаться от традиционного алгоритма обработки кривых потенциал — время, основанном на регрессионном анализе для известной априори электрической схемы замещения.

2. Методика обработки кривых релаксации потенциала

В работе [2] отмечалось, что одним из путей выхода из отмеченного выше логического противоречия является получение дополнительной информации в ходе эксперимента. В кулоностатических условиях единственной величиной, которую можно варьировать в ходе опыта, является величина переданного заряда. При этом потребуются соответствующее изменение временного окна, в котором регистрируется релаксация. Уравнение (3) показывает, что трансформанта потенциала кривой спада, нормированная на E_0 , не зависит от формы зарядного импульса тока, если его длительность достаточно мала. В общем случае, для сложных систем (3) не выполняется, но в подавляющем большинстве процессов, когда релаксация протекает за счет расхода заряда, предварительно инжектированного исключительно на границу раздела фаз, операционный импеданс сложной системы будет связан с трансформантой потенциала тем же соотношением.

Обработка данной методики обработки кулоностатических данных первоначально была проведена на эквиваленте электрохимической системы, представляющим собой две последовательные RC-цепочки (рисунок 1). Параметры элементов составляли: $R_1=10,22\text{кОм}$; $C_1=0,345\text{мкФ}$; $R_2=9,96\text{кОм}$; $C_2=22,5\text{мкФ}$. Таким образом, соответствующие временные константы $\tau_1=R_1C_1=3,53\text{мс}$ и $\tau_2=R_2C_2=22,41\text{мс}$ различались в достаточной степени, чтобы спектр импеданса имел два хорошо разрешенных максимума для мнимой составляющей. Кулоностатические кривые регистрировались в диапазонах $0\text{ч}20\text{мс}$; $0\text{ч}100\text{мс}$; $0\text{ч}1\text{с}$. Учитывая, что минимальный период дискретизации составлял 10мкс , можно было ожидать адекватного воспроизведения спектра импеданса в области частот $1\text{Гц} - 10\text{кГц}$; однако, как видно из рис.1, спектр достаточно хорошо воспроизводится и при более низких частотах, примерно до $0,1\text{Гц}$. Это, очевидно, связано с простым асимптотическим поведением импеданса при $\omega \rightarrow 0$, а также с адекватным выбором аппроксимирующей функции для кривой спада потенциала в

диапазоне 0-1с. В то же время, в спектре, рассчитанном по кулоно-статическим данным, полученным во временном диапазоне 0-20мс, низкочастотный максимум $\text{Im}Z$ вообще отсутствует, а для диапазона 0-1с восстанавливается с большой погрешностью. Расчет соответствующих частотных зависимостей для действительной составляющей импеданса демонстрирует еще большее возрастание погрешности при расчете по отдельно взятым кривым; спектр же, восстановленный по совокупности трех указанных выше релаксационных кривых, отличается от расчетного не более, чем на 5%.

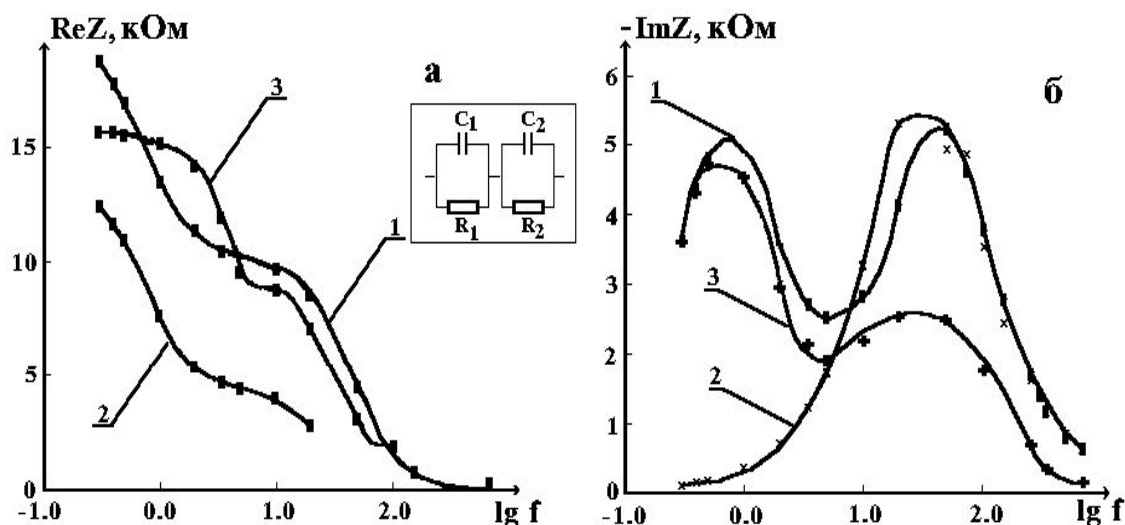


Рисунок 1 - Импеданс сложной эквивалентной схемы.

Кривая 1 - спектр, полученный импедансным методом; закрашенные прямоугольники на кривой 1 - расчет спектра по совокупности кривых релаксации, полученным во временных диапазонах 0-20мс; 0-100мс; 0-1с. Кривые 2,3 — расчет спектра по кривым релаксации, зарегистрированным во временных диапазонах 0-20мс и 0-1с соответственно

Процедура расчета заключается в следующем. Участки кривых, соответствующие линейной области, аппроксимируются согласно методу, предложенному Ван Левеном [3]. Полученные коэффициенты аппроксимации нормируются на величину E_0 и фиксируются моменты времени начала каждого участка обработки t_i . Далее рассчитываются трансформанты косинус- и синус- преобразования релаксации потенциала на участках, соответствующих временному интервалу $[t_i; t_{i+1}]$.

Для первой кривой величина t_1 принимается равной нулю, а для последней кривой с номером N величина t_{N+1} полагается равной

бесконечности. Полученные трансформанты суммируются и с помощью соотношений

$$\operatorname{Re} Z(j\omega) = \omega^{1-n} [E' \sin(\pi n/2) - E'' \cos(\pi n/2)] / K E_0 \quad (4)$$

$$\operatorname{Im} Z(j\omega) = \omega^{1-n} [E' \cos(\pi n/2) + E'' \sin(\pi n/2)] / K E_0 \quad (5)$$

пересчитываются в частотную зависимость импеданса. Мнимая единица в данном случае обозначена как j . При этом, несмотря на увеличение времени обработки, достигается существенное сокращение времени съема экспериментальных спектров по сравнению с импедансным методом, что несомненно важно при исследовании нестационарных объектов. Так, для рассмотренного выше эквивалента набор частот для импедансометрии состоял из 28 точек, а совокупное время измерения составило 5 минут, тогда как тот же спектр с погрешностью 5% был получен по 3 кривым спада, общее время регистрации которых составило около 1,5с.

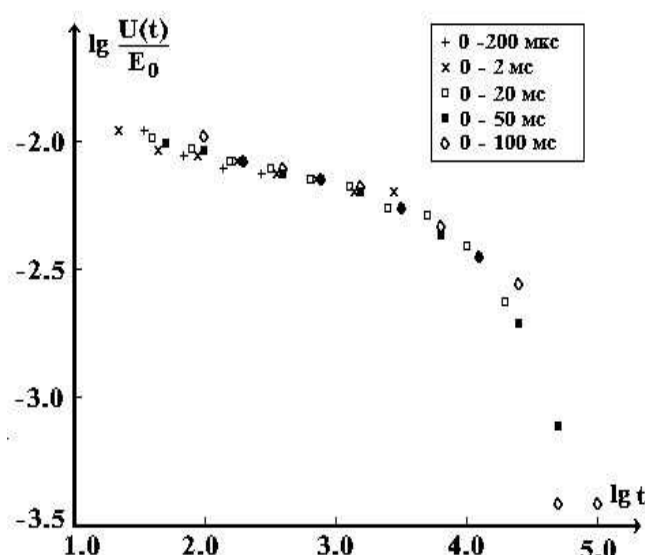


Рисунок 2 — Зависимость нормированного на E_0 потенциала от времени релаксации (мкс) по совокупности кривых спада

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. Типичный пример

такого графика приведен на рисунке 2, который был получен для стального электрода в растворе серной кислоты (ст3, 150 г/л H_2SO_4). Для построения графика из каждой релаксационной кривой была произведена выборка экспериментальных точек, промежутков времени между которыми монотонно возрастал в геометрической прогрессии. Как в указанном случае, так и для всех остальных исследованных систем непрерывность нормированного потенциала и его первой производной по времени выполнялась практически во всем временном диапазоне измерения. Скачок первой производной при $t > 10^4$ мкс связан с эффектом квантования сигнала аналого-цифровым преобразователем; аппроксимация кривой суммой пробных функций устраняет скачки такого рода.

3. Заключение

Чрезвычайно важным является вопрос о получении возможно большего количества информации об объекте в ходе релаксационных измерений, поскольку преимущества метода проявляются в значительной степени при исследованиях нестационарных объектов. Автоматизация процесса управления экспериментом сделала реальной регистрацию ряда кривых спада потенциала при незначительном увеличении суммарного времени эксперимента, что позволяет получить достаточно данных для восстановления импедансного спектра системы в интересующем диапазоне частот, а также контролировать условия, при которых допускается использование описанной выше методики расчета. Таким образом, кулоностатический метод может быть использован для изучения электрохимических систем, у которых не установлена электрическая схема замещения процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Капитонов А.Г. Определение тока коррозии по результатам релаксационных измерений //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 57-62.
3. Van Leeuwen H.P., Koojman D.J., Sluyters-Renbach M., Sluyters J.H. Complex plane analysis of single pulse data.// J. Electroanal. Chem.- 1969.- v.23, N 3.- p.475-483.

Ю.А. Прокопчук

МОДЕЛЬ РЕФЛЕКСИВНОГО АГЕНТА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Аннотация. В работе приводится математическая модель рефлексивного агента, предназначенного для управления сложными системами и технологическими процессами. Дано описание процесса формирования «модели мира» и «собственного поведения» рефлексивного агента. Рассматриваются варианты сходимости рефлексивного процесса.

Ключевые слова: принцип предельных обобщений, рефлексивный агент, собственное поведение, рефлексивные петли.

1. Введение

В последнее время для управления сложными динамическими системами и технологическими процессами все чаще применяются мультиагентные системы [1 - 6]. Лефевр [3] отмечает, что наиболее развитым способом управления является формирование «рефлексивного строения управляемого персонажа» или «оператора осознания». В контуре управления могут использоваться рефлексивные агенты, рефлексивные группы агентов (групповые субъекты), активно-рефлексивные среды [2, 3].

В повторяющемся процессе рекурсивно организованных сенсомоторных актов различения, взаимных возмущений и реакций на возмущения возникают инварианты во взаимоотношениях рефлексизирующих систем (агентов, групп, сред) с внешней средой. Основатель кибернетики второго порядка (кибернетики наблюдателя) Гейнц фон Фёрстер (von Foerster) назвал подобные инварианты «собственное поведение» (eigenbehavior) [4]. Фактически, собственное поведение - это неподвижная точка оператора (например, «оператора осознания»), остающаяся неизменной при его действии (в ходе бесконечного числа рекурсий, выстраиваются «собственные значения» – средства связи элементов системы).

В работах [5-7] развиваются подходы к построению моделей когнитивных агентов на основе парадигмы предельных обобщений. Настоящая работа является развитием данных исследований.

Целью данной работы является построение на основе парадигмы предельных обобщений формальной математической модели процесса формирования «собственного поведения» рефлексивного агента, изучение на модели типов сходимости рефлексивного процесса, в частности, рассмотрение процессуального механизма дестабилизации агента в процессе рефлексии.

Постановка задач исследования. Основными задачами исследования являются: построение математической модели процесса формирования «собственного поведения» рефлексивного агента; исследование вариантов сходимости рефлексивного процесса.

2. «Модели мира» и «собственного поведения» агента

Пусть $\{\tau\}$ - множество элементарных тестов, с помощью которых описываются все факторы, обстоятельства и явления, имеющие отношение к изучаемой действительности. Конкретный результат теста τ будем обозначать через $\underline{\tau}$. Результаты тестов могут выбираться (формироваться) из разных доменов (множеств значений со связями), которые образуют орграф 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 [5].

Пусть деятельность агента связана с решением множества Z -задач, где $Z = \{1, \dots, N_Z\}$ – множество кодов заключений, связанных с диагностикой состояния оборудования или процесса, выбором варианта прогноза или управления [5 - 7]. В процессе обучения агента для каждой Z -задачи формируется база прецедентов с известными исходами $\Omega(Z) = \{\alpha(\{\underline{\tau} / T_0\}, \underline{z} / Z)\}$, где T_0 – базовые домены. Без ограничения общности положим, что каждый тест входит в описание прецедента один раз. Кортеж $K = \langle \Omega(Z), \{G(\tau)\} \rangle$ образует контекст Z -задачи.

Идеальной закономерностью V в рамках контекста K называется совокупность значений тестов, позволяющая однозначно установить заключение:

$$V = (\{a / A\} \rightarrow z / Z), \exists \alpha(\{\tau / T\}_\alpha, z / Z) \in \Omega(Z): \{a / A\} \subseteq \{\tau / T\}_\alpha. \quad (1)$$

Синдромом S называется избыточная закономерность, а *предельным синдромом* S^* называется синдром, который нельзя обобщить ни по одному входящему тесту.

Будем говорить, что закономерность $V'(\{a / A\}', z / Z)$ *доминирует* закономерность $V(\{a / A\}, z / Z)$, если $\{a\}' \subseteq \{a\}$, $\forall a \in \{a\}': A \leq A'$ и выполняется хотя бы одно из условий: а) $|\{a\}'| < |\{a\}|$; б) $\exists a \in \{a\}': A < A'$.

Множество всех закономерностей в рамках контекста K обозначим через $\{V\}_{Full}$, множество всех синдромов обозначим через $\{S\}_{Full}$, а множество всех предельных синдромов обозначим $\{S^*\}_{Full}$. Ясно, что $\{S^*\}_{Full} \subseteq \{S\}_{Full} \subseteq \{V\}_{Full}$.

Совокупность закономерностей $\{V\}$ образует *модель знаний*, если она позволяет определить заключение, как минимум, для любой ситуации действительности из $\Omega(\{\tau / T_0\}, Z)$ [6].

Будем говорить, что модель знаний $\{V'\}$ *доминирует модель знаний* $\{V\}$, если она применима к большему числу набросков прецедентов из $\Omega(Z)$, включая и те наброски, к которым применима $\{V\}$. Факт доминирования будем отражать нотацией $\{V'\} > \{V\}$. Будем говорить, что модели знаний $\{V'\}$ и $\{V\}$ эквивалентны в плане доминирования, если они применимы к одному и тому же множеству набросков прецедентов. Факт эквивалентности в плане доминирования будем отражать нотацией $\{V'\} \sim \{V\}$. Если для модели знаний $\{V\}$ не существует доминирующая модель, то будем говорить, что она недоминируема. Если между двумя моделями знаний $\{V'\}$ и $\{V\}$ не выполняется отношение доминирования и они не эквивалентны в плане доминирования, то будем говорить, что такие модели знаний несравнимы между собой в плане доминирования. Данный факт будем отражать нотацией $\{V'\} > < \{V\}$.

Большой практический интерес представляет поиск всех минимальных (неизбыточных) по составу моделей знаний, которые принадлежат $\{S^*\}_{Full}$ и эквивалентны по доминированию $\{S^*\}_{Full}$. Такие модели знаний обозначим $\{S^*\}_{Full-Min}$ [5, 6].

Элементарной операцией обобщения Φ^1 назовем переход $V \rightarrow V'$, в котором обобщается значение лишь одного из тестов закономерности V по схеме $A \rightarrow A'$ (родитель - потомок). Элементарной операцией редукции Φ^2 назовем переход $V \rightarrow V'$, при котором исключается один из тестов закономерности V . Суть операции Φ^3 состоит в исключении какой-либо закономерности V из модели знаний $\{V\}$ при условии, что $\{V\}' = \{V\} \setminus V$ эквивалентна в плане доминирования $\{V\}$. Операции $\{\Phi^1\}$ и $\{\Phi^2\}$ принципиально отличаются от $\{\Phi^3\}$, так как они порождают новые закономерности, что может привести к повышению уровня доминирования.

Пусть фиксирован контекст K . На множестве операций $\{\Phi^v\} = \{\Phi^1\} \cup \{\Phi^2\}$ определим когнитивный аналог оператора Хатчинсона: $W(\{V\}) = \{W(V) \mid V \in \{V\}\}$. Важно то, что $W(\{V\}) \geq \{V\}$, т.е. уровень доминирования не уменьшается, несмотря на диссипацию информации.

Если W^{on} - композиция порядка n оператора W , то последовательность множеств, полученную в результате итерирования $\{V\}$, т.е. $\{\{V\}, W(\{V\}), W^2(\{V\}), \dots, W^{on}(\{V\}), \dots\}$, назовем *смысловой орбитой* $\{V\}$ [6].

Можно показать, что для $\{V\}_0 = \{\{\tau / T_0\}_\alpha \rightarrow z_\alpha \mid \alpha \in \Omega\}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} W^{on}(\{V\}_0) = \{S^*\}_{Full}, \quad (2)$$

Пусть $\{V\}$ произвольная модель знаний, тогда сопряженное множество всех минимальных по составу моделей знаний, которые принадлежат $\{V\}$ и эквивалентны по доминированию $\{V\}$, обозначим $\{V\} \downarrow \{\{V\}_{Min}\}$, где « $\downarrow$ » – полная *операция локализации* (неполная операция локализации позволяет найти только часть сопряженных моделей). Каждая модель $\{V\}_{Min}$ является аттрактором следующего динамического процесса локализации (при фиксированном K):

$$\{V\}_{n+1} = \Phi_{\sigma_n}(\{V\}_n, \Omega(Z), \{G(\tau)\}), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$\{V\}_0 = \{V\}, \quad \Phi_{\sigma_n} \in \{\Phi^3\}_n, \quad |\{\Phi^3\}_n| = |\{V\}_n|,$$

где Φ_{σ_n} выбирается из $\{\Phi^3\}_n$ с вероятностью p_{σ_n} (сумма всех вероятностей равна единице). Если выбранную закономерность нельзя удалить, то случайным образом выбирается другая закономерность из оставшихся и т.д. Процесс (3) останавливается только тогда, когда нельзя удалить ни одну закономерность из $\{V\}_n$ с сохранением уровня доминирования. Если аттрактор процесса обозначить $\{V\}_\infty$, то ясно, что $\{V\}_\infty \sim \{V\}_0$.

Если подставить $\{V\}_0 = \{S^*\}_{Full}$ в уравнение (3), то аттрактором динамического процесса (3) будет избыточная предельная модель знаний $\{S^*\}_{Full-Min}$. Совокупность аттракторов всех процессов (3) совпадает с полным набором всех избыточных предельных моделей знаний $\{\{S^*\}_{Full-Min}\}$ [6].

3. Рефлексивные петли. Анализ динамики моделей поведения

В предыдущем разделе были установлены теоретически достижимые пределы когнитивной эволюции. Рассмотрим особенности реальных рефлексивных процессов.

Опишем рефлексивную петлю в рамках произвольной Z -задачи. Пусть в интервал времени $n=0$ фиксирован контекст K . *Локальной моделью мира* (Local World Model - LWM) агента в рамках Z -задачи в n -ый интервал времени назовем кортеж:

$$\begin{aligned} LWM_Z(n) = \langle K, & \quad W^{on}(\{V\}_0), & \quad W^{on}(\{V\}_0) \downarrow \{\{V\}_{Min}\}, \\ EB_Z(n) = \{V\}_{Min} \rangle, & & \end{aligned} \quad (4)$$

где $EB_Z(n)$ – текущая активная модель собственного поведения (EigenBehavior), которая ситуативно выбирается из полного набора $\{\{V\}_{Min}\}$. Для множества $W^{on}(\{V\}_0)$ введем обозначение $XB_Z(n)$ (eXtended Behavior).

Рефлексивная петля I-го типа (РП1) при фиксированном контексте K состоит из двух последовательных фаз:

1. Фаза расширения: $XB_Z(n+1) = W(XB_Z(n))$.

2. Фаза локализации: а) $XB_Z(n+1) \downarrow \{\{V\}_{Min}\}$; б) $EB_Z(n+1) = \{V\}_{Min}$.

Рассмотрим основные свойства динамического процесса на основе РП1. Прежде всего, рекурсивно происходит расширение фазового пространства когнитивной системы (пространства идеальных закономерностей). Процесс локализации при благоприятных условиях (достаточности энергии) имеет естественный предел в виде: $XB_Z(\infty) = \{S^*\}_{Full-Min}$; $EB_Z(\infty) = \{S^*\}_{Full-Min}$. Это предельный опыт, который можно достичь при фиксированном контексте K .

В результате жизнедеятельности агента на вход поступет поток различных Z -задач (распознавания, управления и т.д.). РП1 запускается всякий раз, когда агент не может разрешить Z -задачу с помощью $EB_Z(n)$ (или $XB_Z(n)$) для новой ситуации $\alpha(\{\tau / T\}_\alpha, z / Z?)$. Отметим, что $\{\tau / T\}_\alpha$ может не содержать значений всех тестов и быть высокого уровня обобщения (нечеткости). Завершение текущей РП1 в отведенное время не гарантирует решение задачи. В этом случае нерешенная задача переходит в банк задач $BT = \cup_Z \{\alpha(\{\tau / T\}_\alpha, z / Z?)\}$ с меткой «нерешенная». Банк BT является частью глобальной модели мира агента. Если РП1 не завершена в отведенное время, то задача также помещается в BT , а РП1 продолжает выполняться в фоновом режиме (с незначительной энергией и неопределенным временем окончания).

Если завершена любая РП1, то в фоновом режиме пересматриваются все задачи из BT . Это *рефлексивная петля II-го типа* (РП2). Если в фоновом режиме для какой-либо задачи из BT находится решение, то возникает *инсайт* (озарение) – данная задача получает фокус внимания. Если достигнут предел $XB_Z(\infty)$, но текущая задача или какая-либо Z -задача из BT не решена, то запускается корректировка контекста K_Z . Корректировка K_Z запускается всегда, когда появляется фальсифицирующая α . Это *рефлексивная петля III-го типа* (РП3). В итоге могут иметь место двойные и тройные (внутренние) рефлексивные петли.

Фаза расширения в РП1 отражает процессуальный механизм *дестабилизации субъекта* в процессе рефлексии. Процесс дестабилизации позволяет провести аналогию между рекурсивными процессами

рефлексии и процедурами теории возмущений. На основе аналогии можно выделить рефлексивные процессы трех типов:

а) *норма*: имеющейся энергии (ресурсов) достаточно и рефлексивный процесс регулярно сходится к «собственному поведению»;

б) *хаос*: имеющейся энергии (ресурсов) недостаточно для фазы локализации, процесс не сходится к «собственному поведению»; рефлексивные петли не стягиваются;

в) *смешанная альтернатива*: так называемый асимптотический ряд теории возмущений. Его поведение необычно — на нескольких первых шагах (иногда довольно многочисленных) наблюдается процесс, сходящийся к определенному результату (рефлексивные петли стягиваются), но последующие итерации приводят не к уточнению, а к ухудшению результата, ряд расходится.

Основной причиной хаоса и асимптотического ряда является нехватка структурной энергии. Важным защитным механизмом от подобных явлений служит *блокировка рефлексии*. Возможность блокировки означает наличие *порога индивидуальной рефлексии*, что позволяет говорить о существовании *оптимума рефлексивности* [3] для каждого агента (субъекта).

4. Выводы

Представленная модель позволяет не только создавать когнитивные мультиагентные технологии управления сложными технологическими процессами, но также объяснить многие феномены обучения, накопления опыта, функциональной неустойчивости оператора технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадамшин, Р.А. Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний /Р. А. Бадамшин, Б. Г. Ильясов, Л. Р. Черняховская. М. : Машиностроение, 2003. - 240 с.
2. Скобелев П.О. Открытые мультиагентные системы для оперативной обработки информации в процессах принятия решений // Автометрия. – 2002. - №6. - С. 45-61.
3. Лефевр В.А. Лекции по теории рефлексивных игр.— М.: «Когито-Центр», 2009.— 218 с.
4. Von Foerster H. Principles of self-organization in socio managerial context // Self-organization and management of social system / Ulrich H., ed. - Springer Series in Synergetics: Springer-Verlag. - Vol.26. - 1984.

5. Прокопчук Ю. А. Принцип предельных обобщений: методология, задачи, приложения. Монография. – Дн-вск: ИТМ НАНУ и НКАУ, 2012.-384 с.
6. Прокопчук Ю.А. Модели спонтанной когнитивной динамики // Материалы III Международной научной конференции «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем – OSTIS-2013» (Минск, 21-23 февраля 2013 г.). – Минск: БГУИР, 2013. – С. 251 – 256.
7. Прокопчук Ю.А., Белецкий А.С. Технологический аудит и субоптимизация на основе принципа предельных обобщений // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 82 – 87.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ ГОРНЫМИ МАШИНАМИ

Аннотация. Приведены функционально-структурные схемы и принципы функционирования систем. Показаны схемно-технические и конструктивные решения, заложенные в преобразователе, которые позволили встроить его в корпус угольного комбайна. Системы управления двух-скоростными лавными скребковыми конвейерами реализуют модульный принцип построения. В статье описан блок регистрации произошедших событий, фиксирующий основные параметры режимов работы машины, хронологию событий, их хранение с временем накопления данных - 5 лет и т.п.

Ключевые слова: горные машины, системы управления, частотные преобразователи, блок регистрации событий.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

В Украине разработано и освоено в производстве горно-шахтное оборудование нового поколения для высокопроизводительных угольных шахт, отвечающее современным требованиям [1, 2, 3]: очистные комбайны УКД400, КДК400, КДК500 и КДК700, скребковые конвейеры типового ряда КСД, насосные станции СНД100, СНД200/32 и СНД300/40, проходческие комбайны КПД, КПУ, КПЛ, КПА, КПр, поддирочно-погрузочную машину МПр, бункер-конвейер БК250 и др.

Постановка задачи. Высокий уровень технических параметров, значительное расширение функциональных возможностей машин нового поколения, требования к повышению безопасности их эксплуатации потребовали создания новых систем управления этими машинами. Такие системы созданы и освоены в производстве. Рассмотрим функционально-структурные схемы и принципы функционирования некоторых из них.

Один из первых очистных комбайнов нового технического уровня – комбайн УКД300, а затем и УКД400, в состав которого входит

преобразователь ПЧЭШ-60, включающий информационную компоненту, и комплекс средств управления КУОК.

Комплекс КУОК состоит из аппаратов, устройств и других элементов, расположенных непосредственно на комбайне и на штреке. Комбайновая часть состоит из силового отсека, отсека управления, пультов управления, датчиков; штрековая – из пульта управления комбайном, блока отображения и источника питания. КУОК предусматривает два режима управления: «проводного» и телемеханического. «Проводное» управление по кабелю обеспечивает все защиты и блокировки, необходимые для работы на невыбросоопасных пластах. Телемеханическое управление, помимо возможности управления комбайном со штрека, что обеспечивает работу на выбросоопасных пластах, предоставляет большой объем диагностической информации о состоянии комбайна.

Преобразователь ПЧЭШ-60 предназначен для управления двигателями резания и подачи с выполнением всех необходимых защит и блокировок, а также для регулирования по заданному алгоритму частоты вращения встроенных двигателей подачи. ПЧЭШ-60 выполнен на базе частотного преобразователя с водяным охлаждением типа ПЧЭ-120М. Достоинством преобразователя ПЧЭ-120М является то, что для его питания впервые применено напряжение 1140В без понижающего трансформатора, при этом диапазон изменения выходной частоты – от 2,5 до 150 Гц. Схемно-технические и конструктивные решения, заложенные в преобразователе, позволили значительно уменьшить габариты отечественных очистных комбайнов в сравнении с иностранными аналогами.

Преобразователь того же типа и его информационная компонента конструктивно интегрированы в корпус комбайна КДК500 и используются в приводе подачи. Составной частью системы управления очистными комбайнами КДК400, КДК500, КДК700 является аппаратура КС500Ч-02, которая обеспечивает необходимые защиты и блокировки, индикацию основных параметров и причин его отключения. КС500Ч-02 включает в себя штрековую часть, состоящую из пульта управления и источника питания, а также комбайновую часть, состоящую из пультов (центрального, левого, правого и радиоуправления), блока управления, датчиков. Питание комбайновой части систе-

мы управления осуществляется напряжением 220В от специально разработанного источника ИПШ.2.

При работе на выбросоопасных пластах штрековая часть комплекса КС500Ч-02 позволяет осуществлять управление комбайном со штрека с акустическим контролем его работы, контролем местоположения и индикацией всех параметров комбайна (нагрузки двигателей, состояния датчиков и др.). При этом комбайн связан со штреком телемеханическим каналом для передачи данных по кабелю КГШР5х2х2,5. При работе на невыбросоопасных пластах штрековая часть комплекса КС500Ч-02 используется для отображения диагностической информации и позволяет осуществлять связь машиниста комбайна со штреком.

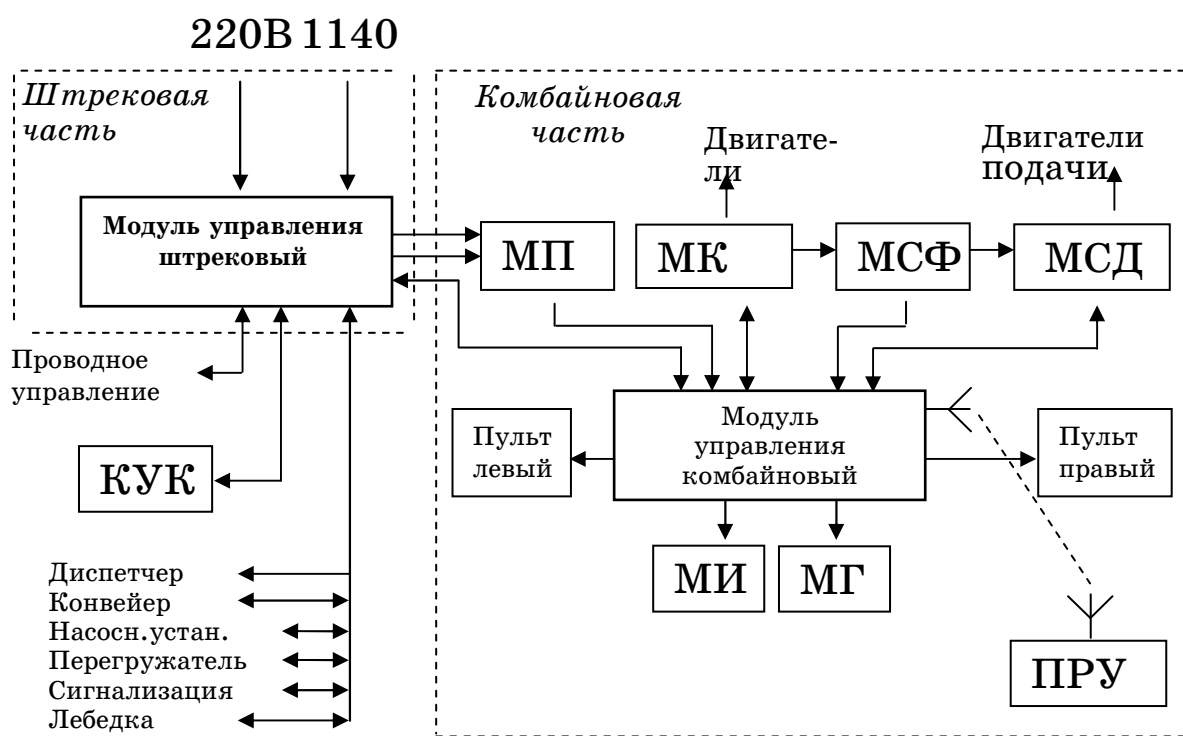


Рисунок 1 - Структурная схема комплекса системы управления комбайном КДК500: МП – модуль питания; МК – модуль коммутационный; МФС – модуль сетевого фильтра; МСД – модуль силовой; КУК – комплекс управления крепями; МИ – модуль индикации; МГ – модуль гидроуправления; ПРУ – пульт радиоуправления

Для управления и защиты приводов двухскоростных лавных конвейеров созданы станции управления: КСД27.50 и УКВ.650, обеспечивающие рациональный пуск конвейера с целью уменьшения динамических нагрузок в элементах конвейера при его запуске [4, 5].

Структурная схема системы управления, выполненной на базе станции КСД27.50, приведена на рисунке 2. Во взрывозащищённом корпусе станции расположены: шесть силовых контакторов, два из которых (КМ1, КМ2) обеспечивают рабочий и реверсивный режимы электродвигателей в дистанционном режиме, остальные (КМ3-КМ6) – подачу питающего напряжения на обмотки высокой и низкой скоростей электродвигателей головного и хвостового приводов М1 и М2; промежуточные реле; блоки форсировки; блоки защиты. Для управления и защиты приводов двухскоростных лавных конвейеров созданы станции управления: КСД27.50 и УКВ.650, обеспечивающие рациональный пуск конвейера с целью уменьшения динамических нагрузок в элементах конвейера при его запуске [4, 5].

Структурная схема системы управления, выполненной на базе станции КСД27.50, приведена на рисунке 2. Во взрывозащищённом корпусе станции расположены: шесть силовых контакторов, два из которых (КМ1, КМ2) обеспечивают рабочий и реверсивный режимы электродвигателей в дистанционном режиме, остальные (КМ3-КМ6) – подачу питающего напряжения на обмотки высокой и низкой скоростей электродвигателей головного и хвостового приводов М1 и М2; промежуточные реле; блоки форсировки; блоки комплексной защиты для обеспечения контроля максимальной токовой защиты и контроля сопротивления изоляции отводящих силовых цепей; трансформаторы тока и напряжения; блок управления аппаратуры УКСД.

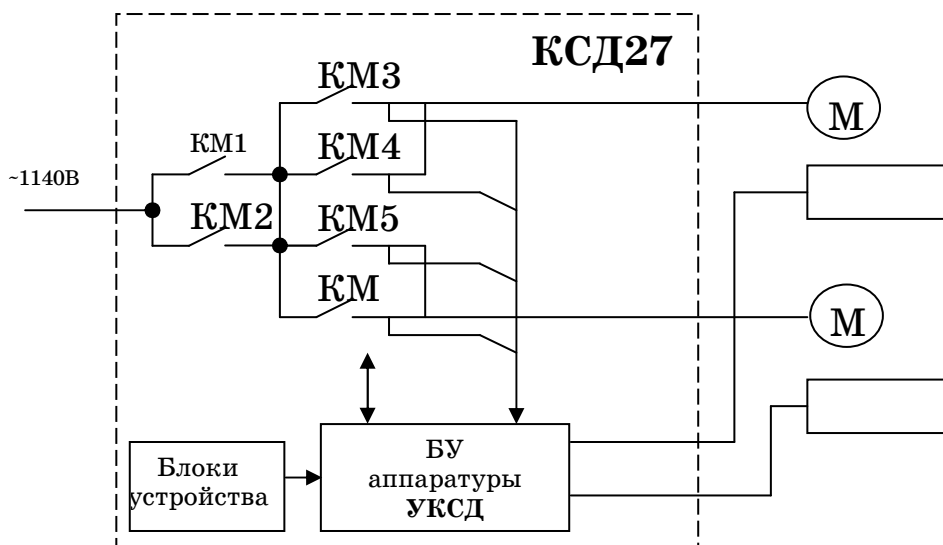


Рисунок 2 - Структурная схема системы управления двухскоростным скребковым конвейером, выполненной на базе станции управления КСД27.50

Аппаратура УКСД является центральным модулем системы управления и состоит из блока управления БУ, двух блоков индикации БИ, датчика контроля скорости и двух датчиков температуры. Блок управления осуществляет: управление конвейером в соответствии с заданным режимом (выбор скорости, выбор работающего привода, «работа-реверс» и пр.); запуск конвейера, с учетом текущей загрузки конвейера и динамики его разгона; контроль потребляемого тока электродвигателями головного и хвостового приводов, их теплового состояния (предупредительного и аварийного нагрева), контроль частоты вращения головного привода, предельной температуры масла в редукторах, срабатывания блоков устройства и т.д.; защиту и блокировку работы конвейера при достижении контролируемых параметров предельных (аварийных) значений; отображение информации о текущем состоянии и причинах аварийного отключения конвейера.

В станции УКВ-650 реализованы: модульный принцип построения в части управления приводом конвейера, текстовое представление информации о состоянии защит и блокировок конвейера с возможностью передачи ее диспетчеру, а также введены дополнительные узлы для работы конвейера в автоматизированном режиме по управляющим сигналам телемеханики. Структурная схема системы управления, выполненной на базе станции УКВ-650, представлена на рисунке 3.

По техническим характеристикам станция УКВ-650, предназначенная для конвейеров с количеством приводов от одного до четырех, имеет преимущества по сравнению со станцией КСД27.50, предназначенной для двухприводных скребковых конвейеров, как в количестве выполняемых функций, так и по габаритным размерам (в 1,5 раза) и массе (в 4 раза). Обе станции имеют напряжение питания 1140/660 В.

На рисунке 4 представлен алгоритм запуска двухскоростного скребкового конвейера.

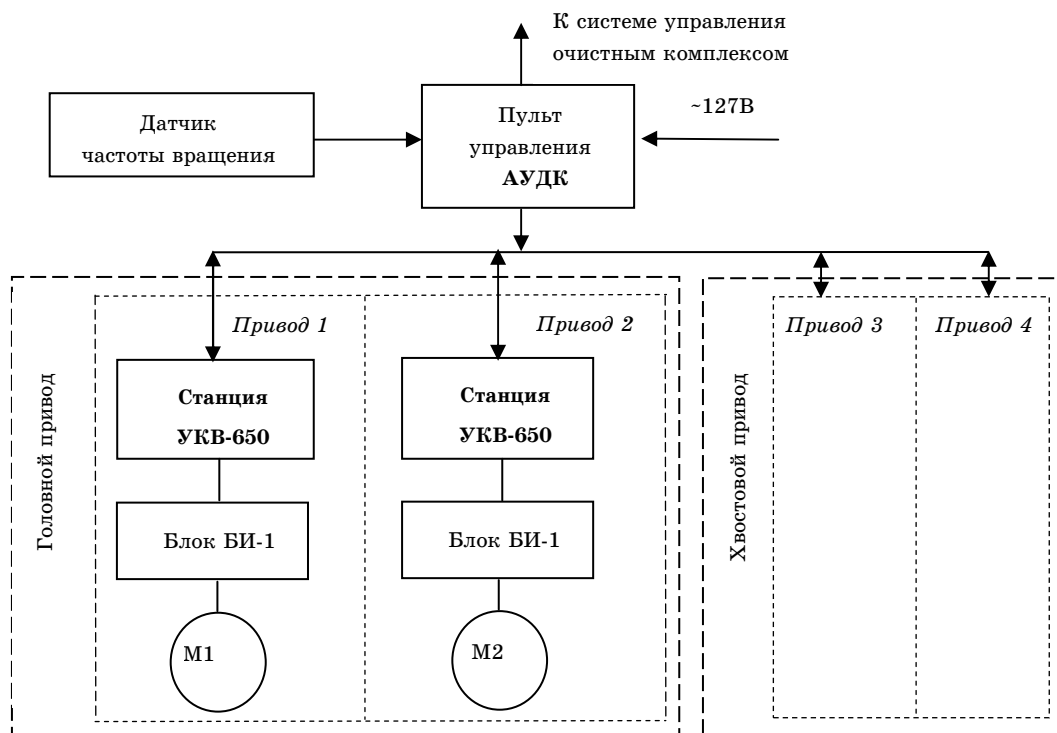


Рисунок 3 - Структурная схема системы управления двухскоростным скребковым конвейером, выполненной на базе станции управления УКВ-650

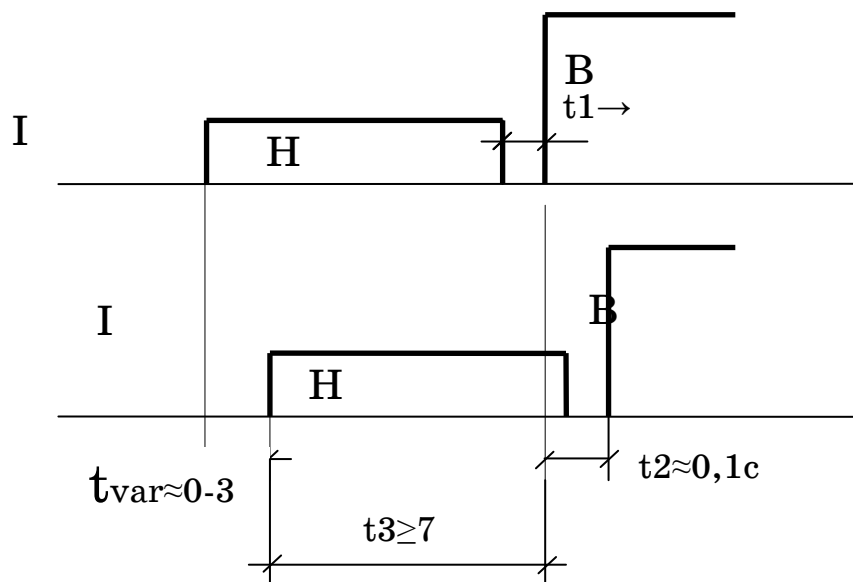


Рисунок 4 - Алгоритм запуска двухскоростного скребкового конвейера: I – переключение скоростей хвостового привода конвейера; II – переключение скоростей головного привода конвейера; Н – работа электропривода на низкой скорости; В – работа электропривода на высокой скорости

Для снижения зольности горной массы, увеличения коэффициента машинного времени очистной техники, а также работы добычного участка в энергосберегающем режиме разработан бункер-конвейер типа БК250, управление которым осуществляет аппаратура, состоящая из устройства управления, клеммных коробок, концевых датчиков, поста управления, датчиков скорости и заштыбовки. Структурная схема системы управления бункер-конвейера приведена на рисунке 5.

Устройство управления по сигналу, поступившему от поста управления, осуществляет работу бункер-конвейера в режиме погрузки или разгрузки. Движение тягового органа осуществляется посредством управления четырьмя гидрораспределителями, подающими рабочую жидкость в гидроцилиндры, которые приводят в движение храповый механизм, вал которого приводит во вращательное движение звезду привода. Управление гидрораспределителями производится по срабатыванию датчиков конечного положения штоков цилиндров. Полная загрузка конвейера контролируется датчиком, срабатывание которого приводит к отключению не только самого бункер-конвейера, но и оборудования очистного забоя. В режиме «разгрузка» контролируется движение конвейера участковой линии. Весь объем собранной информации представляется на текстовом мониторе устройства управления и транслируется по каналу телемеханики на поверхность шахты.

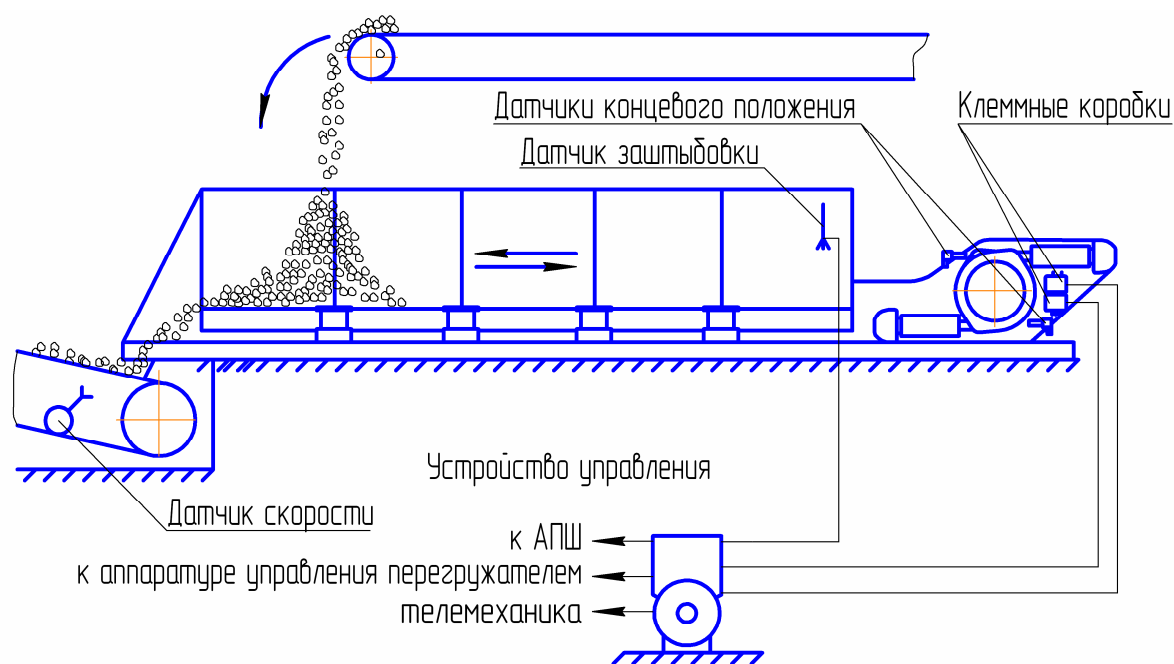


Рисунок 5 - Структурная схема системы управления бункер-конвейера

Для повышения производительности очистных забоев созданы новые станции СНД200/32 и СНД300/40, которые отличаются тем, что:

- система управления позволяет осуществлять как независимую работу насосных агрегатов (каждый агрегат работает на своего потребителя), так и параллельную работу на общего потребителя (при обслуживании высокопроизводительных механизированных комплексов или в составе центральных насосных станций);

- привод высоконапорного, подпиточного и смазочного насосов осуществляется от общего электродвигателя.

Для станций СНД200/32-05 и СНД300/40-05 создана и серийно выпускается аппаратура управления, контроля и диагностики АУСН, которая обеспечивает: выбор режимов управления и работы станции, защиту от перегрева электродвигателей и масла в картерах агрегатов, блокировку станции – при снижении давления подпитки и давления масла в маслосистеме, при повышении давления на сливе, а также при снижении уровня эмульсии и обрыве линии дистанционного управления; информация о работе станции и состоянии контролируемых параметров отображается на текстовом мониторе и передается по каналу телемеханики диспетчеру.

Для повышения безопасности, комфортности и производительности труда шахтеров в забое создана аппаратура освещения АО-4, устанавливаемая на механизированных крепях. При ее разработке основное внимание было уделено малогабаритности составных частей, увеличению длины освещаемой лавы и соответствию уровней освещенности действующим нормативам. В качестве питающего напряжения использовано 220 В, что, помимо значительного увеличения длины освещаемой лавы (550 м), дало уменьшение сечения питающего кабеля.

Для повышения освещенности рабочей области были проведены исследования по определению оптимальной формы отражателя и местоположения лампы в корпусе светильника (уровни освещенности очистного забоя приведены на рисунке 6).

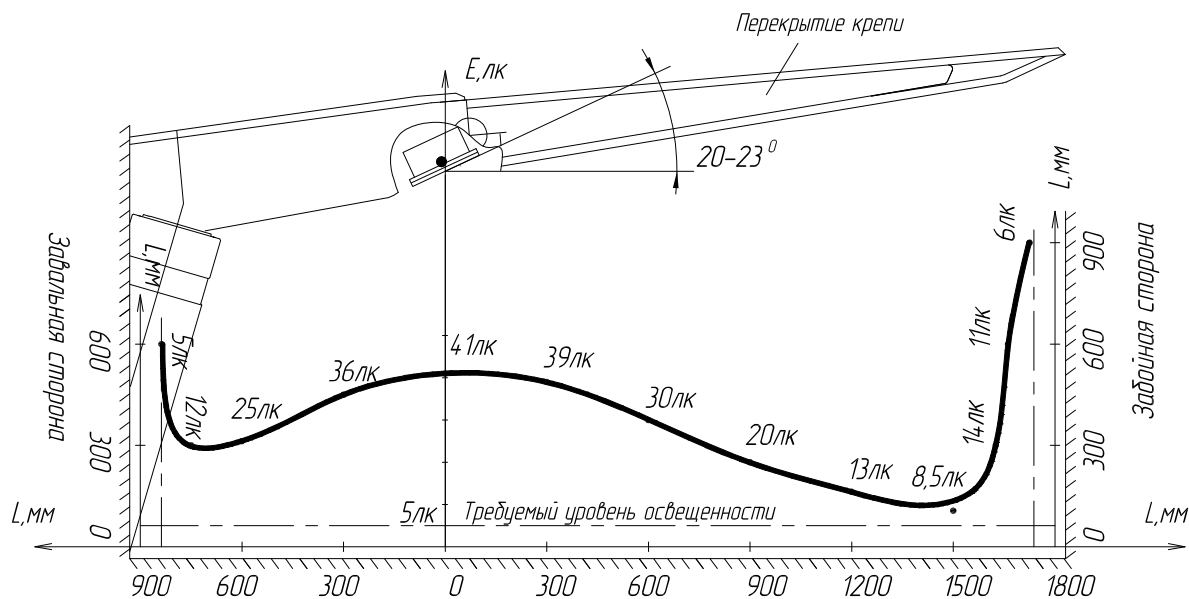


Рисунок 6 - Уровни освещенности очистного забоя

Для проходческих комбайнов нового поколения КПД, КПУ, КПЛ, КПА, поддиро-погрузочной машины МПР были разработаны аппаратура диагностики УДПМ и аппаратура управления УПК, размещенные в станции управления горной машиной.

Новая станция управления проходческими комбайнами представляет информацию о состоянии защит и блокировок комбайна и оснащена аппаратурой УДПМ, осуществляющей управление, контроль и защиту электроприводов комбайна. Аппаратура УДПМ включает в себя блок управления и ряд датчиков. Блок управления встраивается в станцию управления комбайна и имеет связь с аппаратурой управления УПК, разработанной на микропроцессорной технике, что позволяет адаптировать аппаратуру под циклограммы работ гидросистем различных проходческих машин. Аппаратура УПК обеспечивает местное и дистанционное управление, включая радиоуправление, в ней предусмотрен режим работы с двумя дистанционными пультами управления – комбайном и конвейером. Информация о работе комбайна отображается на информационном табло. На рисунке 10 представлена структурная схема системы управления проходческим комбайном.

Для организации ремонтно-профилактических и ремонтно-восстановительных работ на современном техническом уровне с учетом фактического и прогнозного (остаточного) ресурса горной машины разработан блок регистрации произошедших событий

БРП, фиксирующий основные параметры режимов работы машины, хронологию событий, их хранение и т.п.

Блок регистрации получает информацию о состоянии горной машины по интерфейсу связи RS-485 от аппаратуры УДПМ и в реальном масштабе времени записывает ее на главный съемный модуль памяти, с указанием текущего времени и даты. Блок регистрирует состояние электродвигателей комбайна и срабатывание их температурных защит, уровня и температуры рабочей жидкости в гидросистеме, предельного давления воды в системе орошения, срабатываний блоков максимальной токовой защиты и др. Общее количество регистрируемых событий – до 128ед., дискретность фиксации событий – до 60 с, время накопления данных – 5 лет. Собранные данные обрабатываются на поверхности шахты с последующим детальным анализом и выдачей необходимых форм, в том числе с оценкой как отработанного, так и остаточного ресурса машины.

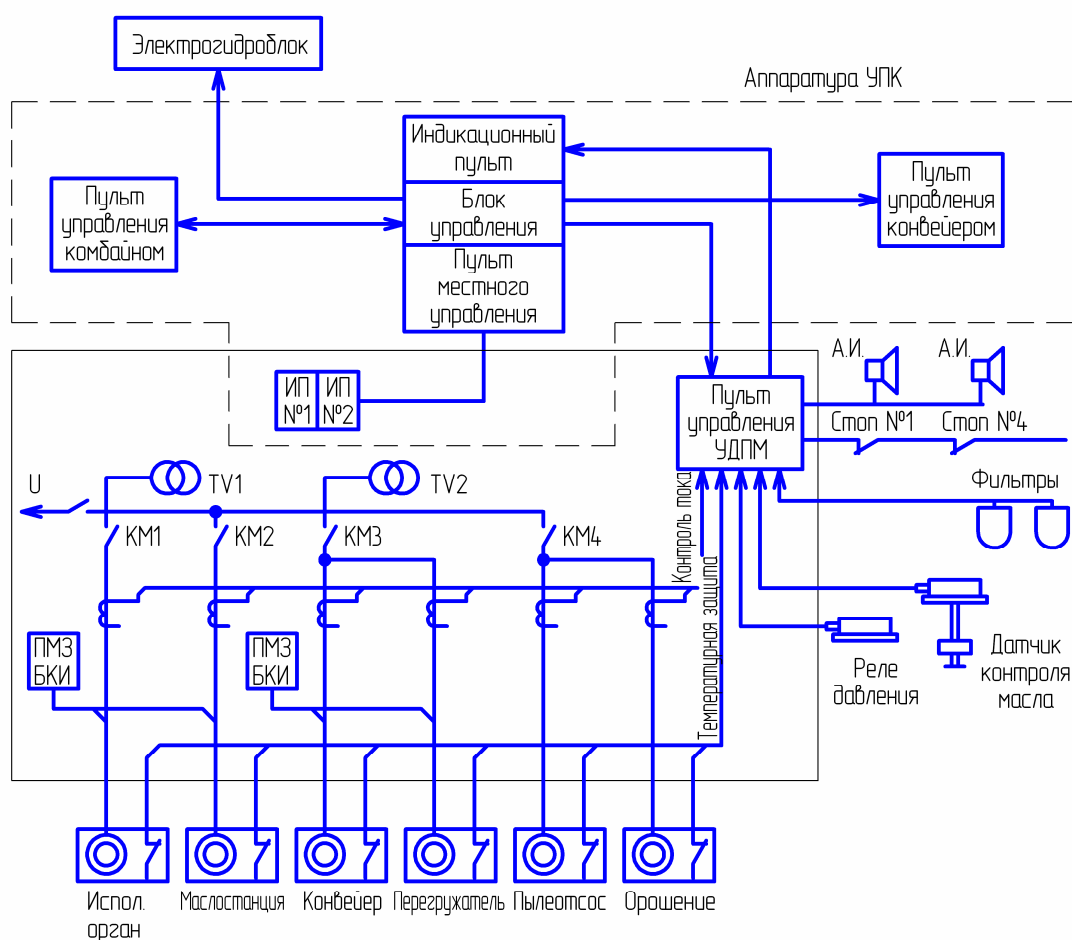


Рисунок 7 - Структурная схема системы управления проходческим комбайном

Выводы и направление дальнейших исследований. Значительное увеличение энерговооруженности, внедрение частотно-регулируемого привода подачи очистных комбайнов и двухскоростных двигателей для привода лавных конвейеров, а также внедрение многофункциональных систем управления нового поколения на микропроцессорной технике с высоким уровнем диагностики позволили существенно повысить производительность и улучшить другие эксплуатационные показатели оборудования.

Для оснащения горных машин нового поколения созданы системы автоматизированного управления: устройства КСД27.50, УКВ-650, аппаратуры АУДК, УКСД, УПК, УДПМ, АУСН, АО, частотный преобразователь ПЧЭШ-60. Комплектующие изделия (электрооборудование, коммутационная аппаратура, комплекс управления КС500Ч, частотный преобразователь ПЧЭ-120М) разработаны ГП «Донгипроуглемаш» совместно с институтами УкрНИИВЭ, ОАО «Автоматгормаш им. В. А. Антипова», ОАО «Элмис», НГУ.

Указанные системы управления освоены в серийном производстве заводами Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косарев В.В., Стадник Н.И., Косарев И.В., Мизин В.А., Приседский Е.В. Новое горно-шахтное оборудование для технического переоснащения угольных шахт // Уголь Украины. – 2007. – № 2.
2. Стадник Н. И., Бойко Г. Г., Рябченко А. С. Очистные комбайны УКД200 и УКД300 для эффективной отработки тонких пластов // Уголь Украины. – 2003. – № 9.
3. Костюков В.М., Сошенко И. Н. Высокопроизводительные очистные комбайны нового поколения КДК500 и КДК700 для пластов мощностью 1,35–4,3 м // Уголь Украины. – 2003. – № 9.
4. Андреев Г. В., Косарев И. В., Лелека И. Т., Довженко В. И. Скребок-вые конвейеры нового технического уровня // Уголь Украины. – 2003. – № 9.
5. Стадник Н.И., Ткачев В.В., Мезников А.В. Управление двухскоростными скребковыми конвейерами – Науково-технічний збірник “Гірнична електротехніка та автоматика”. Випуск № 75. – Дніпропетровськ, 2005. – С.62-68.

Л.Д. Чумаков

ВЫБОР ВЕЛИЧИНЫ ГАРАНТИЙНОГО СРОКА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИ ЕГО РАЗРАБОТКЕ

Аннотация. Обсуждаются вопросы выбора величины гарантийного срока эксплуатации для технического устройства при его разработке с учетом влияния величины гарантийного срока на спрос при продаже.

Ключевые слова: гарантийный срок эксплуатации, оптимизация прибыли, учет характеристик надежности технических устройств, эластичности спроса от величины гарантийного срока.

Введение

Произвести абсолютно надежное техническое устройство невозможно. Для некоторой компенсации ненадежности задается гарантийный срок – отрезок времени, в течение которого производитель обязуется заменить товар без дополнительной оплаты, если он не соответствует заявленному уровню качества. Эти обязательства закреплены законодательно [1].

Как правило, чем больше величина гарантийного срока, тем выше уровень качества и тем больше спрос.

Так как, назначая величину гарантийного срока, производитель несет определенные издержки, влияющие на размер дохода от продаж устройства, эта величина должна быть выбрана еще на этапе разработки технического устройства.

При выборе величины гарантийного срока необходимо учесть особенности рынка, цены, объемы выпуска продукции предприятием, характеристики безотказности технического устройства и др.

Анализ публикаций по теме исследования

Статья является продолжением работы [2], в которой исследовано влияние на прибыль от продажи технического устройства величины установленного его производителем гарантийного срока.

Учтена эластичность товара по цене. Рассмотрен один из классических вариантов – эластичный спрос, когда он растет при снижении цены.

Зависимость объема продаж от цены выражена следующим образом:

$$N_{\Pi} = \left(\frac{\Pi}{k} \right)^{-\frac{1}{c}}, \quad (1)$$

где Π – цена товара;

N_{Π} – число изделий, которые могут быть проданы по этой цене;

k и c – коэффициенты.

Цель статьи

Цель статьи – рассмотреть один из способов выбора величины гарантийного срока технического устройства на стадии его разработки с учетом влияния ее на спрос при продаже.

Основная часть

Оценка оптимальной величины гарантийного срока технического устройства по критерию максимума прибыли от его продаж в соответствии с маржинальным подходом приведена в [2].

Прибыль (Π) при продаже в этом случае зависит от цены Π , постоянных $S_{\text{пост}}$ и переменных $S_{\text{пер}}$ затрат на производство.

Маржинальная прибыль (МП) используется для определения цены товара:

$$\text{МП} = \Pi - S_{\text{пер}} \quad (2)$$

или

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

Величину цены можно найти из выражения (1):

$$\Pi = k N_{\Pi}^{-c}, \quad (4)$$

В работе [2] не была учтена зависимость спроса от величины гарантийного срока. В этом случае прибыль от продажи устройств возрастает при уменьшении величины гарантийного срока, так как уменьшается возможное число проданных и возвращенных для гарантийного ремонта устройств.

Вместе с тем, можно предположить, что спрос будет уменьшаться с уменьшением величины гарантийного срока.

Для учета изменения спроса введем коэффициент g , определяемый из выражения:

$$g = \frac{g_0 e^{rt_r}}{1 + g_0 (e^{rt_r} - 1)}, \quad (5)$$

где g_0 – значение g при $t_r = 0$;

r – коэффициент;

t_r – величина гарантийного срока.

Графически выражение (5) представляет собой логистическую кривую.

Объем продаж тогда будет определяться следующим образом:

$$N_{\Pi} = g \left(\frac{\Pi}{k} \right)^{\frac{1}{c}}, \quad (6)$$

Кроме того, количество проданных устройств уменьшится на число возвращенных некачественных устройств в течение гарантийного срока.

$$N_{\Pi} = g \left(\frac{\Pi}{k} \right)^{\frac{1}{c}} P(t_r), \quad (7)$$

где $P(t_r)$ – вероятность исправного состояния устройства в течение гарантийного срока.

Для оценки валового дохода нужно определить цену безубыточности:

$$\Pi_{\text{ТБУ}} = \frac{k_{\Pi}}{S_{\text{ПОСТ}} N}, \quad (8)$$

где ТБУ – точка безубыточности;

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

N – объем производства.

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, например, распределением Вейбулла:

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

С учетом выражения (8) величину валового дохода можно определить по формуле:

$$\text{ВД} = g \frac{\Pi^{\frac{c-1}{c}}}{k^{\frac{1}{c}}} P(t_r). \quad (10)$$

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

$$ВД = \max_{0 \leq t_r} g \frac{\Pi_c^{c-1}}{k^{-\frac{1}{c}}} P(t_r) \quad (11)$$

Рассмотрим тот же пример, что и в работе [2].

Для определения спроса на продукцию воспользуемся зависимостью объема продаж единиц товара (тыс. штук) от уровня цен (руб.) из работы [3]. Для нее $k = 3801,6$ и $c = 0,735$. Примем также $S_{\text{пост}} = 1100000$ руб., доля переменных затрат, приходящихся на одну единицу товара, равна 60 руб.

Пусть товаром будет некоторое техническое устройство.

Функция интенсивности отказов технического устройства при эксплуатации описывается следующим образом:

$$\lambda(t) = 0,093t, \quad (12)$$

Для этих исходных данных были проведены расчеты величины прибыли при $t_{r1} = 0$, $t_{r2} = 0,083$ года, $t_{r3} = 0,25$ года, $t_{r4} = 1$ год и $t_{r5} = 2$ года.

На рис. 1 показаны изменения прибыли для разной цены устройства и разных объемов его выпуска.

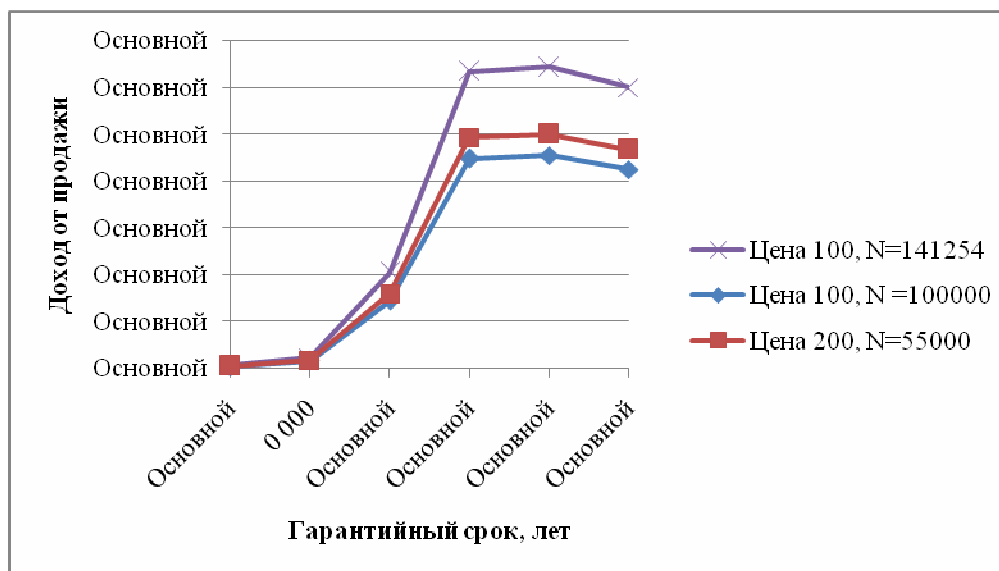


Рисунок 1 - Зависимость дохода от продажи изделия от величины гарантийного срока

В первом случае предполагается, что изготовитель может обеспечить максимальный объем производства, когда будет продана вся партия продукции. Оптимальным является гарантийный срок длительностью 1 год.

Во втором случае, когда объем выпуска ограничен 100000 устройств, оптимальным является срок гарантии также в 1 год, но выгоднее уменьшить объем выпуска до 55000 устройств и продавать их по цене 200 руб. за одно устройство.

В реальных расчетах необходимо учитывать и другие факторы производства и рынка.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В данной работе сделана попытка учета влияния эластичности спроса от качества выпускаемой продукции на выбор величины гарантийного срока для технического устройства на стадии его разработки.

Методика удобна тем, что при выборе оптимальной величины гарантийного срока определяются также цена на устройство, 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 времени безотказной работы, 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. Чумаков Л.Д. Оценка гарантийного срока для технического устройства // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (79). – Дніпропетровськ, 2012. – С. – 88-94.
3. 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.

В.В. Біляєва, А.В. Грибанова

РОЗРАХУНОК НЕСТАЦІОНАРНИХ ГРАНИЧНИХ УМОВ НА СТІНКАХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ЗАМІРАМИ ТЕМПЕРАТУРИ

Анотація. Теоретичним шляхом отримано розв'язок зворотної задачі теплопровідності. Для розрахунку використовувались метод регуляризації, операційний метод та метод степеневих рядів. За експериментальними замірами температури відновлені граничні умови на стінках конструкції (температура поверхні, тепловий потік і коефіцієнт тепловіддачі).

Ключові слова: зворотня задача теплопровідності, граничні умови, операційний метод, метод регуляризації.

Вступ

Організація охолодження конструкцій різноманітних технологічних агрегатів ускладнюється тим, що теплові процеси протікають при високих (3000 - 4000)K температурах і тисках. В конструкціях, що розглядаються високотемпературні продукти рухаються з дуже великою швидкістю, внаслідок чого різко зростають коефіцієнт конвективної тепловіддачі від гарячих продуктів до стінок конструкції і конвективні теплові потоки q_k . Крім того, теплообмін у конструкції характеризується високим рівнем радіації, що призводить до появи великих променистих теплових потоків q_r [1 - 3].

Внаслідок потужних сумарних конвективних і променистих теплових потоків до стінки конструкцій, температура її може досягати значень перевищуючих (1000 – 1500)⁰C. Величина цих потоків визначається значеннями режимних параметрів та температурою внутрішньої поверхні конструкції.

Коефіцієнт тепловіддачі від високотемпературних продуктів визначається з урахуванням спільного впливу конвективного і променистого теплових потоків за значеннями параметрів (тиск, склад і температура високотемпературних продуктів в ядрі газового потоку і у пристінковому шарі) на сталому режимі експлуатації [2, 3].

Час виходу аналізованих конструкцій на сталий тепловий режим порівнянно і може виявитися навіть більшим часу їх роботи при експлуатації. У цих умовах завдання визначення теплового стану в період роботи зводиться до розрахунку прогріву їх під впливом високотемпературних продуктів [3].

Конвективний теплообмін в заданому перерізі конструкції розглядається як тепловіддача між газовим потоком, який має велику швидкість і стінкою. Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в літературі наведені критеріальні вирази, рекомендовані різними авторами [3].

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі, враховуючи, що з формули $q_w(y, \tau) = q_k(y, \tau) + q_{\text{л}}(y, \tau)$, при нестационарному теплообміні можна скористатися формулою

$$\alpha(y, \tau) = \frac{q_w(y, \tau) - q_{\text{л}}(y, \tau)}{T_f(y, \tau) - T_w(y, \tau)}, \quad (1)$$

де $T_f(y, \tau)$ - температура всередині конструкції; $T_w(y, \tau)$, $q_w(y, \tau)$ - температура і тепловий потік на внутрішній стінці. Безпосередньо заміряти ці величини в більшості випадків неможливо, і тому необхідно скористатися непрямыми методами їхнього визначення. Значення $T_w(y, \tau)$ і $q_w(y, \tau)$ можна визначити за вимірюваним при експерименті температур всередині або на поверхні стінки, вирішуючи зворотні задачі теплопровідності.

Постановка задачі

Зворотня теплова задача для пластини формулюється наступним чином. Потрібно за замірами температури $f_w(\tau)$ і теплового потоку $g_w(\tau)$ до пластини при $x = 0$ знайти зміни температури і теплового потоку на поверхні $x = 1$. Розв'язок зворотної теплової задачі в такій постановці доцільно побудувати з використанням розв'язка задачі Коші [4,5].

Нехай в просторі змінних x, τ задана деяка гладка поверхня Γ . З кожною точкою $x, \tau \in \Gamma$ зв'язується деякий напрямок ℓ , недотичне Γ .

В околиці точки поверхні потрібно знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq 1, \quad 0 < \tau < \infty, \quad (2)$$

що задовольняє умовам Коші

$$T|_{x=0} = f(\tau), \quad -\frac{\lambda}{R} \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = g(\tau), \quad (3)$$

де $\tau = \frac{a}{R^2} t$, $x = \frac{X}{R}$ – безрозмірні час і координата.

Розв'язок задачі [1,2,6] можна записати у вигляді

$$T(x, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x)^{2n}}{(2n)!} f^{(n)}(\tau) - \frac{x}{\lambda} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(x)^{2n}}{(2n+1)!} g^{(n)}(\tau) \quad (4)$$

Розв'язок (4) при заданих $f(\tau)$ і $g(\tau)$ дозволяє знайти шукані зміни температури $T_w = T(1, \tau)$ і теплового потоку $q_w(\tau) = -\frac{\lambda}{R} \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=1} \dots$

Однак у такій інтерпретації розв'язку (4), де функції $f(\tau), g(\tau)$ відомі з експерименту з деякою погрішністю, необхідно враховувати і той факт, що обчислення операторів диференціювання $f^{(n)}(\tau), g^{(n)}(\tau)$ нестійке до збурень у вихідних даних [1]. Таким чином, маємо типову некоректну задачу, для побудови стійкого розв'язку якої необхідно побудова регуляризуючих алгоритмів.

Збережемо в розв'язку (4) кінцеве число доданків N . Введемо позначення

$$Z_1(\tau) = f'(\tau), Z_2(\tau) = f''(\tau), \dots, Z_n(\tau) = f_{(\tau)}^{(N)} \quad (5)$$

Інтегруючи (5), отримаємо систему інтегральних рівнянь Вольterra першого роду

$$f_{(\tau)} - f_{(\tau)} = \int_0^{\tau} Z_1(\eta) d\eta, f_{(\tau)}^{(k)} - f_{(0)}^{(k)} \frac{\tau^v}{v!} = \int_0^{\tau} \frac{(\tau - \eta)^{k-1}}{(k-1)!} Z_k(\eta) d\eta, \quad (6)$$

де $k = 1, 2, \dots, N$.

Співвідношення для теплового потоку в (4) записується аналогічно. Надалі будемо вважати, що на поверхні $x = 0$ знімання тепла відсутнє, тобто стінка теплоізована. Тоді розв'язок (4) з урахуванням позначень (5) записується у вигляді

$$T(x, \tau) = f(\tau) + \frac{x^2}{2!} Z_1(\tau) + \frac{x^4}{4!} Z_2(\tau) + \dots + \frac{x^{2N}}{2N!} Z_N(\tau). \quad (7)$$

Таким чином, граничні умови при $X=1$ відновлюються співвідношенням (7), в якому функція $Z_k(\tau)$ знаходяться з розв'язка інтегральних рівнянь (6)

$$AZ_k = \int_0^{\tau} \frac{(\tau - \eta)^{k-1}}{(k-1)!} Z_k(\eta) d\eta = U(\tau), \quad (8)$$

де права частина задається наближено, тобто

$$U = U_{\delta} = f(\tau) - \sum_{v=0}^{k-1} f^{(v)}(\tau) \frac{\tau^v}{v!}. \quad \text{Тут } \delta - \text{числовий параметр, що}$$

характеризує похибку у правій частині рівняння (8).

Задача (8) є в загальному випадку некоректно поставленої [1, 6, 7]. Найбільш поширеним в даний час ефективним регуляризаційним алгоритмом для її розв'язку є алгоритм, заснований на мінімізації функціонала Тихонова А.Н. [1]

$$M_{\delta}^{\alpha} [Z_k, U_{\delta}] = \rho_v^2 (AZ_k, U_{\delta}) + \alpha \Omega [Z_k] \quad (9)$$

з подальшим вибором параметра регуляризації за так званим принципом нев'язки.

Наприклад, якщо $Z_{k,\delta}^{\alpha}$ - будь-який екстремум функціоналу (9), що реалізує його глобальний мінімум при заданому α і фіксованому δ , то числовий параметр визначається з умови

$$\|AZ_{k,\delta}^{\alpha} - U_{\delta}\|_v = \delta, \quad \alpha > 0 \quad (10)$$

Регуляризаційний алгоритм (8) - (10) докладно вивчено в [1] і має стійкість до малих збурень правої частині (8).

Зворотній теплова задача для тришарової пластини формулюється наступним чином. Потрібно за замірами температур на стику другої і третьої пластини знайти зміну температури і теплового потоку на зовнішній поверхні третьої пластини ($x = 1$).

Розв'язок зворотної теплової задачі в такій постановці побудуємо використовуючи розв'язок задачі Коші

$$T_3(x, \tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!} f_{2,\vartheta}^{(n)}(\tau) - \frac{x}{\lambda_3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} g_2^{(n)}(\tau), \quad (11)$$

де $f_{2,\vartheta}(\tau)$ - температура, заміряна на стику другої і третьої пластини;

$g_2(\tau)$ - тепловий потік на стику другої і третьої пластини; $\tau = \frac{a_3}{R_3^2} t$,

$x = \frac{x_3}{R_3}$ - безрозмірні час і координата. В (11) входить невідома

функція $g_2(\tau)$, яка визначається з розв'язку прямої задачі для двошарової пластини.

Розв'язок даної задачі має вигляд

$$T_3(x, \tau) = f_{2,3}(\tau) + \frac{x^2}{2!} Z_1(\tau) + \frac{x^4}{4!} Z_2(\tau) + \dots + \frac{x^{2N}}{(2N)!} Z_N(\tau) + \frac{x^2}{\lambda_3} g_2(\tau) + \\ + \frac{x^4}{3!\lambda_3} Z_1^*(\tau) + \frac{x^6}{5!\lambda_3} Z_2^*(\tau) + \dots + \frac{x^{2N+2}}{(2N+1)!\lambda_3} Z_N^*(\tau), \quad (12)$$

де $f_{2,3}(\tau)$, $g_2(\tau)$ нам задані, а функції $Z_n(\tau)$, $Z_n^*(\tau)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) визначаються з розв'язку інтегральних рівнянь Вольтерра першого роду (6) методом регуляризації (8) – (10).

Отже, шукані величини $T_w(\tau) = T_3(1, \tau)$, $g_w(\tau) = \frac{\lambda_3}{R_3} \frac{\partial T_3(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=1}$

визначаються з розв'язку (24) з використанням регуляризуючого алгоритму (8) – (10).

Експериментальні дані та результати розв'язку зворотної теплової задачі для одношарової, двошарової і тришарової пластин наведено на рис.1.

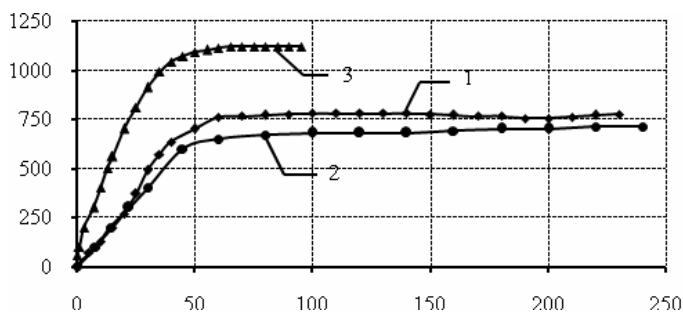


Рисунок 1

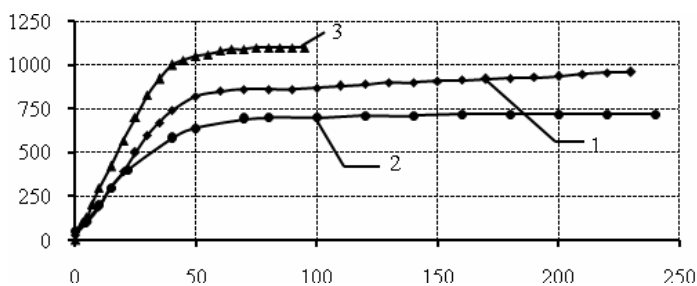


Рисунок 2

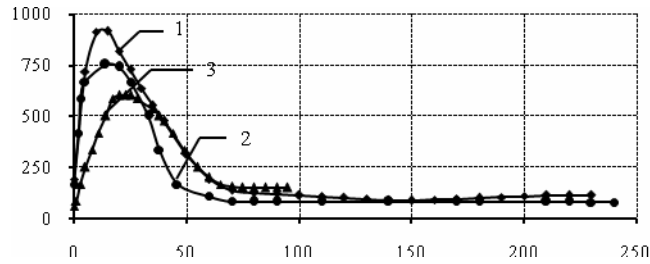


Рисунок 3

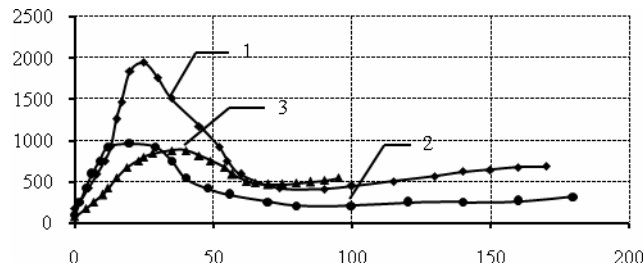


Рисунок 4

Рисунок 1 - Экспериментальні дані та результати розв'язку зворотної теплової задачі для одношарової пластины: а) експериментальна температура; б) температура поверхні; в) тепловий потік; г) коефіцієнт тепловіддачі. На рисунках: 1 – одношарова, 2 – двошарова, 3 – тришарова пластины.

Висновки

Проведені розрахунки для одношарової і двошарової пластин показали, що похибка в завданні експериментальної температури до 5% викликає максимальні відхилення температури поверхні до 10% на тимчасовому інтервалі 0 - 55 с, а для двошарової 0 - 55 с; на решті тимчасовій ділянці до 5 %. Максимальні відхилення теплового потоку на тих же тимчасових інтервалах складають відповідно 20% і 10%. Розрахунки для тришарової пластины показали, що похибка в завданні експериментальної температури до 5% викликає максимальні відхилення температури поверхні до 10% на тимчасовому інтервалі 0 - 75 с, 0 - 35 с, 0 - 55 с, а на решті часовій ділянці до 5 %. Максимальні відхилення теплового потоку на тих же тимчасових ділянках складають відповідно 20% і 10%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алифанов О. В. Обратные задачи теплообмена. М: Машиностроение, 1988. 280 с.
2. Коваленко Н. Д., Шмукин А. А., Гужва М. И., Махин В. В. Нестационарные тепловые процессы в энергетических установках летательных аппаратов. К.: Наук. думка, 1988. 224 с.
3. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.
4. Алифанов О. В., Артюхин Е. А., Румянцев С. Я. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
5. Веселовский В. Б. Тепловые режимы составных элементов конструкции летательных аппаратов // Тепломассообмен – ММФ Минск: ИТМО АНБ, 1996, Т. IX (Вычислительный эксперимент в задачах тепломассообмена и теплопередачи). С. 37 – 41.
6. Веселовский В. Б. Решение задач нестационарной теплопроводности для многослойных теплозащитных покрытий // Прикладные вопросы аэродинамики. К.: Наук. думка, 1987. С. 95 – 100.
7. Веселовский В. Б. Нелинейные задачи теплопроводности для составных элементов конструкций // Прикладные задачи гидродинамики и тепломассообмена в энергетических установках. К.: Наук. думка, 1989. С. 113 – 117.

В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДБОРУ КОМПОНЕНТІВ
МОДУЛЬНОЇ БАГАТОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ В
ЗАДАЧІ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛОВИРОБУ**

Анотація. Дослідження проблеми підбору компонентів модульної багато-процесорної системи в задачі термічної обробки металовиробу. Статтю присвячено дослідженню проблеми узгодження можливостей процесорів і мережевого інтерфейсу в багатопроцесорних обчислювальних системах. Основна увага приділяється дослідженню ефективності й прискорення обчислень для розв'язування задачі термічної обробки металовиробу за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних систем. Виведено аналітичні співвідношення для отримання оптимального числа вузлів багатопроцесорної системи через її параметри. Ключові слова: багатопроцесорна обчислювальна система, прискорення, ефективність, коефіцієнт завантаження обчислювальної мережі, обчислювальні вузли.

Вступ

Аналіз об'єкта досліджень. У даний час термічна обробка (ТО) металу є найбільш перспективним способом докорінного покращення споживчих якостей металовиробів. При цьому сталь для холодної висадки повинна мати у початковому стані структуру зернистого перліту оціненим певним балом, тобто такого, що має глобулярну форму карбідної фази певного розміру. Для отримання структури з частково або повністю сфероїдизованою карбідною фазою металовироби піддаються сфероїдизівному відпалюванню. Щоб вирішити окреслені вище проблеми, було розроблено установку для термічної обробки довгомірного сталевого виробу [1]. При цьому, дослідження, спрямовані на вивчення особливостей термічної обробки металу за допомогою такої установки, набули свого розвитку в роботах [2 – 6]. Розроблена установка призначена для термічної обробки металів і сплавів. Застосування установки має на меті поліпшення технологічних властивостей

металопрокату за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу. При цьому технологічний процес термічної обробки сталі повинен набувати таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, поліпшення експлуатаційних характеристик. Зазначених властивостей технологічного процесу ТО металопрокату досягають за рахунок застосування багатопроцесорної обчислювальної системи [7 – 11]. Багатопроцесорна обчислювальна система монтується у вигляді окремого модуля і дозволяє на основі математичної моделі процесу нагрівання зразка вже у виробничних умовах контролювати нагрівання дроту до переходу в аустенітну область до температури фазової перекристалізації на всій площині перерізу довгомірного сталевого виробу, а потім, розв'язавши обернену задачу теплопровідності (ОЗТ), здійснювати контроль необхідного режиму ізотермічної витримки в інтервалі температур відпалювання на всій площині перерізу зразка. Застосування установки для реалізації режиму сфероїдизівного відпалювання зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, що забезпечує необхідні механічні властивості металу, потрібні для подальшого виконання холодної деформації.

Мета та постановка проблеми досліджень

Для випробування функцій установки було проведено кілька експериментів, коли дріт діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р піддавався термічній обробці. За початкову було взято ферито-бейнітну (мартенситна) структура заготовки. Зауважимо, що термічна обробка металовиробу відбувається відповідно до заданих перехідних процесів. На першому етапі процес термічної обробки матеріалу здійснювався шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони. Для заданого матеріалу встановлено такі значення критичних точок: $A_{c1} = 725\text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_{c3} = 795\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нагрівання відбувалось до такого значення: $A_{c1} + (10 - 30\text{ }^{\circ}\text{C})$. У наступному етапі обробки матеріалу було реалізовано процес ізотермічної витримки протягом 45 с. Далі тривав процес охолодження зі швидкістю $20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температури $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ з подальшою ізотермічною витримкою протягом 45 с. Нарешті, на останньому етапі обробки матеріалу зразок нагрівали зі швидкістю $15 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до підкритичних температур. В зазначеному технологічному процесі критичним є режим нагрівання зразка, який триває 12 с. Отже, виникає проблема узгодження можливостей процесорів і мере-

жевого інтерфейсу, яка полягає в забезпеченості контролю температурних режимів для заданого часового проміжку.

Яким чином можна узгодити можливості процесорів і мережевого інтерфейсу багатопроцесорної системи в даній роботі показано на прикладі застосування в багатопроцесорній системі процесорів двох типів *Intel Pentium 4 3 GHz* і *Intel E8400 3 GHz*. Для визначеності передбачимо, що довжина лінії термічної обробки металовиробу становить 7,65 м і на ній обробляється дріт діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р. До того ж встановлено розмір різницевої сітки 100 x 76500. Уводимо також такі величини:

$$E_i = 76500, \quad E_y = 100, \quad (1)$$

де E_i – довжина масиву граничної області, одночасно ця величина визначає довжину різницевої сітки по осі абсцис, E_y – довжина різницевої сітки по осі ординат.

Мета досліджень полягає у виконанні процедури узгодження обчислювальних можливостей процесорів багатопроцесорної системи з мережевим інтерфейсом цієї системи, крім того, необхідно встановити оптимальне число вузлів кластерної системи, що керує процесом термічної обробки металовиробу.

Математична модель досліджень, проблема моделювання режимів термічної обробки метала

Багатопроцесорна обчислювальна система із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база включає математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності, тобто

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (2)$$

при цьому критерій Фур'є $\tau = \frac{a t}{R^2}$, якщо $\tau > 0$, W – питома потужність у вигляді джерел тепла, Вт/м².

Крайові умови цього рівняння мають такий вигляд:

$$T(0, r, z) = f(r, \tau);$$

$$T(\tau, 1, z) = \text{var};$$

$$\frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} = 0;$$

$$T(\tau, 0, z) \neq 0.$$

Два останні в крайових умовах співвідношення свідчать, що значення температури в ділянці осі циліндра протягом усього процесу

теплообміну має бути скінченним. За координатою z граничні умови, залежно від особливостей розв'язуваної задачі, можуть бути першого, другого або третього роду. Розв'язують задачу (2) із застосуванням методів розщеплювання, суть яких полягає в редукції складного оператора (2) до простих. Цей підхід дозволяє проінтегрувати дане рівняння як послідовність інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури.

Зауважимо, що тут саме задача керування (як і задача синтезу) в її точній постановці відноситься до класу обернених, оскільки вона передбачає визначення керуючих функціональних параметрів на основі заздалегідь заданого, необхідного результату (обернена задача керування). Алгоритмом розв'язування обернених задач слугує метод “вилки” з попереднім визначенням деякого початкового відрізка. Розв'язок задачі реалізується в два етапи. На першому реалізується відокремлення мінімуму нев'язки, на другому визначається мінімум шуканої функції керування з відокремленого інтервалу. Зазначена процедура реалізується стандартно. Інакше кажучи, якщо ϑ являє собою деяке дійсне значення шуканого кореня, тобто, коли $a \ll b$, а $f(\vartheta)=0$, то можна обчислити число w таким, що задовольняє умови: $a \leq \vartheta \leq b$ та $|\vartheta - w| < \varepsilon$, тобто меншим від будь-якого наперед заданого малого числа ε . Подібна схема включена до складу математичного апарату керування багатопроцесорною обчислювальною системою.

Проблема моделювання полягає в тому, що для забезпечення необхідної точності й стійкості обчислень доводиться брати розрахункову сітку з чималою кількістю вузлів і виконувати безліч ітерацій. Унаслідок цього число арифметичних операцій, що необхідні для розрахунку температурних полів, перебуває в межах $10^7 \div 10^8$ вузлів, а коли крок за часовою ознакою становить 10^{-2} с, то загальна кількість вузлів для обчислень може досягти 10^{20} і більше. Однопроцесорні обчислювальні системи не можуть впоратись з таким навантаженням під час моделювання в реальному масштабі часу, тому найбільш виправданим буде застосування багатопроцесорних систем, що й було здійснено з метою удосконалення технології термічної обробки довгомірного сталевих виробу.

Особливості застосування процесора *Intel Pentium 4 3 GHz*. Встановлення оптимального числа вузлів кластерної системи.

Зазначимо, що обчислювальними методами розв'язування задачі теплопровідності слугували числово-аналітичні схеми підвищеного порядку точності, висвітлені в роботі [12]. На одному тестовому комп'ютері, оснащеному процесором *Intel Pentium 4 3 GHz*, швидкість розрахунку задачі теплопровідності при використанні компілятора *Intel Fortran Compiler* складала 0,15 с на одну ітерацію для різницевої сітки (1) елементів типу *Real*8*. Таким чином, швидкість обчислень при розв'язуванні задач даного класу з використанням процесора *Intel Pentium 4 3 GHz* дорівнюватиме $3,1 \cdot 10^9$ біт/с. Якщо таку швидкість позначити символом V_c , то аналітичне співвідношення для визначення часу рахунку однієї ітерації можна записати в такому вигляді:

$$T_{\text{calc}} = \frac{E_i \cdot E_y \cdot K_R}{V_c}, \quad (3)$$

де K_R – обсяг однієї різницевої комірки елемента типу *Real*8* (64 біт). Проведемо аналіз співвідношення (3). Тут параметр V_c залежить, як від потужності центрального процесора, так і від застосованих обчислювальних методів. При виконанні завдань різного типу його значення, безумовно, зазнає змін. Крім того, у такий параметр закладено інформацію про “потужність обчислень”, тобто кількість математичних операцій, що можуть бути виконані в межах однієї комірки різницевої сітки.

Очевидно, що співвідношення (3) потребує свого уточнення з огляду на специфіку режимів роботи установки термічної обробки довгомірного виробу. Так, зауважимо, що швидкість протягання довгомірного виробу $V_{pr} = 60$ мм/с. Це означає, що за одну секунду дріт буде переміщуватися на 60 мм, а це не дає можливості контролювати температурні режими протягання по всій довжині технологічної лінії. У цьому випадку співвідношення (3) можна подати в такому вигляді:

$$T_{\text{calc}} = \frac{E_i \cdot E_y \cdot K_R}{V_c} \cdot K_{pr}. \quad (4)$$

Тут величина K_{pr} враховує швидкість протягання пристрою термічної обробки довгомірного виробу, матеріальний баланс розподілу тепла при нагріванні (охолоджуванні) дроту і відповідає такому співвідношенню:

$$K_{pr} = V_{pr} \cdot \frac{t}{h}, \quad (5)$$

де t – час обчислень на одиницю переміщення установки, с; h – величина кроку обчислювальної сітки, мм. Проведені обчислення показали час розрахунку однієї ітерації $T_{calc} = 83,61$ с. Разом з тим, увесь процес термічної обробки дроту займає 114 с. Зрозуміло, що один процесор не в змозі реалізувати режим визначення температурних полів протягом кожного циклу термічної обробки дроту. За таких обставин необхідно застосовувати кластерні технології визначення температурних полів заготовки. Таким чином, подальші дослідження будуть спрямовані на визначення оптимального числа лез багатопроцесорної системи, яка керує термічною обробкою довгомірного виробу, з огляду на обчислювальні можливості обраного процесора.

Відповідно до методики дослідження впливу мережевого інтерфейсу на ефективність багатопроцесорної кластерної системи, яка розкрита в [13], визначимо час граничного обміну даними, коли згадана система працює в режимі дефіциту й профіциту мережевого інтерфейсу [13].

Вихідні дані для вивчення такого режиму роботи багатопроцесорної системи надані в таблиця 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку характеристик багатопроцесорної системи при застосуванні процесора *Intel Pentium 4 3 GHz*

V_p	1 Гбіт/с
E_i	100
V_c	$3,1 \cdot 10^{-9}$ біт/с
K_R	8 біт
m	2
d	2
k	2

В таблиці 1 прийняті наступні позначення: V_p – пропускна здатність мережі системи, Гбіт/с; k – кількість каналів зв'язку обчислювальної мережі, які працюють одночасно (кількість обчислювальних мереж); значення величини m може дорівнювати одиниці в умовах одностороннього режиму граничного обміну даними, або двом –

двостороннього; d – напівдуплексний ($d = 1$) або дуплексний ($d = 2$) режим роботи обчислювальної мережі багатопроцесорної системи.

За основу для визначення часу граничного обміну даними в кластерній системі при роботі в режимі дефіциту її мережевого інтерфейсу скористаємося співвідношенням такого вигляду:

$$T_{ex1} = \frac{m \cdot (N - 1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot K_{pr}}{k \cdot d \cdot V_p}, \quad (6)$$

Щоб обчислити час граничного обміну даними при роботі кластерної системи в режимі профіциту її мережевого інтерфейсу, застосуємо співвідношення такого вигляду:

$$T_{ex2} = \frac{m \cdot (N - 1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot N \cdot K_{pr}}{k_m \cdot d \cdot V_b}. \quad (7)$$

Далі, розглядаючи багатопроцесорну систему в умовах виконаного експерименту, встановимо в ній кількість вузлів, що може забезпечити якнайефективніше розв’язування задачі. При цьому зауважимо, що час розрахунку однієї ітерації обчислювального процесу складається із двох доданків: часу безпосереднього обчислення на процесорах і часу обміну даними між обчислювальними вузлами кластера, тобто

$$T_{it} = T_{calc} + T_{ex}. \quad (8)$$

При цьому в роботі [13] показано, що швидкість обчислень зростатиме приблизно до моменту, коли

$$T_{calc} \diamond T_{ex}. \quad (9)$$

Таким чином, на підставі співвідношення (9) можна розрахувати кількість вузлів у кластерній обчислювальній системі, потрібну для ефективного розв’язування задачі. Відзначимо, що даний етап досліджень має на меті зменшення загального часу розрахунку шляхом розпаралелювання програми. Очевидно, що при цьому загальний розмір різницевої сітки не залежить від числа обчислювальних вузлів кластерної системи. Враховуючи співвідношення (9), отримують аналітичні вирази для визначення оптимального числа вузлів кластерної системи, при її роботі в режимі дефіциту мережевого інтерфейсу, тобто

$$\frac{T_{calc}}{N} \diamond \frac{m \cdot (N - 1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot K_{pr}}{k \cdot d \cdot V_p}. \quad (10)$$

А також маємо такий вираз для профіциту мережевого інтерфейсу:

$$\frac{T_{\text{calc}}}{N} \cdot \frac{m \cdot (N - 1) \cdot E_i \cdot K_R \cdot N \cdot K_{\text{pr}}}{k_m \cdot d \cdot V_b} . \quad (11)$$

Користуючись виразами (10) і (11), можна отримати два рівняння відносно N для визначення оптимального числа вузлів кластерної системи, при якому загальний час обчислень, потрібний для розв'язування задачі, буде мінімальним. У зв'язку з цим рівняння (10) зводиться до квадратичного вигляду, тобто

$$N^2 - N - \frac{E_y \cdot k \cdot d \cdot V_p}{m \cdot V_c} = 0 . \quad (12)$$

Для зручності аналізу рівняння (11) запишемо таким чином:

$$N^2 - N - \lambda = 0 . \quad (13)$$

У рівнянні (13) $\lambda = f(E_y, V_p, 1 / V_c)$, і цю величину можна трактувати як коефіцієнт узгодженості можливостей обраних процесорів, мереженого інтерфейсу і величини області обчислень, коли система працює в режимі дефіциту мережевого інтерфейсу. Крім того, необхідно підкреслити, що відповідність можливостей кластерної системи характеру розв'язуваних задач, вимагає узгодження всіх складових, які входять у значення величини λ . Проведемо аналіз цього коефіцієнта. На перший погляд, результат виявився дещо парадоксальним. Він свідчить про те, що коефіцієнт узгодженості λ , як і оптимальне число лез у кластерній системі, не залежить від розміру області обміну даними. Таке твердження можна пояснити тим, що розподіл області обчислень між вузлами кластерної системи виконувався при незмінному її розмірі. Це означає, що співвідношення часу, який витрачається на обробку даних цієї області, і часу пересилання їх теж залишався незмінним і таким, що не залежить від її розміру. Другий дуже важливий висновок полягає в тому, що оптимальне число лез у кластерній системі, яке забезпечує найбільшу його швидкодію, зменшується із збільшенням обчислювальної потужності процесорів, що входять у неї. Таке твердження стає цілком зрозумілим, коли врахувати, що мережевий обмін даними між вузлами кластерної системи тим помітніше буде гальмувати загальний процес обчислень (8), чим менше часу буде витрачатися безпосередньо на розв'язування певної задачі.

Таким чином, розв'язком рівняння (2) будуть два корені, один з них від'ємний, а інший – додатний. Виходячи з поставлених фізичних умов завдання, приймається додатний корінь, значення якого дорівнює восьми, отже $N = 8$. Зауважимо, що такий результат задовольняє нерівності, яке встановлює умови функціонування кластерної системи в режимі дефіциту мережевого інтерфейсу [13].

Рівняння (11) зводиться до кубічного вигляду, тобто

$$N^3 - N^2 - \frac{E_y \cdot k_m \cdot d \cdot V_b}{m \cdot V_c} = 0. \quad (14)$$

Для зручності аналізу запишемо його таким чином

$$N^3 - N^2 - \mu = 0. \quad (15)$$

У рівнянні (15) $\mu = f(E_y, V_b, 1 / V_c)$, і дану величину можна вважати коефіцієнтом узгодженості можливостей обраних процесорів, мереженого інтерфейсу і величини області обчислень, коли система працює в режимі профіциту мережевого інтерфейсу. Проаналізуємо значення цього коефіцієнта. Можна зробити висновок, що оптимальне число лез у кластерній системі здатне забезпечити найбільшу її швидкодію, буде залежити від величини області обчислень, можливостей комутатора й обчислювальної потужності процесорів, з яких складається кластерна система. Варіація зазначених параметрів і дозволяє обрати відповідну кількість лез при роботі системи в режимі профіциту мереженого інтерфейсу.

Унаслідок розв'язку рівняння (14) буде отримано три корені, зокрема, два уявні, а один дійсний. Дійсний корінь відповідає такій кількості вузлів: $N = 33$. Проте аналіз цього результату свідчить, що він не задовольняє умову функціонування кластерної системи в режимі профіциту мережевого інтерфейсу [13]. Проаналізувавши отримані результати моделювання, можна зробити висновок, що в умовах задачі, яка досліджується, оптимальне число лез кластерної системи буде відповідати $N = 8$.

Дослідження ефективності кластерної системи при застосуванні процесора Intel Pentium 4 3 GHz

Подальші дослідження мали на меті оцінити ефективність розпаралелювання. Вихідні дані для вивчення такого режиму роботи багатопроцесорної системи наведено в таблиці 1. На цьому етапі до-

сліджень були використані аналітичні співвідношення, виведені в [13].

Отримані результати моделювання подано у вигляді графічних залежностей (рисунки 1, 2). На рисунок 1 лінією 1 показано час розв'язку задачі на N процесорах, лінія 2 відображає час граничного обміну даними, а лінія 3 показує загальний час розв'язку задачі.

Таким чином, маємо передумови для кількісного оцінювання ефективності багатопроцесорної системи. У рамках цього завдання оптимальне число вузлів у кластерній системі, при якому досягається максимальна ефективність розпаралелювання, $N = 8$. Такий розмір кластера забезпечить у 4,28 рази швидше, розв'язування задачі, ніж на одному комп'ютері. Як показують розрахункові дані, запропонований режим роботи кластера дозволив не тільки підвищити ефективність системи, але й суттєво скоротити час обчислень, з 83,11 до 19,52 с.

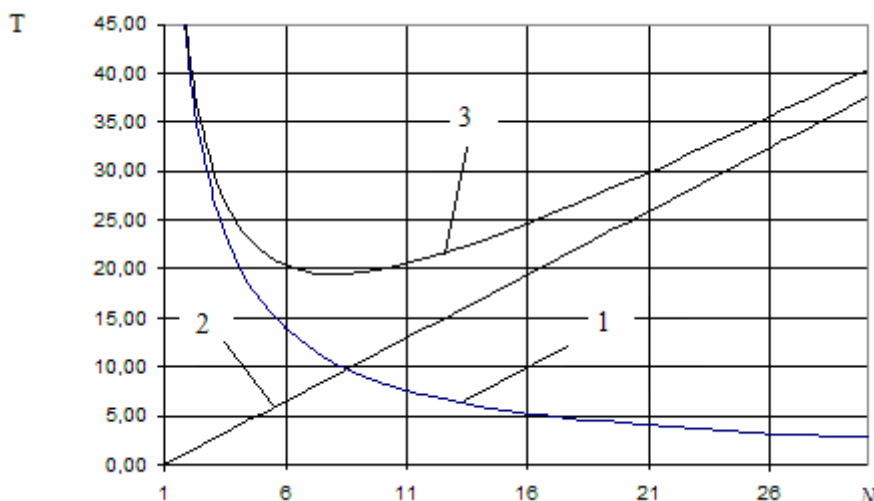


Рисунок 1 – Криві залежності часу розрахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при застосуванні процесора *Intel Pentium 4 3 GHz*

Разом з тим, зауважимо, що така величина прискорення обчислень не в змозі забезпечити контроль температурних полів при термічній обробці металовиробу протягом усіх її циклів. В такому випадку необхідно застосовувати більш потужні процесори, тому наступний розділ статті і спрямовано на висвітлення таких досліджень.

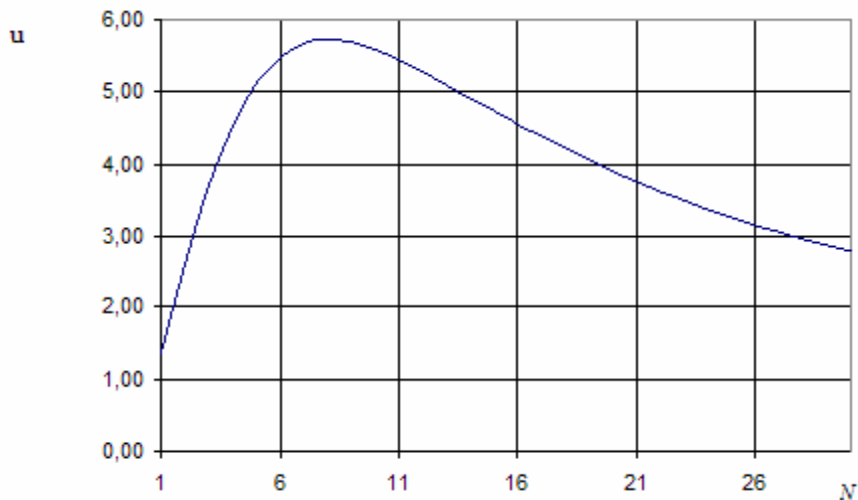


Рисунок 2 – Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при застосуванні процесора *Intel Pentium 4 3 GHz*

Особливості застосування процесора *Intel E8400 3 GHz*

За рівних інших умов розглянемо, яким чином відбувається процедура узгодження можливостей процесора *Intel E8400 3 GHz* з мережним інтерфейсом кластерної системи. Принагідно зауважимо, що аналіз співвідношень (12, 13) дозволяє зробити висновок, згідно з яким при збільшенні потужності процесорів кластера можна очікувати суттєвого зростання ефективності розпаралелювання.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку характеристик багатопроцесорної системи при застосуванні процесора *Intel E8400 3 GHz*

V_p	1 Гбіт/с
E_i	100
V_c	$1,46 \cdot 10^{10}$ біт/с
K_R	8 біт
m	2
d	2
k	2

Очевидно, що ця процедура повинна виконуватися на фоні зменшення кількості вузлів кластерної системи. Для перевірки таких припущень було взято процесор *Intel E8400 3 GHz*, який для заявлених чисельних методів дає швидкість $1,47 \cdot 10^{10}$ біт/с. В той же

час мережеве устаткування кластерної системи залишається незмінним. Вихідні дані для вивчення такого режиму роботи багатопроцесорної системи надані в таблиця 2.

Визначення оптимального числа вузлів кластерної системи при застосуванні процесора Intel E8400 3 GHz. Завдання досліджень полягає, з одного боку, у визначенні оптимального числа вузлів кластерної системи при термічній обробки металовиробу, а з іншого боку, необхідно виконати процедуру узгодження обчислювальних можливостей процесора Intel E8400 3 GHz з мережевим інтерфейсом кластерної системи. За основу проведених досліджень були взяті аналітичні співвідношення (13 – 15).

Проведений аналіз отриманих результатів моделювання показав наступне. В умовах задачі, яка досліджується оптимальне число вузлів кластерної системи буде відповідати $N = 4$. Такий результат і підтвердив раніше висунуті припущення. Подальші дослідження спрямовані на вивчення оцінок ефективності розпаралелювання.

Дослідження ефективності кластерної системи при застосуванні процесора Intel E8400 3 GHz. Даний етап досліджень реалізовано відповідно до аналітичних співвідношень, виведених в роботі [13]. Отримані результати моделювання представлені також у вигляді графічних залежностей (рисунки 3, 4).

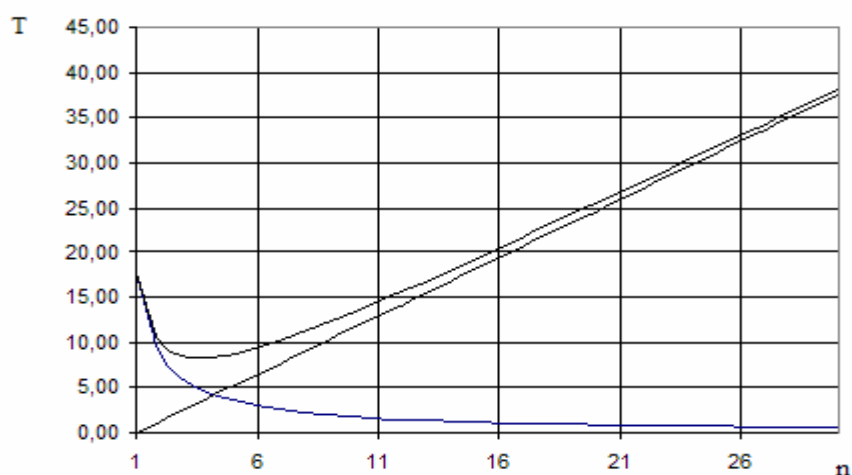


Рисунок 3 – Криві залежності часу розрахунку однієї ітерації від кількості вузлів багатопроцесорної системи при застосуванні процесора Intel Pentium 4 3 GHz

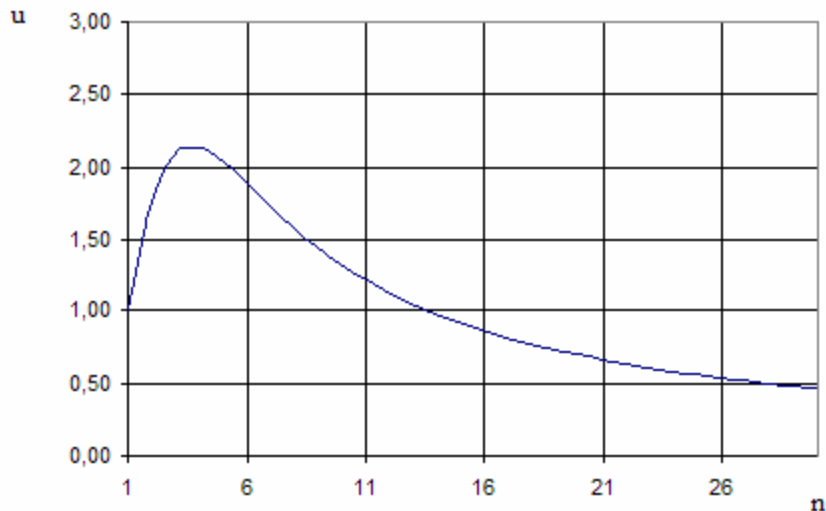


Рисунок 4 – Крива залежності прискорення обчислень від кількості вузлів багатопроцесорної системи при застосуванні процесора *Intel Pentium 4 3 GHz*

Отже, маємо передумови для кількісної оцінки ефективності багатопроцесорної системи. В рамках даної задачі оптимальне число вузлів кластерної системи, при якому досягається максимальна ефективність розпаралелювання, відповідатиме $N = 4$. При вибраному розмірі кластера задача розв'язуватиметься в 2,13 раз швидше, ніж на одному комп'ютері. Як показують розрахункові дані, такий режим роботи кластера дозволив суттєво скоротити час обчислень. Так, час обчислень зменшився з 17,75 до 8,33 с. Зауважимо, що таке значення прискорень обчислень зможе дозволити контролювати температурні поля при термічній обробці металовиробу за всіма її циклами.

Висновки

Удосконалення і створення нових технологічних процесів, пов'язаних з термічною обробкою металу, вимагають значних витрат для проведення великої кількості натурних експериментів на лабораторному, дослідно-промисловому устаткуванні, а також в промислових умовах. Скорочення експериментальних досліджень та часу на їх проведення з одержанням необхідної інформації для побудови та впровадження технологічних розробок можна здійснити шляхом застосування багатопроцесорних обчислювальних систем.

Клас задач, який розглядується в даній статті, розв'язується за допомогою багатопроцесорної обчислювальної системи. У зв'язку з

відзначеним виникає проблема узгодження можливостей процесорів і мережевого інтерфейсу кластерної системи. В даній статті розв'язок зазначеної проблеми ілюструється на прикладі застосування в багатопроцесорній кластерній системі двох процесорів *Intel Pentium 4 3 GHz* і *Intel E8400 3 GHz*. На прикладі розв'язування задачі термічної обробки металовиробу виведено аналітичні співвідношення для визначення оптимального числа вузлів кластерної системи у відповідності з обраними процесорами. Виведено значення коефіцієнта узгодженості ($\lambda = f(E_p, V_p, 1 / V_c)$) можливостей обраних процесорів, мереженого інтерфейсу і величини області обчислень. Проведено аналіз такого коефіцієнта. Так, показано, що оптимальне число лез кластерної системи, що дає найбільшу його швидкодію, зменшується із збільшенням обчислювальної потужності процесорів з яких складається кластерна система. Адже мережевий обмін даних між вузлами кластерної системи тим помітніше буде гальмувати загальний процес обчислень, чим менше часу буде витрачатися безпосередньо на обчислення відповідної задачі.

Визначено оцінки ефективності кластерної системи при розв'язування задачі термічної обробки металовиробу для різного класу процесорів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. 61944 Україна, МПК C21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Установка для термічної обробки довгомірного сталевого виробу / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; власники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
2. Ivaschenko V. Information system of intelligent support of decision-making for rolling process // V. Ivaschenko, G. Shvachych, A. Sobolenko, D. Protopopov // Eastern-europeanjournal of enterprise technologies. – 2003. – № 3. – р. 4 – 9.
3. Швачич Г.Г. Математическое моделирование скоростных режимов термической обработки длинномерных изделий / Г.Г. Швачич, В.П. Колпак, М.А. Соболенко // Теория и практика металлургии. Общегосударственный научно-технический журнал. – 2007. – № 4 – 5 (59 – 60). – с. 61 – 67.
4. Швачич Г.Г. Про проблему математичного моделювання термічної обробки довгомірного сталевого виробу / Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // VII International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education”, June, 3– 10. – 2011, Varna; Bulgaria . – Proceedings. – V. 2. – P. 261 – 268.

5. Швачич Г.Г. О проблеме математического моделирования задач скоростного режима термообработки некоторого класса изделий / Г.Г. Швачич, М.А. Соболенко // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2007» [Технические науки]. – Одесса: Черноморье, 2007. – Т. 3. – с. 22 – 26.
6. Shvachych G.G. Mathematical design of much sequencing mode of heat treatment of long good / G.G. Shvachych, M.A. Sobolenko // Materi6lly IV mezin6rodn6 v6deck6 – praktick6 konference «V6deck6 prumysl evropsk6ho kontinentu» 2008». [Technick6 v6dy. Matematika. Fyzika. Modern6 informa6nn6 technologie]; Praha. – Publishing House «Education and Science» s.r.o. – Dnl 15. – 2008. – s. 62 – 65.
7. Швачич Г.Г. Багатопроекторний обчислювальний комплекс як основна ланка створення нових перспективних технологій / Г.Г. Швачич, Т.С. Хохлова, М.О. Соболенко // VI International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education”; June, 2 – 9. – 2010, Varna; Bulgaria. – Proceedings. – V. 2. – p. 615 – 625.
8. Швачич Г.Г. Суперкомпьютеры и высокопроизводительные вычисления / Г.Г. Швачич, М.А. Ткач, П.А. Щербина // Материали за 4-а международна практична конференция, «Бъдещето проблемите на световната наука». – Т. 21. Съвременни технологии на информации. София, 2008. – с. 22 – 27.
9. Иващенко В.П. Персональный вычислительный кластер для моделирования многомерных нестационарных задач / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Материалы XVI международной научно-технической конференции [Прикладные задачи математики и механики]. – Севастополь, 2008. – с. 235 – 239.
10. Швачич Г.Г. Персональный вычислительный кластер как эффективное средство в технологии проведения сложных расчетов / Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин, П.А. Щербина // Міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання». [Тези доповідей]. – Дніпродзержинськ, 2008. – с. 201 – 203.
11. Информационные системы и технологии: монография / В.П. Иващенко, Е.А. Башков, Г.Г. Швачич [и др.]. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2011. – 302 с.
12. Швачич Г.Г. Особенности конструирования параллельных вычислительных алгоритмов для ПЭВМ в задачах тепло- и массообмена / Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 3. – с. 42 – 47.
13. Иващенко В.П. Современные коммуникационные технологии в модульных многопроцессорных системах: опыт использования, исследование оценок эффективности, перспективы применения: монография / В.П. Иващенко, Е.А. Башков, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач. – Днепропетровск, 2012. – 140 с.

УДК 622.7

Н.М. Великонская, В.В. Величко, Ю.Д. Стогний, А.П. Мешалкин,
А.В. Бабенко

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ
ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ**

Аннотация. Выполнен анализ золошлаковых отходов, образующихся при сжигании энергетических углей и установлены возможные содержания Ge, Ga, Sc. Проведен термодинамический анализ поведения этих металлов в водных растворах. Определены значения pH и E существования ионных форм изучаемых элементов при различных температурах.

Ключевые слова: германий, галлий, скандий, минеральное сырье, выщелачивание, термодинамическое равновесие.

Введение. В настоящее время первичные сырьевые ресурсы достаточно истощены, а отходы добывающих и перерабатывающих предприятий ежегодно накапливаются. Разработка ресурсосберегающих технологий и использование стратегического техногенного сырья являются приоритетными и актуальными направлениями развития науки, техники и технологий. Анализ химического и фазового состава техногенных отходов предприятий позволяет рассматривать их как источник минерального сырья, содержащего целый ряд редких и рассеянных элементов (германия, галлия, скандия). Следовательно, необходимо разрабатывать новые и усовершенствовать существующие технологии, обеспечивающие комплексную переработку техногенного сырья и имеющих высокую экологическую, технико-экономическую эффективность, а так же конкурентоспособность получаемой продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Анализ последних исследований и публикаций существующих и перспективных ресурсов германия, скандия, галлия.

Германий, галлий и скандий являются редкоземельными рассеянными металлами. Германий и галлий имеют близкие геохимиче-

© Великонская Н.М., Величко В.В., Стогний Ю.Д., Мешалкин А.П., Бабенко А.В., 2013

ские свойства, в природе встречаются главным образом как изоморфные примеси в других минералах, а скандий в достаточном количестве присутствует в скандиеносных месторождениях. Присутствие всех трех металлов наблюдается в золошлаковых отходах. Извлечение редких металлов из золошлаковых отвалов, а так же из зол уноса ТЭЦ может дать, по мнению экспертов, значительный народно-хозяйственный эффект, что особенно важно в условиях нестабильной мировой экономики [1]. Для германия основным природным сырьем служат германиеносные угли и аргиллиты, которые могут содержать сотни граммов германия на тонну сырья. Значительное количество германия присутствует в цинковых, свинцовых, медно-цинковых, железных рудах, силикатных и сульфидных минералах (в виде прорастаний Ge – минералов в минералах-концентраторах). Такая рассеянность объясняется тем, что он может вести себя как халькофильный, литофильный или сидерофильный элемент [2]. Достоверных данных по общему мировому производству германия и его соединений не публикуется. По данным [3] 93 компании из 27 государств торгуют германиевым сырьем; 17 компаний из 12 стран производят германий и германийсодержащие продукты. В 2001г. общее производство германия и его соединений составило более 100 т в пересчете на Ge, далее его объемы колебались от 80 до 100 т/год. Динамика спроса и предложения на германий приведена на рисунке 1. В 2005 г. в мире было произведено 90 т германия в виде слитков и гранул и около 30 т его извлечено повторной переработкой. Следует отметить, что доля Ge, возвращенного из скрапа, достигла к настоящему времени 30-40% и наблюдается тенденция дальнейшего роста этого количества. Германий также извлекался из надсмольных вод коксохимических комбинатов. Кроме того, перспективным источником получения германия являются золошлаковые отходы.

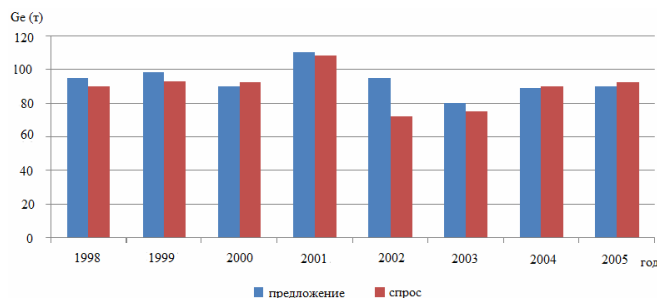


Рисунок 1 - Динамика спроса и предложения на Ge (т) в мире с 1998 по 2005 гг.

Мировые ресурсы галлия только в бокситах превышают 1 млн.т., а производство галлия составляет около 200 т в год. Доля Украины/России на общем мировом рынке составила около 13 %. Основным производителем галлия на территории Украины является Николаевский глиноземный комбинат, выпускающий до 12 тонн галлия в год [4]. Повышенное содержание галлия в золошлаковых отвалах и золах уноса углей отмечает автор [5]. Основные области применения галлия высокой чистоты: для синтеза и выращивания монокристаллов полупроводниковых соединений A_3B_5 – GaAs, GaP, GaSb и др.; военная техника (родары); в интегральных схемах (ИС) из GaAs при создании «интеллектуальных» систем управления огнем; системы обработки и передачи данных по волоконно – оптическим линиям связи; мобильной телефонии. Ценовая политика на рынке галлия определяется спросом на этот металл. Наблюдаются колебания цены на галлий в пределах 3000 долл/кг. Скандий находит применение в различных современных сферах производства: для получения сверхтвердых материалов (легирование карбида титана карбидом скандия); сверхпрочных, сверхплотных и жаростойких материалов (сплав скандия с бериллием) для строительства аэрокосмической техники, Ga – Gd – Sc-гранатов для нового поколения ЭВМ. Скандий также обладает радиационной стойкостью, что позволяет использовать его в атомных реакторах. Мировые ресурсы скандия значительные, особенно в сравнении с масштабами спроса на этот металл. В сравнительно высоких концентрациях скандий в природе практически не встречается, хотя в следовых количествах он присутствует во многих видах руд, но такого содержания в сырье недостаточно для оценки базы и мировых запасов. Скандий в форме твердых растворов присутствует в незначительных концентрациях в более чем 100 видах минералов. По данным НАН Украины, Украина по запасам скандия занимает первое место в Европе, входит в пятерку мировых лидеров. В Украине руды месторождений ильменитовых и ильменит-титаномагнетитовых руд (Стремигородское и Торчинское) содержат до 0,005% Sc_2O_3 . Месторождения, содержащие скандий в составе комплексных руд: Желтореченское, Анновское и Первомайское; скандиеносные месторождения - Малышевское и Иршанское. Вследствие низкой концентрации в сырье скандий производится исключительно как побочный продукт при переработке различных руд или извлека-

ется из ранее полученных хвостов и отходов. Промышленно целесообразно извлечение скандия из красного шлама, оставшегося после переработки бокситов. Скандий накапливается в отходах титано-магнетитового производства, перспективным источником так же являются золы углей [6]. Одним из нетрадиционных сырьевых источников производства редких металлов являются золошлаковые отходы. В углях, так же как и в рудах, отмечаются повышенные концентрации ряда ценных металлов – галлия, германия, ванадия, ниобия, титана, циркония, скандия, вольфрама и некоторых других. Следовательно, попутные полезные компоненты углей можно считать перспективной минерально-сырьевой базой ценных металлов. Особый интерес при извлечении германия, галлия и скандия представляет терригенный класс. Чаще всего этот класс определяется термином «зола», представлен в углях минеральными частицами, которые сложены также как и вмещающие уголь породы. Терригенные компоненты содержат все элементы-примеси, присутствующие в углях. Но так как минералогический состав их компонентов близок к составу нормальных осадочных пород, то содержание редких металлов в терригенном классе очень близко к соответствующим кларкам для осадочных пород. Зола терригенного класса обычно содержит около 1-3 г/т германия и 10-20 г/т галлия. В работе [7] представлены результаты исследований распределения некоторых элементов для выявления принадлежности их к органическим и минеральным компонентам углей.

Используя коэффициент распределения

$$D = C_0/C_M, \quad (1)$$

где C_0 – концентрация элемента в легкой фракции угля (плотность $<1,2$ г/см³), богатой органическими веществами, а C_M – концентрация элемента в тяжелой фракции (плотность $>1,6$ г/см³), богатой минеральными веществами, был получен ряд, показывающий связь элемента или органической массы угля ($D>1$), или с минеральными компонентами ($D>1$).

Ge	W	Ga	Be	Nb	Mo	Sc	Y	La	Zn
2,6	2,2	1,7	1,1	0,7	0,6	0,4	0,2	0,2	0,2
0,03									

Концентрирование рассматриваемых редких элементов в золах достигает 2 – 10-кратного по отношению к осадочным породам, а со-

держание их в золах выше, чем в рудах цветных металлов, что подтверждается данными таблицы 2 [7]. Обогащение углей германием, скандием и галлием - явление глобальное. Данное явление отмечается практически во всех угольных бассейнах мира.

Образующиеся при термической обработке углей золы и шлаки представляют собой концентрат рассматриваемых редких металлов. В мире ежегодно образуется около 700 млн т золошлаковых отходов. При исследовании углей различных марок Донецкого бассейна [8] получены данные по распределению в них Ge, Ga и Sc. Исследования проводились методом полуколичественного спектрального анализа. Авторами рассматривались антрациты, тощие, отощенные спекающиеся, коксующиеся, жирные, газовые и длиннопламенные угли. Анализ содержания элементов показывает, что скандий концентрируется в больших количествах в антрацитах и газовых углях, галлий в газовых, а германий в длиннопламенных углях. Данные по содержанию этих элементов в различных марках углей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Среднее содержание Ge, Ga и Sc в углях разных марок, г/т

Марка угля	Ga	Sc	Ge
Антрациты	11,5	7,9	2,2
Тощие	6,7	3,9	3,4
Жирные, коксующиеся, отощенные спекающиеся	7,1	4,7	3,9
Газовые	44,3	5,7	5,9
Длиннопламенные	8,3	5,6	11

Среднее содержание германия в углях Донбасса составляет 4 г/т, а в золе углей – 18 г/т. В коксующихся углях кондиционное среднее значение составляет 4 г/т, а в энергетических – 8,6 г/т [9]. Галлий превышает минимальные промышленные содержания (20 г/т) в газовых углях (44,6 г/т). Таким образом, угли и продукты их термической обработки (золы и шлаки), представляют интерес на предмет извлечения из них Ge, Ga и Sc.

Извлечение германия, скандия и галлия из золошлаковых отходов.

Одним из основных направлений комплексного использования минеральной части углей является производство концентратов редких металлов – германия, галлия, скандия, иттрия и других. При сжигании углей галлий в большей степени переходит в возгоны и теряется с дымовыми газами [10]. Промывание отходящих газов проводят щелочными или кислотными растворами, в результате чего галлий и германий переходят в раствор, из которого после удаления сажи и нерастворимых примесей Ga и Ge осаждают танином. В работе [14] рассматривается прямое солянокислое выщелачивание необработанного и предварительно обожженного исходного продукта и микробиологическое выщелачивание с применением тионовых бактерий. Технологии получения германиевых концентратов достаточно отработаны и базируются на пиро- и гидрометаллургическом вскрытии исходного продукта с использованием агрессивных химических реагентов, специальных условий и оборудования. Эффективность процессов вскрытия зависит от химического и фазового состава исходного сырья. Изучение фазового состава позволяет установить формы нахождения германия в сырье и макрокомпоненты, к которым они приурочены.

Фазовый анализ возгонов от сжигания энергетических углей химического состава Ge – 0,36%, Pb – 1,20%, Al – 6,67%, Si – 23,15%, Fe_{общ} – 3,33%, Zn – 1,02%, (Ca+Mg) – 8,01%, S – 2,83% позволил установить соотношение между кислоторастворимыми и кислотонерастворимыми формами германия. Комплексный подход к изучению фазового состава [15] основывался на изучении поведения германия при действии на образец различных реагентов в сочетании с нагреванием, окислением и восстановлением. Полученные результаты интерпретировались с использованием данных рентгенофазового исследования образцов. Химический анализ продуктов на содержание металлов осуществлялся с применением атомно-абсорбционной спектроскопии, германий определяли титриметрическим методом. Было установлено, что в газовую фазу в нейтральной среде и температуре 600 – 650⁰С германий переходит в виде монооксида (GeO), моносulfида (GeS) и дисulfида (GeS₂). При извлечении германия в раствор путем обработки 1-5% серной кислотой (температура 90 – 100⁰С) германий присутствует в виде оксида, диоксида (аморфной и гексагональной модификаций) и моносulfида. Рассматривался фазовый состав по данной методике фазового анализа при обработке образцов

кипящей соляной кислотой; при обработке кипящей соляной кислотой образца, предварительно окисленного перекисью водорода (или азотной кислотой, или нагреванием на воздухе при $500 - 600^{\circ}\text{C}$); при обработке кипящей соляной кислотой, быстрого нагревания до 1150°C и резко охлажденного; солянокислый фильтрат после обработки кипящей соляной кислотой, содержащей 4 – 5% KCl; водную вытяжку (для материалов, сорбционная способность которых по отношению к GeO_2 из водных растворов значительно меньше содержания в образце германия).

Данная методика фазового анализа предусматривает определение всех возможных соединений германия, содержащихся в сырье, независимо от того, достигнуты ли равновесные условия их реагирования (в равновесных условиях германий находится в сырье в виде диоксида, германатов, силикогерманатов или $(\text{Si}, \text{Ge})\text{O}_2$; в неравновесных условиях можно ожидать присутствие элементарного германия, его сульфидов или монооксида).

На основании результатов проведенных исследований [15] можно сделать вывод, что процессы, протекающие при образовании и улавливании возгонов от сжигания углей обеспечивают отсутствие в них неравновесных фаз германия и диоксида тетрагональной модификации, образование растворимой формы GeO_2 , а так же приуроченность германия к легкоискрываемым фазам макрокомпонентов. Этим объясняется извлечение германия из данного вида сырья традиционными кислотными методами с высокими показателями ($\approx 80\%$) извлечения.

Для решения задачи извлечения максимального количества германия, галлия и скандия из золошлаковых отходов был проведен термодинамический анализ возможности протекания реакций водного электролиза, а так же выщелачивания соляной и серной кислотой. Рассмотрены системы: металл – вода, металл – соляная кислота – вода, металл – серная кислота – вода при нормальных условиях. Для этого были построены диаграммы Пурбе [13]. Диаграммы Пурбе (диаграммы состояния металл – вода) используются для прогнозирования термодинамической возможности протекания процессов электрохимического окисления металлов, образования устойчивых ионных комплексов и решения ряда других вопросов. Зная температуру, pH и E можно сказать в какой форме будет находиться тот или иной ме-

талл при контакте с реагентами в водных растворах. Кроме того, важнейшим является рассмотрение вопроса о границах устойчивости воды, то есть определение области, в которой вода не разлагается на молекулярный водород и кислород.

Для системы германий – соляная кислота – вода стабильно твердыми фазами могут быть германий и GeO_2 . В жидкой фазе присутствуют анионы HGeO_3^- . В этой системе германий разлагает воду с выделением водорода (значение потенциала выше 0), при этом в интервале pH от 0 до 7,5 термодинамически вероятно существование GeO_2 (рисунок 2).

В системе германий – серная кислота – вода (рисунок 3) стабильно твердыми фазами могут быть германий, диоксид, сульфид и дисульфид германия, в жидкой фазе присутствуют анионы HGeO_3^- . В кислой среде при pH от 0 до 6 (значение потенциала от 0 до -0,5) диоксид германия является метастабильным в контакте с водным раствором и термодинамически вероятно образование сульфида и дисульфида германия. Вероятность образования GeS_2 тем выше, чем меньше значение pH. Извлечение галлия из золы уноса от сжигания энергетических углей, рассмотренное в работах [11, 12], позволило научно и практически обосновать и показать преимущество кислотных методов вскрытия золы уноса прямым солянокислотным выщелачиванием. Исходное сырье разлагается лишь под действием сильных кислот и щелочей и содержит много кремнезема, предпочтение отдавалось низкотемпературным методам вскрытия, позволяющим уже в начале технологического процесса отделить кремнезем от ценного металла и характеризующимися высокими показателями по извлечению основного компонента.

Проведенный [11] кинетический анализ протекающих реакций показал, что наибольший интерес с точки зрения кинетики растворения, частичного отделения от примесей и дальнейшего экстракционного извлечения галлия из растворов представляет собой солянокислое выщелачивание при температурах ниже 100°C .

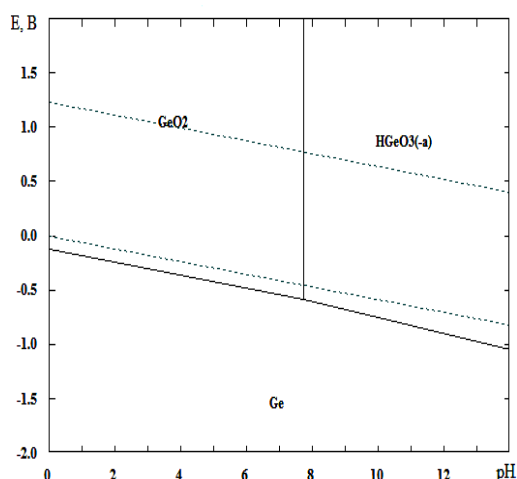


Рисунок 2 - Диаграмма E – pH для системы германий – соляная кислота – вода

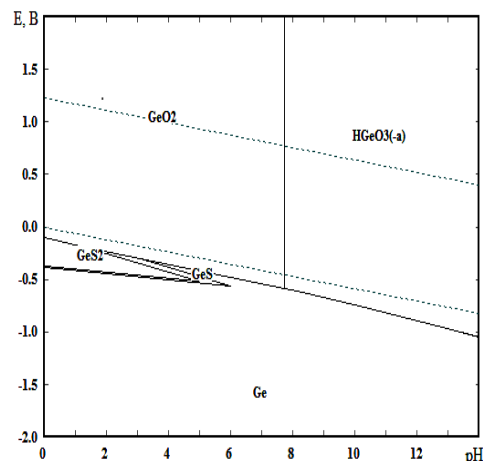
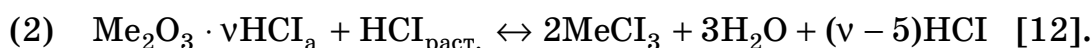


Рисунок 3 - Диаграмма E – pH для системы германий – серная кислота – вода

Характер взаимодействия зольного уноса с соляной кислотой описывается уравнениями по стадиям:



При этом на стадии (1) в растворе существует равновесие



обусловленное состоянием соляной кислоты в растворах.

В работе [12] предложены способы извлечения галлия и германия из побочных продуктов переработки каменных углей. Первый способ: возгоны промывают кислыми и щелочными растворами, эти растворы окисляют, к ним добавляют Fe(II), Fe(III), Ni, Cu или Al в виде солей в трехкратном отношении к германию и кремнию и осаждают галлий и германий при pH = 6 - 7,3, если добавлены Fe(II), Cu или Ni и при pH=4,5 - 6, если добавлены Fe(III) или Al.

Во втором варианте растворы, содержащие галлий, окисляют воздухом, озоном, перекисью водорода, KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ при pH раствора более 6. Соединения галлия и германия переходят в осадок. Этот осадок сушат, прокаливают при 400-450° С и получают золу. Зола обрабатывают HCl и Cl_2 , затем германий удаляют дистилляцией, остаток фильтруют, экстрагируют и из реэкстракта извлекают галлий.

В работе [12] использовали зольные уносы от сжигания экибастузского угля следующего состава, %: Al_2O_3 – 15,65; Fe_2O_3 – 17,24; CaO – 10,82; Mg – 4,98; SiO_2 – 28,50; Zn – 4,33; Na_2O – 2,15; K_2O – 2,27; Ga – 0,019. Зола обрабатывали соляной кислотой концентрацией 4 моль/дм³ при температуре 80 °С, продолжительности 2 ч, соотношении Т : Ж = 1 : 4. В раствор переходит до 85% галлия, кремний практически весь остается в нерастворимом остатке. Из солянокислого раствора галлий экстрагировали 0,3М раствором триалкиламина в керосине с добавлением 20% эксола. Экстракцию вели в противотоке в 6 ступенях экстрактора ящичного типа. При этом галлий практически полностью перешел в органическую фазу (99,6%). Реэкстракцию проводили раствором NaOH с pH=12,54. Извлечение галлия по предложенной схеме составило 76-77%.

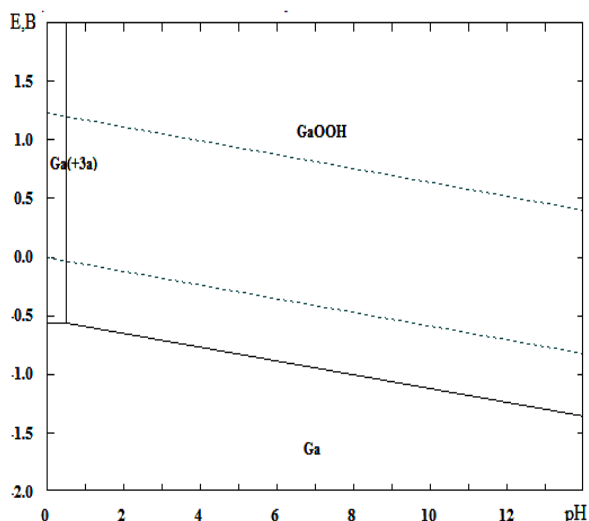


Рисунок 4 - Диаграмма Е – рН для системы галлий – соляная кислота – вода

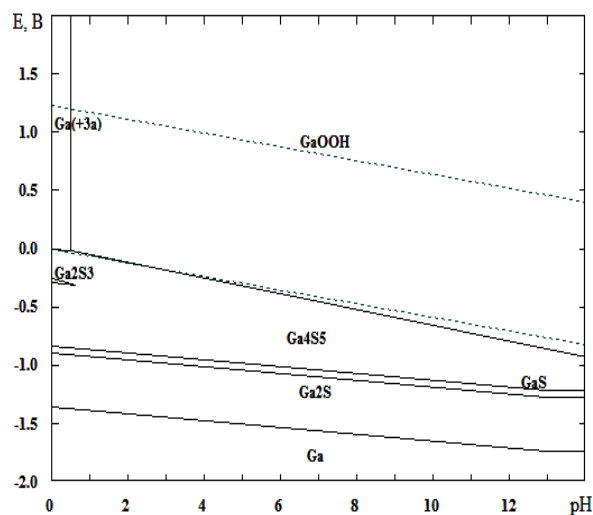


Рисунок 5 - Диаграмма Е – рН для системы галлий – серная кислота – вода

Из водных растворов так же возможно извлечение галлия путем продувки через раствор воздуха в течение 2-3 ч при 75-85⁰С (pH=8-9). Подкисление серной кислотой до pH=2-3 приводит к образованию смолистого органического осадка, содержащего основное количество галлия и германия, из которого после озонения и обработки концентрированной соляной кислотой германий извлекают в виде его тетрахлорида, а галлий экстракцией изопропиловым эфиром с последующим осаждением гидроокиси, растворением её в щелочи и электролизом [11]. Поведение галлия в водных растворах описывается диаграммами Е – рН для системы галлий – соляная кислота – во-

да (рисунки 4, 5). Стабильно твердой фазой в системе галлий – соляная кислота – вода может быть галлий при любом значении pH и потенциале ниже -0,5 В. Причем, с повышением величины pH диапазон потенциала снижается. В жидкой фазе при потенциалах выше -0,5 В и сильноокислой среде (pH от 0 до 1) в растворе высока термодинамическая вероятность существования ионов Ga^{3+} и анионы GaOOH^- . Система галлий – серная кислота – вода характеризуется твердыми фазами Ga , Ga_2S , GaS , Ga_4S_5 . В водном растворе присутствуют ионы Ga^{3+} и анионы GaOOH^- .

При изучении поведения галлия и германия в водных растворах серной и соляной кислот при температурах 50°C и 75°C существенных различий не наблюдалось, что говорит о незначительном влиянии температуры на равновесие этих систем. Так же были рассмотрены диаграммы Пурбе (рисунки 6,7) для систем скандий – кислота (соляная, серная) – вода. Данные диаграммы характеризуются существованием метастабильного состояния скандия в узком диапазоне потенциала (0,3 – 0,5 В) при значениях pH от 0 до 4,5.

Изучение поведения скандия в равновесии в водных растворах кислот (серной и соляной) при температурах 50°C и 75°C показало сужение ($T=50^\circ\text{C}$) и полное исчезновение ($T=75^\circ\text{C}$) области существования сульфат – катиона скандия $\text{Sc}(\text{SO}_4)^+$ в растворе с серной кислотой.

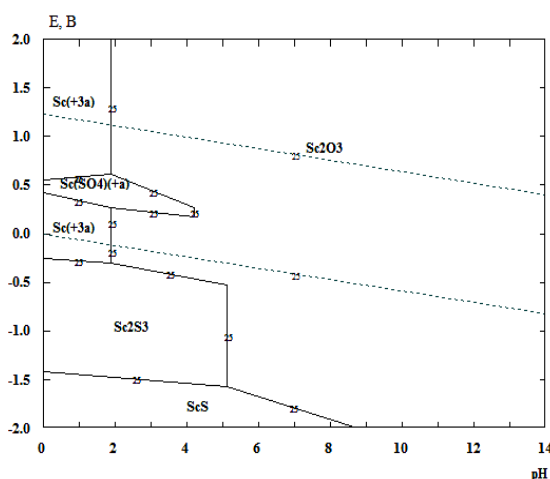


Рисунок 6 - Диаграмма E – pH для системы скандий – серная кислота – вода ($T = 25^\circ\text{C}$)

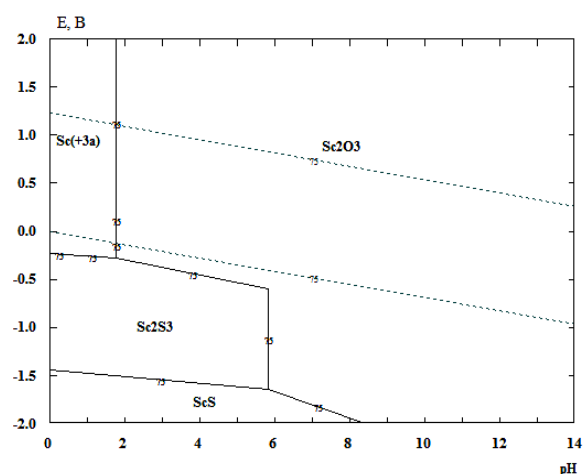


Рисунок 7 - Диаграмма E – pH для системы скандий – серная кислота – вода ($T = 75^\circ\text{C}$)

Выводы

Проведен сравнительный анализ ресурсной базы германия, галлия и скандия как в мировых масштабах, так и в масштабах Украины. Указана перспективность использования в качестве минеральных ресурсов золошлаковых отходов.

Дана оценка существующим технологиям извлечения Ge, Ga, Sc из известных минеральных источников. Рассмотрена возможность применения данных технологий для извлечения необходимых элементов из золошлаковых отходов.

Предложена новая комплексная схема получения Ge, Ga, Sc из отходов терригенного класса углей, которая подтверждается расчетами поведения данных металлов в водных растворах при различных значениях pH, E и температуры.

Рассмотрена термодинамика последовательных стадий извлечения галлия, германия и скандия при взаимодействии зольного уноса с соляной и серной кислотами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салихов В.А. Суммарный народно-хозяйственный эффект от извлечения ценных металлов из золоотвалов энергетических предприятий Кемеровской области / Вестник Томского государственного университета // Экономика. – 2010. - №2(10). - С. 69 – 75.
2. Трегубенко В.В. Извлечение галлия и германия из железорудного сырья и продуктов его передела / Утилизация отходов горно-металлургического производства / В.В. Трегубенко, Л.Б. Зубков, Л.Г. Матюшев // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 15(11) 2003. - №11. – С. 67 – 70.
3. Наумов А.В. Рынок германия: ошибки и перспективы. / А.В. Наумов // Изв. вузов. Цв. металлургия. - 2008. - №2. - С. 39 – 46.
4. Наумов А.В. Перспективы рынка галлия в 2007 – 2010 гг. / А.В. Наумов // Изв. вузов. Цв. металлургия. - 2007. - №4. - С. 3 – 8.
5. Салихов В.А. Перспективы извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отвалов энергетических предприятий Кемеровской области. // Вестник Томского государственного университета. - 2009. - №327. - С. 163 – 168. (<http://sun.tsu.ru/mminfo/000063105/327/image/327-163.pdf>)
6. Цветмет Украины: скандий – фундамент новой металлургии «UGMK.INFO (Украина)». 2 марта 2011 – 13:51 <http://www.new.metaldaily.ru/news/news51691.html>

7. Пашков Г.Л. Золой природных углей – нетрадиционный сырьевой источник редких элементов. // Соросовский образовательный журнал. - 2001. - №11. - С. 67 – 72.
8. Шубин Ю.П. Полезные элементы-примеси в углях Донбасса разных марок. // Наукові праці УкрНДМІ НАН України . – 2008. - №2. - С. 192 – 198.
9. Юдович Я.З. Германий в Углях / Я.З. Юдович, М.П. Кетрис. - Сыктывкар, 2004. – 216 с.
10. Иванова Р.В. Химия и технология галлия. – М. : Металлургия, 1973. – 247с.
11. Абишева З.С. Кислотно-экстракционная технология извлечения галлия из золы-уноса от сжигания энергетических углей / З.С. Абишева, И.А. Блайда, Е.И. Пономарева // Цветные металлы. - 1994. - №3. - С. 36-38.
12. Абишева З.С. Пути извлечения галлия из золы-уноса от сжигания энергетических углей / З.С.Абишева, И.А. Блайда, Е.И. Пономарева // Цветные металлы. -1994. - №2. - С.42-44.
13. Бебешко Г.И. Использование диаграмм Пурбе для прогнозирования оптимальных условий разделения и определения галогенов в природных объектах. / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2008. - Том 74. - № 6. – С. 20 – 25.
14. Блайда И.А. Извлечение германия из промышленных отходов с применением гидрометаллургических и микробиологических методов. / И.А. Блайда, Л.И. Слюсаренко, Т.В. Васильева, Н.Ю. Васильева, О.И. Джамбек, А.А. Джамбек, В.А. Иваница // Экология и ресурсосбережение. – 2008. - №5. – С.50 – 54.
15. Блайда И.А. Оценка фазового состава германийсодержащего сырья и выбор методов его вскрытия / И.А. Блайда, Л.И. Слюсаренко, И.Н. Барба, Ф.В. Макордей // Вестник ОНУ. - Том 12. - выпуск 2. - 2007. – С. 135 – 142.

В.В. Перескока, Л.В. Камкина, Р.В. Анкудинов, Я.В. Стомба,
Н.А. Колбин

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ
«МЕТАЛЛ-ШЛАК-ГАЗ» ПРИ ПОЛУЧЕНИИ
НИЗКОКРЕМНИСТОГО ФЕРРОСИЛИЦИЯ**

Аннотация. Исследованы вторичные материалы (хвосты обогащения и вскрышная порода) как перспективные материалы для получения низкокремнистого ферросилиция. С использованием программ для термодинамического моделирование обосновано поведения элементов и их соединений в восстановительных условиях для получения данного продукта.

Ключевые слова: низкокремнистый ферросилиций, распределение элементов, термодинамика, фазовое равновесие.

Введение. Интерес к вторичному сырью и проблеме ресурсосбережения приводит к активному исследованию отвалов и хранилищ техногенных материалов, разработке технологий их подготовки и переработки. Для этого необходимы комплексный анализ вторичных материалов, возможность их подготовки и использования, теоретическая оценка предполагаемого способа переработки.

Постановка задачи исследования. На долю черной металлургии приходится около 3,6 млрд.т. твердых отходов промышленного производства, а на протяжении последних десяти-двадцати лет активно проводятся исследования техногенных месторождений Криворожского бассейна, т.к. в его отвалах содержится, по разным оценкам, от 10 до 13 млрд. т. вскрышных пород, а в хвостохранилищах – от 4 до 6 млрд.т. отходов обогащения бедных железных руд [1]. По результатам работы авторов [2], вовлечение в переработку вторичных железосодержащих хвостов и вскрышных пород дает возможность получения дополнительного высоко-качественного гематитового концентрата и железо-кремний-содержащего полупродукта для металлургической промышленности.

© Перескока В.В., Камкина Л.В., Анкудинов Р.В., Стомба Я.В., Колбин Н.А., 2013

Исследования проведенные в работах [1-4] показали, что лежащие железосодержащие хвосты, как горно - обогатительного так и металлургического производства являются высококачественным минеральным сырьем.

Целью исследования является теоретическое обоснование возможности получения заданного продукта – низкокремнистого ферросилиция с использованием в качестве кремнийсодержащего компонента – вскрышной породы, железосодержащего – магнетитового концентрата хвостов обогащения и коксика в качестве восстановителя.

Основная часть

Для разработки технологии использования техногенных материалов необходимы данные об их химическом, минерало-гическом и гранулометрическом составах. Гранулометрический и химический составы отходов обогащения железных руд, полученных на горно-обогатительных комбинатах по данным [4], представлены в табл.1 - 2.

Таблица 1

Гранулометрический состав хвостов обогащения руд [4]

Класс, мм	1-3	0,8- 1	0,6- 0,8	0,4- 0,6	0,3- 0,4	0,2- 0,3	0,14- 0,2	0,1- 0,14	0,07 -0,14	0,07
Вы- ход, %	1,0 - 7,0	0,7 - 17,0	0,6- 17, 0	2,7- 18, 0	1,6- 18,0	7,0- 16, 0	5,0- 24,0	4,5- 16,0	4,0- 16,0	28,0- 83,0

Таблица 2

Химический состав отходов обогащения железных руд, % [4]

Fe _{общ} ,	9,8 – 15,2	MnO	0,03 – 0,2
FeO	1,22 – 12,6	P	0,007 – 0,177
Fe ₂ O ₃	6,49 – 14,69	S	0,022 – 0,184
SiO ₂	62,76 – 74,65	TiO ₂	0,05 – 0,057
CaO	0,7 – 3,67	CO ₂	3,15 – 7,89
MgO	2,47 – 5,54	Na ₂ O+K ₂ O	0,3 – 1,18
Al ₂ O ₃	0,81 – 2,8	п.п.п.	2,42 – 11,3

Насыпная плотность вскрышной породы составляет 3,5 - 3,7 г/см³, содержание Fe_{общ} составляет 50-55% и кремнезема 15-25% (табл. 3).

Химический состав вскрышных пород, %

№ п/п	Fe _{общ.}	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	P
1.	50,10	71,07	0,45	0,67	0,55	0,64	26,04	0,011	0,027
2.	56,87	80,74	0,45	0,41	0,58	2,01	13,83	0,045	0,049
3.	52,41	74,11	0,68	0,54	0,52	0,57	22,52	0,017	0,026

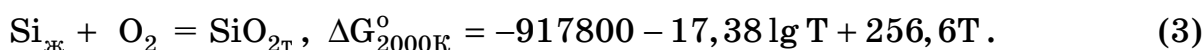
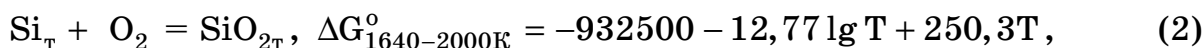
Результаты исследований химического, фазового и гранулометрического состава хвостов обогащения и вскрышных пород показали, что они состоят из зерен рудных и нерудных минералов и их сростков. Основной железосодержащий минерал в них - гематит, а нерудные минералы железистых кварцитов представлены кварцем и силикатами железа. Такой состав отходов позволяет сделать допущение о возможности их применения в металлургическом переделе в качестве железо- и кремнийсодержащих составляющих шихтовых материалов.

Термодинамический анализ системы «Fe-Si-O-C»

При использовании в шихте для сплавов кремния железной руды или железистых кварцитов опережают развитие процесса плавления шихты, а не восстановление. Действующая технология выплавки ферросилиция предусматривает использование в шихте кварцита, кокса и металлического железа (стружки). Целесообразно введение в шихту губчатого железа, получаемым прямым восстановлением [9]. Общее окускование измельченных материалов шихты для выплавки ферросилиция может менять кинетические условия протекания реакций общего восстановления окислов железа и кремния и соотношение звеньев в известных схемах механизма реакций восстановления.

В системе «Si – O» известные химические соединения SiO₂, Si₂O₃, Si₃O₄ и SiO. При нормальных условиях стабильным являются SiO₂ и SiO. Зависимости изменения энергии Гиббса реакций образования SiO₂ при взаимодействия кремния в разном агрегатном состоянии с кислородом от температуры описывается выражением (Дж/моль) [11]:

$$\text{Si}_T + \text{O}_2 = \text{SiO}_{2T}, \Delta G_{298-1640\text{K}}^0 = -883500 - 12,56 \lg T + 219,7T, \quad (1)$$



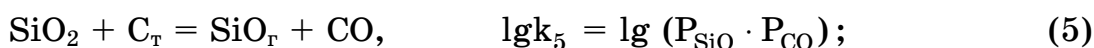
Схематично процесс получения ферросилиция может быть описан реакцией



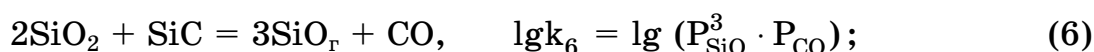
где a_{Si} - активность кремния в насыщенном углеродом растворе Fe-Si- $\text{C}_{\text{нас}}$. Изменение энергии Гиббса последней реакции при постоянной температуре и давлении определяется активностью кремния в сплаве, которая, в свою очередь является функцией концентрации кремния в ферросилиции.

Для анализа фазовых превращений в системе «Fe-Si-O-C» учитывают такие реакции:

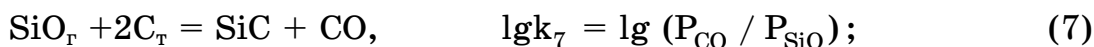
восстановление SiO_2 углеродом до $\text{SiO}_{\text{газ}}$:



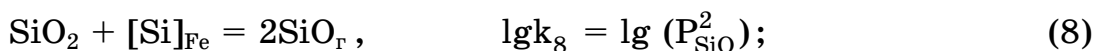
восстановление SiO_2 карбидом кремния до $\text{SiO}_{\text{газ}}$:



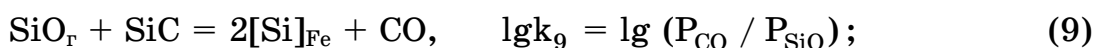
восстановление SiO_2 углеродом до SiC:



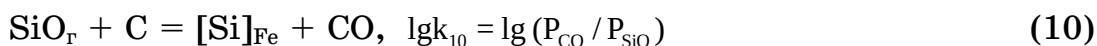
взаимодействие SiO_2 и C $[\text{Si}]_{\text{Fe}}$ с образованием SiO_T :



взаимодействие SiO_T с SiC_T с получением Si, растворенного в железе:



восстановление Si с SiO_T углеродом с получением кремния, растворенного в железе:



Известно, что оксиды железа легко восстанавливаются как углеродом и его монооксидом, так и окисью кремния, кремнием и его карбидом. Восстановление оксидов железа и его силикатов завершается при $T \ll 1500 \text{ K}$, что свидетельствует о их нестойкости. Практически невозможно и взаимодействие железа с SiO_2 . При температурах производства стойкие только растворы кремния в железе и силициды FeSi и Fe_2Si_5 . Силициды железа легкоплавкие и в жидком состоянии полностью взаиморастворимы. Физико-химические свойства

таких расплавов меняются сравнительно монотонно и зависят только от концентрации кремния и температуры. Во всем диапазоне концентраций их можно характеризовать активностью кремния.

Обсуждение основных результатов исследования.

В электрических печах выплавляют ферросилиций разных марок с содержанием кремния 18 – 50 и 60 – 95%. Выплавляют ферросилиций из шихты рудной, в состав которой входят кварциты, которые содержат больше 95% SiO_2 , меньше 0,02% P_2O_5 и как можно меньшее количество шлакообразующих примесей (глинозема). В качестве восстановителя при выплавке 45- и 75%-го ферросилиция применяют металлургический коксик кусками размером 10 – 25 мм [8], который должен удовлетворять следующим требованиям: содержание серы <2,0 %, золы <10,5 %; влаги <10 %.

Так как после переработки вскрышных пород, железистых кварцитов и других отходов производств получаем концентрат с высоким содержанием кремния и железа, целесообразно изучить возможность их использования для получения ферросилиция. Авторы работы [10] использовали для получения ферросилиция хвосты обогащения железистых кварцитов Ново-Криворожского горно-обогатительного комбината. Применение хвостов обогащения железистых кварцитов при выплавке ферросилиция позволяет, благодаря отсутствию в шихте стальной стружки, получать в сплаве в два-три раза меньше вредных для сплава примесей (марганца, хрома, титана, меди и др.), что очень важно для повышения качества электротехнических и других сталей.

Проведена оценка возможности получения низкремнистого ферросилиция на основании расчета материального баланса плавки и программ термодинамического моделирования «Оракул» и HSC Chemistry 5.11. При исследовании использовали вскрышную породу и магнетитовый концентрат хвостов обогащения Криворожского бассейна, химический состав указан в таблице 4.

Проанализирована возможность образования карбидов и силицидов в железо-углеродистых системах. В системах SiO_2 - Fe_3C - C, SiO - Fe_3C - C, SiO_2 - Fe_3C - FeO - C вероятность начала образования силицидов железа меняется в следующей последовательности $\text{Fe}_3\text{Si} > \text{Fe}_5\text{Si}_3 > \text{FeSi} > \text{Si}$ (рис.1-2). Найденная закономерность объясняется

увеличением в силициде частиц более легковосстановимого Fe по сравнению с Si.

Таблица 4

Химический состав исходных материалов, %

Соединения	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	P	S
Концентрат хвостов обогащения	58.11	28.22	8.94	-	0.68	1.68	-	-	-
Вскрышная порода	48.7	2.2	46.1	0.47	-	0.15	0.075	P ₂ O ₅ 0.066	0.016

Проведена оценка получения низкокремнистого ферросилиция с использованием вскрышных пород и концентрата из хвостов обогащения на основе расчета материального баланса по методики [12]. Показано, что для получения 1т сплава, состава 10% Si; 1,2% C, 82% Fe; 0,15% P; 0,2 % Al; 3% Mn, необходимо 568,9 кг вскрышной породы, 1137,8 кг концентрата хвостов обогащения и 578,25кг восстановителя – коксика.

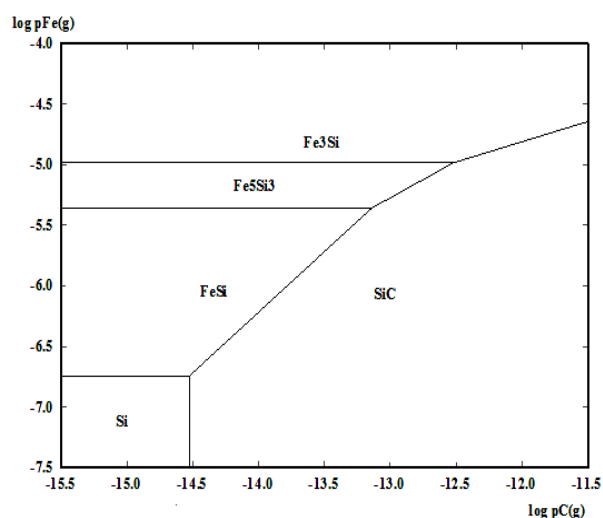


Рисунок 1 – Диаграмма фазовой стабильности соединений системы Si – Fe - C при температуре 1500°C

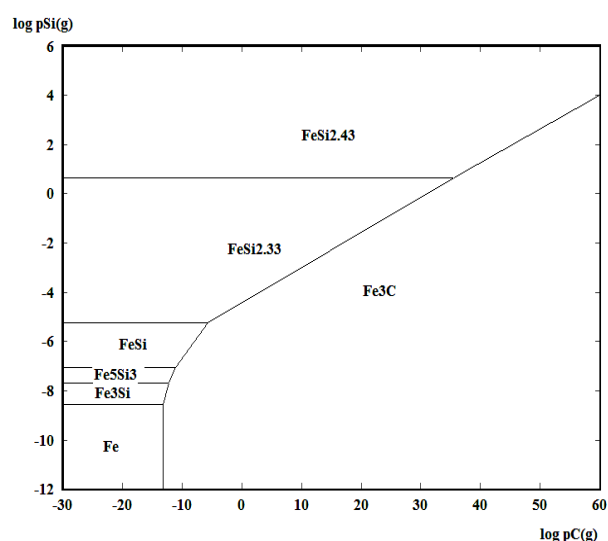


Рисунок 2 – Диаграмма фазовой стабильности соединений системы Si – Fe - C при температуре 1500°C

Проведены расчеты равновесия системы «металл-шлак-газ». В табл. 5-6 приведены расчетные равновесные значения активности компонентов.

Таблица 5

Равновесное значение активностей элементов металлической системы

$\lg a_i$ T, К	Fe	Al	Si	Mn	Mg	Ca	P	S	C	O
1300	-0.25	-4.51	-1.97	-3.84	-5.52	-8.59	0.315	-3.12	1.194	-5.44
1400	-0.25	-3.53	-1.77	-3.81	-4.31	-6.96	0.197	-4.00	1.029	-5.28
1500	-0.25	-3.12	-1.60	-3.80	-3.40	-5.75	0.079	-4.77	0.874	-5.12
1600	-0.24	-2.99	-1.46	-3.79	-2.68	-4.80	-0.02	-5.45	0.739	-4.98
1700	-0.24	-2.92	-1.32	-3.78	-2.07	-4.06	-0.12	-6.04	0.621	-4.86

С использованием программы HSC Chemistry 5.11 установлены возможные соединения в равновесном состоянии.

Таблица 6

Равновесное значение активностей соединений шлаковой системы

$\lg a_i$ T, К	FeO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MnO	MgO	CaO	P ₂ O ₅
1300	-4.91	-2.64	-1.92	-4.66	-0.82	-2.62	-27.6
1400	-4.99	-2.83	-2.78	-5.06	-0.42	-1.83	-27.6
1500	-5.05	-3.89	-3.53	-5.40	-0.23	-1.35	-27.5
1600	-5.11	-5.31	-4.21	-5.71	-0.14	-1.07	-27.5
1700	-5.16	-6.70	-4.83	-6.0	-0.11	-0.93	-27.5

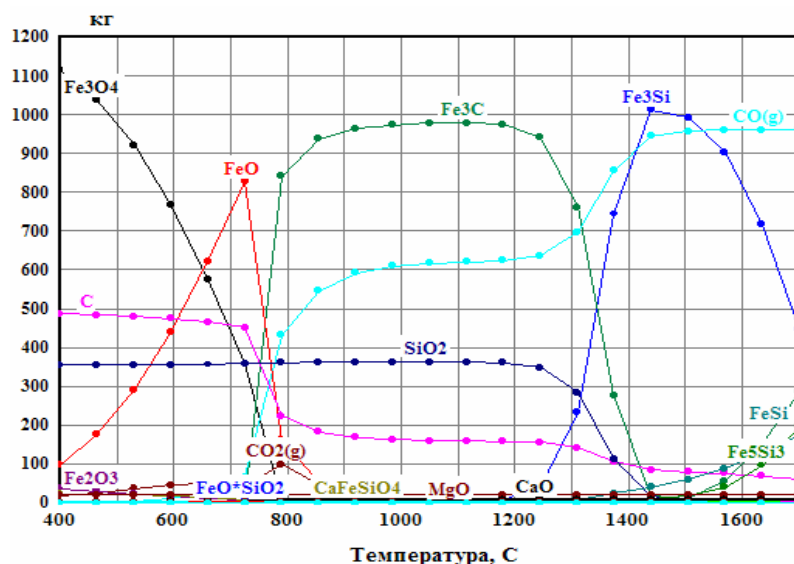


Рисунок 3 – Равновесное распределение компонентов системы «металл-шлак-газ» при получении низкремнистого ферросилиция

При исследовании процессов совместного восстановления вскрышной породы и магнетитового концентрата «хвостов» обогаще-

ния в интервале температур 1000 - 1800°C выделены области температур, соответствующие поэтапному развитию процесса получения ферросилиция. Первые частицы сплава образуются при 1200°C и при дальнейшем увеличении температуры идет перераспределение элементов железа и кремния в соединениях Fe_3Si – FeSi – Fe_5Si_3 , в шлаковую фазу переходят образованные при процессе восстановления сложные соединения (CaFeSiO_4 , FeSiO_3).

Выводы: Анализ химического, фазового и гранулометрического состава хвостов обогащения и вскрышных пород показал, что основным железосодержащим минералом является гематит, нерудные минералы представлены кварцем и силикатами железа. Значительное содержание железа в хвостах обогащения позволяет получить концентрат с массовой долей железа – от 66,51 до 67,46%, а содержащийся во вскрышной породе SiO_2 в пределах 15-45% представляет интерес для возврата в производство в качестве кремнийсодержащего компонента шихты при получения ферросилиция.

Анализ поведения элеменов и соединений выбранных вторичных материалов на основании рассчитанных равновесных значений активностей и равновесного распределения компонентов при восстановлении углеродом в интервале температур 1200 - 1800°C, подтверждает целесообразность использования вскрышной породы и хвостов обогащения в качестве заменителей кварцита и железной стружки при получении низкокремнистого ферросилиция. При этом показано, что полученный сплав содержит минимальное количество примесей, но следует отметить при этом несколько увеличенный расход коксика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко С.В. Комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов горно-обогатительных комбинатов Украины //С.В. Бондаренко, В.В. Моисеенко, Г.Н.Бондаренко// Вопросы химии и химической технологии.- 2003.- Вып.№5. - С. 29-32.
2. Долгова Т.І. До вирішення проблеми переробки лежалих хвостів хвостосховищ Кривбасу // Т.І. Долгова, Н.А. Сметана // Науковий вісник НГУ.- № 7-8.- 2010. – С.92-96.
3. Євтехов В.Д. Розробка технології збагачення залізовміщуючих відходів Валявкінського техногенного родовища // В.Д. Євтехов, К.В. Ніколаєнко, В.В. Філенко, І.О. Білеко // Вісник КТУ, Технічні науки. - вип. 25. – 2010.

4. Бондаренко Г.Н. Использование отходов горно-обогатительных комбинатов Кривбасса для получения железорудных концентратов и строительных материалов // Г.Н. Бондаренко, Т.Н. Галич, Л.П. Скородумова // Комплексное использование руд черных металлов. Тематический отраслевой сборник.-1975.- С.80-83.
5. Євтехів В.Д. Техногенні поклади Кривбасу як комплексна мінеральна сировина / Техногенно - екологічна безпека регіонів як умова сталого розвитку України // В.Д. Євтехів, І.А. Федорова// Матеріали другої науково-практичної конференції Львів: Товариство “Знання” України.- 2002.- С. 29-30.
6. Евтехов Е.В. Влияние условий складирования хвостов на качество техногенных железных руд Криворожского бассейна // Е.В. Евтехов // Геолого - мінералог. Вісник КТУ. - 2004. - №1(11). - С. 31-39.
7. Барышников В.Г. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии. Т. 2. Шлаки, шламы, отходы обогащения железных и марганцевых руд, отходы коксохимической промышленности, железный купорос// В.Г. Барышников, А.М.Горелов, Г.И.Папков и др.. — Москва: Экономика, 1986. — 344 с.
8. Евтехов В.Д. Минералого-технологическое обоснование повторной переработки тонкозернистых отходов обогащения гематитовых руд Криворожского бассейна / В.Д. Евтехов, С.Э. Киринос, Т.В. Беспояско // Геолого-мінералогічний вісник. — 2006. — № 1 (15). С. 61-65.
9. Гасик М. И. Теория и технология производства ферросплавов: Учебник для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев, Б. И. Емлин. — М: Металлургия, 1988. — 784 с.
10. Чайченко А.А. Особенности восстановления оксидов железа при выплавке ферросилиция на брикетах из железистых кварцитов и газового угля / А.А. Чайченко и др. // Сталь. — 1974. — №12 — С. 1099 — 1103.
11. Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция / М.И. Гасик, В.Л. Зубов - Днепропетровск: Системные технологии, 2002. - 704 с.
12. Еднерал Ф.П., Филиппов А.Ф. Расчеты по электрометаллургии стали и ферросплавов. — М.: — Металлургиздат. — 1963. — 230 с.

В.З. Куцова, М.И. Тимошина, О.А. Носко, Г.Г. Тимошина
**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И ЛЕГИРОВАНИЯ НА
СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ**

Аннотация. Проведен расчет энергии связи и зарядовой плотности кремния при легировании двумя примесями. Показано влияние термообработки на микроструктуру и микротвердость легированного кремния. Разработаны способы термической обработки подложек кремния, что позволило повысить выход годной продукции.

Ключевые слова: полупроводниковый кремний, энергия связи, легирование, термическая обработка, микроструктура, свойства.

Уровень развития современной полупроводниковой электроники тесно связан с достижениями в технологии полупроводниковых материалов. История технологии полупроводникового кремния характеризуется непрерывным стремлением к совершенству. Это вызвано тем, что совершенство кристаллов, однородность свойств по объему не только влияет на рабочие характеристики приборов и микросхем, но и определяет эффективность их производства. С увеличением степени интеграции свойства отдельного элемента все более определяются локальными свойствами кристаллической подложки. Кремний является основным материалом для изготовления интегральных схем высокой эффективности. Возможность совершенствования полупроводниковых приборов заложена в повышении качества подложек, характеристики которых находятся в прямой зависимости от свойств монокристаллов и изготавливаемых из них пластин. Задача получения монокристаллов с равномерным распределением электрических свойств, пониженным содержанием остаточных фоновых примесей и структурных дефектов весьма актуальна. Таким образом, один из главных путей улучшения качества изделия полупроводниковой микроэлектроники - это улучшение качества исходных кристаллов кремния.

Термостабильность свойств кристаллов кремния относится к основным параметрам качества полупроводникового материала.

Именно термостабильность свойств кристаллов кремния определяет устойчивость к деградации параметров микроэлектронных приборов при повышенных температурах и расширяет области их применения. Термостабильность кристаллов кремния имеет также существенное значение при изготовлении микроэлектронных приборов, поскольку в технологических процессах кристалл подвергается воздействию высоких температур, которые часто необратимо ухудшают свойства исходных кристаллов.

Актуальность проблемы обусловлена с одной стороны необходимостью выяснения закономерностей в процессах деградации электрофизических свойств кремния и управления ими, с другой - необходимостью создания полупроводниковых приборов на основе кремния со стабильными параметрами.

Известно, что процессы изготовления и эксплуатации полупроводниковых приборов сопровождаются различными термическими и радиационными воздействиями, что приводит к изменениям электрофизических свойств полупроводниковых материалов и приборов на их основе. Тем не менее, к полученным полупроводниковым приборам предъявляются жесткие требования по стабильности их параметров в различных радиационных и термических условиях работы.

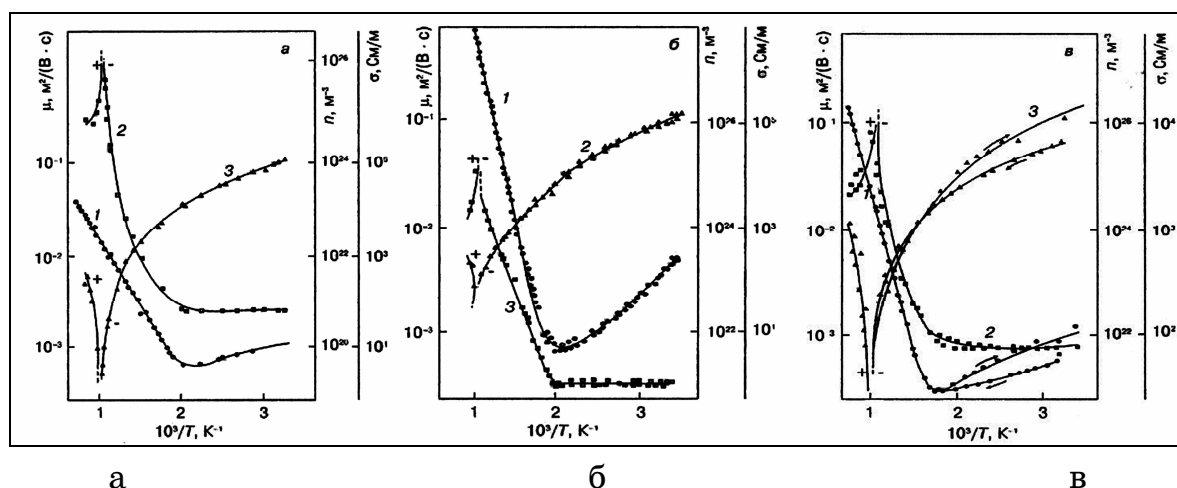
Перспективными путями управления процессами деградации электрофизических параметров кремния являются его термообработка и легирование редкоземельными элементами (РЗЭ) и переходными металлами. Следует подчеркнуть, что РЗЭ после введения в монокристалл не проявляют электрической активности, то есть не образуют электрически активных комплексов.

Основная цель работы заключается в комплексном исследовании электрофизических характеристик и особенностей структуры, выборе легирующих добавок и разработке способов термообработки промышленного кремния для повышения термостабильности полупроводниковых приборов на его основе.

Исследования электрофизических параметров проводили на монокристаллах кремния, полученных методами Cz (КЭФ-0,7, КЭФ-4,5, КЭФ-7), Fz, n- и p-типа проводимости, а также нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ) в интервале температур 300–1200К как при нагреве, так и при охлаждении со скоростью ~5 К/мин. Результаты исследования температурных зависимостей элек-

тропроводности, холловской концентрации и подвижности носителей заряда показали следующее. У монокристаллов марки КЭФ (рисунок 1, а) в области температуры $\sim 1000\text{K}$ происходит смена знака постоянной Холла. В образцах с наибольшей концентрацией фосфора обнаружен гистерезис проводимости и подвижности носителей заряда (рисунок 1, в).

Монокристаллы, выращенные методом Fz, отличаются высокой степенью химической чистоты, имеют максимальное удельное сопротивление (более $30\text{ КОМ}\cdot\text{см}$), что определяется присутствием бора в концентрации не более $2\cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$. Содержание же компенсирующих донорных примесей не превышает 10^{11} см^{-3} для кремния n-типа проводимости. На рисунке 2, а и б приведены зависимости электрофизических параметров от обратной температуры на образцах Fz кремния n-типа проводимости. На полученных зависимостях также наблюдается смена знака проводимости эффекта Холла.



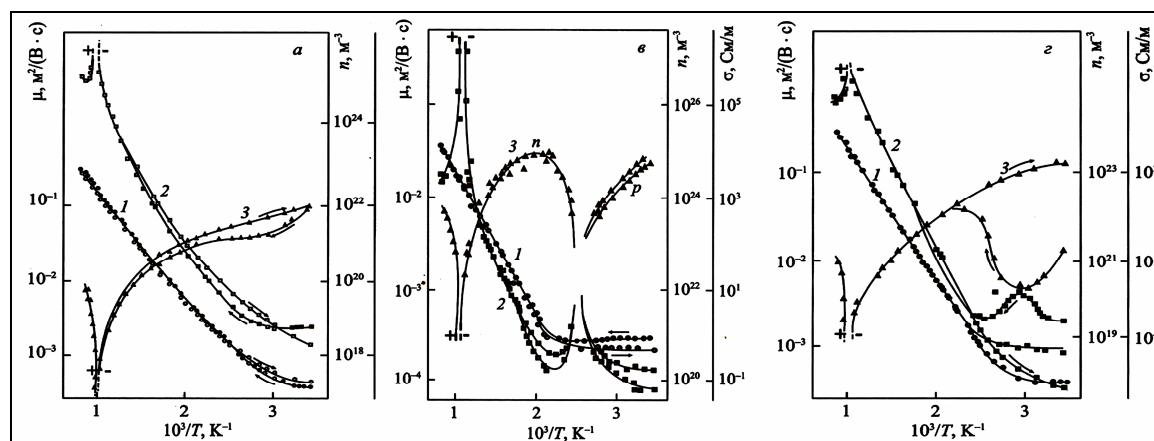
а – КЭФ-7,5; б – КЭФ-4,5; в – КЭФ-0,7

Рисунок 1 - Температурные зависимости электропроводности σ (1), холловской концентрации носителей заряда n (2), подвижности μ (3) кремния, выращенного методом Чохральского

На образцах кремния Fz p-типа проводимости (рисунок 2, б) в процессе нагрева дважды наблюдается смена знака эффекта Холла: при температурах вблизи 373K и при 973K . Образцы отличаются не термостабильностью всех исследуемых параметров.

На рисунке 2, в – приведены результаты исследования образцов кремния, полученного методом НТЛ. Также видна смена знака эффекта Холла при той же температуре, как и у остальных образцов.

Нагрев образца приводит к сильной искаженности кривых концентрации носителей заряда и подвижности при температурах, близких к комнатной. Охлаждение образца приводит к плавному увеличению указанных параметров. На кривых электропроводности (нагрев – охлаждение) наблюдается гистерезис при температурах ниже 423 К.



а – кремний n-типа проводимости, б – р-типа проводимости, в – НТЛ
Рисунок 2 - Температурные зависимости электропроводности (1), холловской концентрации носителей заряда (2), подвижности (3) высокоомного кремния, полученного методом бестигельной зонной плавки

Проведение для всех образцов последующих циклов (нагрев – охлаждение) приводит к стабилизации исследуемых параметров.

Установлено, что изменение знака проводимости наблюдается для всех исследуемых образцов кремния независимо от методов выращивания, поэтому обнаруженный эффект - инверсия знака проводимости при температурах ~1000К – можно отнести к фундаментальным особенностям поведения кремния при высоких температурах.

По-видимому, изменение знака проводимости, наблюдаемое в монокристаллах кремния, связано со структурными превращениями, которые приводят к появлению полей упругих напряжений, которые, в свою очередь, перераспределяют концентрации точечных дефектов. Например, приводят к уменьшению концентрации вакансий и соответственно к изменению типа проводимости [1].

Анализ результатов исследования влияния термообработки на концентрацию глубоких уровней и время жизни неосновных носителей заряда в высокоомном кремнии n-типа проводимости с удельным сопротивлением более 2 КОм·см, полученным методом Fz, свидетель-

существует о том, что исходный кремний имеет невысокое время жизни $\tau=15\text{мкс}$.

Глубокие центры, обнаруженные в верхней половине запрещенной зоны (ловушки электронов E) имеют весьма низкую концентрацию $<5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и с учетом их сечения захвата не могут быть причиной низкого τ .

Проведенные термообработки с медленным программируемым охлаждением со скоростью $v_{\text{охл.}} \leq 0,5 \text{ К/мин}$ приводят к образованию дополнительных глубоких уровней с концентрацией не превышающей $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, при этом время жизни дырок τ_p почти не меняется. Увеличение скорости охлаждения (до 5-20 К в мин.) после высокотемпературной обработки при 1473К приводит к резкому падению τ_p до 1мкс и возрастанию концентрации глубоких центров вплоть до 10^{13} см^{-3} .

Pin-структуры двух видов: изготовленные по эпитаксиальной технологии и диффузионные, дали сходные результаты по времени жизни и эффективной концентрации ионизированных центров в i-области. Доминирующей ловушкой в эпитаксиальных pin-структурах является электронная ловушка $E=0,23 \text{ эВ}$, в диффузионных $E=0,55 \text{ эВ}$ и несколько дырочных ловушек.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать заключение, что кремний Fz содержит, по всей видимости, примеси, которые при высокотемпературной обработке могут переходить в электрически активное состояние. Об этом свидетельствует сильная зависимость τ_p и концентрации глубоких уровней от скорости охлаждения.

В работе также проанализирован выбор легирующих добавок, повышающих термическую и радиационную стойкость кремния, показано влияние термической обработки на структуру и свойства легированного монокристаллического кремния.

Для обоснования выбора легирующих добавок использовали принцип металлохимии комплексного легирования, основой которого является система неполяризованных ионных радиусов [2], что позволило провести расчет энергии межатомного взаимодействия кремния при растворении в нем как различных простых веществ [3, 4], так и одновременно нескольких примесей.

Представляет интерес комплексное легирование одновременно несколькими примесями. На рис. 3 приведены зависимости энергии связи (D) от межатомных расстояний (d) в кремнии, рассчитанные по уравнениям:

$$\rho_{\ell_A} [e/\text{\AA}] = \frac{0,434}{R_A [A] z_A \operatorname{tg} \alpha_A} \quad (1)$$

$$D = 85 \rho_{\ell_A} - 310 \quad (2)$$

где: ρ_{ℓ_A} – зарядовая плотность; z_A – эффективный заряд атома, легирующий добавки; R_A – радиусы атомов; α_A – угол наклона зависимости $\lg R_A = f(n)$, n – число отделяемых электронов.

На рис. 4 показана взаимосвязь между энергией связи и зарядовой плотностью для межатомного расстояния $d=0,14$ нм.

Показано, что наиболее высокими значениями энергии связи отличаются группы веществ Au-Na, PЗЭ-Na, W-Na и Nb-Na, причем по сравнению с простыми веществами, например с Au, энергия связи увеличивается в 1,5 раза, причем значительное увеличение энергии связи наблюдается при двойном легировании с Na. Проведены исследования микроструктуры, микротвердости, параметров решетки, коэффициента термического расширения Cz – Si, легированного примесями B, Sn, B+Sn, B+Mo, Ge, Er, Ho, Na, W, Na +W; Na вводился методом ионной имплантации, остальные примеси в процессе выращивания.

На дилатограммах Cz – Si, легированного примесями B, Sn, B+Sn, B+Mo, Ge, Er, Ho с концентрациями до 10^{16} см⁻³, наблюдаются температурные интервалы отклонения коэффициента термического расширения (α) от монотонной зависимости.

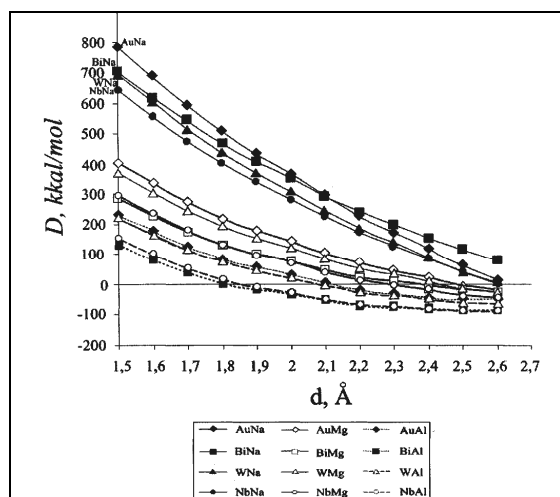


Рисунок 3 - Зависимость энергии связи D от межплоскостного расстояния d при двойном легировании кремни

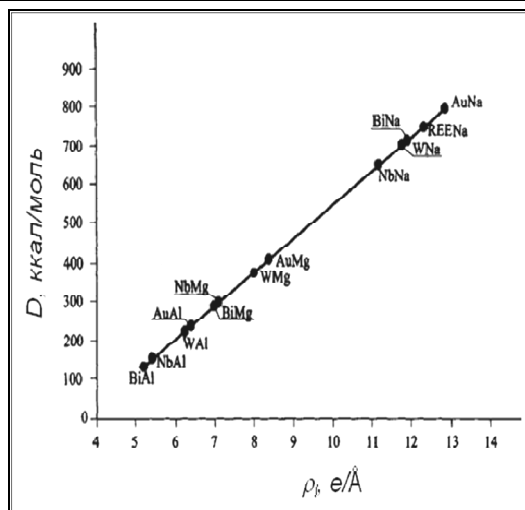


Рисунок 4 - Зависимость энергии связи D от зарядовой плотности ρ_{ℓ_A} при двойном легировании кремния

Показано, что полученные кривые качественно не отличаются. При этом с ростом энергии связи атомов кремния наблюдается сдвиг этих отклонений в область более высоких температур, таблица 1.

Таблица 1

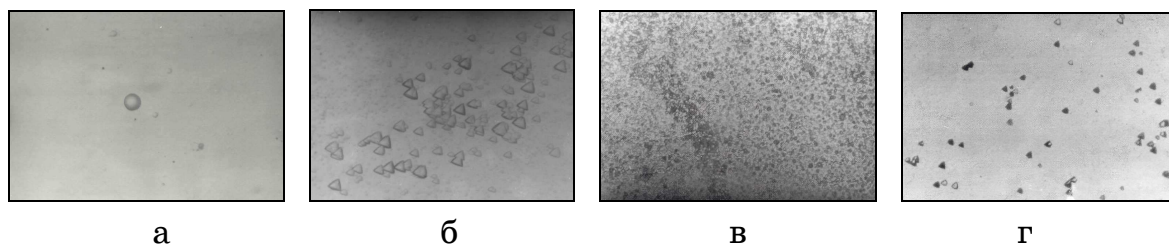
Температуры максимального отклонения от монотонной зависимости коэффициента термического расширения и соответствующие им его значения

Si/ лег. эл.	Температура/коэффициент термического расширения К/ $\alpha \cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$			Si/ лег. эл.	Температура / коэффициент термического расширения К/ $\alpha \cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$		
Si	623/4,	973/4,4	1173/5,	Si+B+Sn	723/4,5	973/4.3	-
Si+B	673/3,	1023/4,	1173/4,	S+B+Mo	823/4,2	973/4,0	1123/4
Si+Sn	673/4,	973/3,7	1173/4,	Si+Er	773/3.9	1023/4.	-
Si+Ge	773/4,	-	1123/4,	Si+Ho	653/4.3	-	1123/4

Полученные данные температурных исследований микроструктуры, микротвердости (H_m), рентгеноструктурного анализа указанных образцов подтверждают результаты дилатометрических измерений.

Проведены исследования влияния легирования Dy (с концентрацией $\sim 1016 \text{ см}^{-3}$) и нейтронного легирования на структуру и свойства Fz-Si, n-типа проводимости, $\rho=3 \text{ КОм}\cdot\text{см}$.

Микроструктурный анализ показал, что дефекты в исходном кремнии БЗП имеют типичный характер типа впадин, по классификации поверхностных дефектов пластин кремния, приведенной в стандарте ASTM F154. На образцах Si<Dy> те же дефекты, но большие по размерам и их концентрация меньше, рис. 5, а. Наблюдаемые дефекты относятся к вакансионным ямкам. После термообработки при $T=1423\text{K}$ в течение 45 мин. они «растворились» и возникли дислокации рис. 5, б. На Si НТЛ, рис. 5, в наблюдается очень большое скопление дефектов, по всей видимости, мелкие комплексы точечных дефектов. После отжига точечные дефекты и комплексы (растворяются) и возникают дислокации 5, г.



а – легированный диспрозием;
б – легированный диспрозием после термообработки;
в – кремний НТЛ; г – кремний НТЛ после термообработки;

Рисунок 5 - Микрофотографии поверхности кремния,
увеличения, $\times 200$

Основные выводы. Проведен расчет энергии связи и зарядовой плотности кремния при легировании двумя примесями. Установлено, что натрий во взаимодействии с редкоземельными и переходными металлами способствует увеличению энергии связи в кремнии.

Показано влияние термообработки на микроструктуру и микротвердость кремния, легированного B, Sn, Ge, Hf, Zr, B+Mo, Na, W, Na+W. Установлено, что нагрев до 1273K и последующее охлаждение до комнатной температуры кремния, полученного методом Чохральского, легированного B, Hf, Zr, B+Mo, Na, приводит к уменьшению количества двойников и концентрации дислокаций.

Исследована температурная зависимость коэффициента термического расширения монокристаллического кремния, легированного

разными элементами (В, Sn, Ge, В+Mo, В+Sn). Установлен немонотонный характер температурной зависимости коэффициента термического расширения, что свидетельствует о структурных превращениях при высоких температурах.

Используя полученные экспериментальные данные, провели расчет энергий активации процессов распада и постоянных времени распада в системах на основе кремния (Si-Al, Si-Na, Si-Au-Gd, Si-Mn-Ge, Si-W-Na). Установлено, что атомы гадолиния стабилизируют состояние атомов золота в кремнии; атомы вольфрама - атомов натрия; атомы германия – атомов марганца, что в конечном итоге приводит к замедлению распада твердых растворов на основе кремния в указанных выше системах.

Для изготовления транзисторов разработаны способы термической обработки подложек кремния, что позволило повысить выход годной продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таран Ю.Н., Глазов В.М., Регель А.Р., Куцова В.З., Кольцов В.Б., Тимошина Г.Г., Узлов К.И., Фалькевич Э.С.. Структурные превращения при нагреве монокристаллов кремния. // ФТП, 1991, т.25, в.4. с.588-595.
2. Приходько Э.В. Металлохимия комплексного легирования.// М., Металлургия, 1983, 184 с.
3. Глазов В.М., Тимошина Г.Г., Михайлова М.С. Принципы легирования кремния для повышения его термостабильности. //ДАН, 1996, № 3, т. 347, с. 352-355.
4. Глазов В.М., Земсков В.С. «Физико-химические основы легирования полупроводников» М., Наука, 1967, 372 с.

М.О. Матвеева Б.В. Климович, В.В. Климович, Е.А. Дворникова
**СИМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ЛИТЬЕ
ЧУГУНОВ С ЗАДАНЫМ КОМПЛЕКСОМ СВОЙСТВ**

Аннотация. В настоящих исследованиях подтверждена целесообразность применения математического планирования эксперимента для повышения экономической и научной эффективности исследований по определению влияния отдельных легирующих элементов и их сочетаний на комплекс механических и эксплуатационных свойств отливок. Для изучения комплексного влияния Cr и Ti на структуру и свойства чугунов применено симплексное планирование эксперимента, в результате установлено поле оптимальных содержаний легирующего комплекса для отливок, сочетающих заданные твердость, плотность, коррозионную и жаростойкость. Разработанные составы сплавов рекомендуется использовать для деталей пресс-форм стекловырабатывающих машин, элементов плунжерных пар машин для литья под давлением, деталей коксохимического оборудования и др.

Возрастающие требования к повышению работоспособности машин, снижению их удельной металлоемкости ставят перед литейным производством задачи по совершенствованию техники и технологии производства литейных сплавов.

Анализ состояния вопроса. Отдельные химические элементы изменяют свойства железо-углеродистых сплавов уже при чрезвычайно низких концентрациях, оказывая иногда определяющую роль в формировании механических и эксплуатационных свойств отливок. К таким элементам относится титан, который практически всегда находится в чугуне и даже в небольших количествах оказывает влияние на структуру и свойства отливок [1, 2, 3]. Одним из наиболее распространенных легирующих элементов для чугунов является хром [1], он определяет микроструктуру [4], физические и эксплуатационные характеристики отливок [5, 6, 7]. Поэтому важно установить его оптимальное количество для получения определенных функциональных свойств.

Целесообразно для повышения экономической и научной эффективности исследований по определению влияния отдельных легирующих элементов и их разных сочетаний на комплекс характеристик изделий применять математическое планирование эксперимента.

Цель исследований. Применение математического планирования эксперимента для оптимизации комплексного влияния легирования хромом и титаном на чугун для отливок, сочетающих определенный уровень механических и эксплуатационных свойств.

Применительно к экспериментальному чугуну были поставлены и решены следующие задачи: исследована микротвердость структурных составляющих, твердость, плотность, жаро- и коррозионная стойкость отливок; определено оптимальное содержание хрома и титана в исследуемом чугуне.

Для изучения комплексного влияния Cr и Ti на структуру и свойства чугунов применено симплексное планирование эксперимента, которое объединяет в себе процедуры изучения объекта и поиска оптимума. Для этого использовали специальный план эксперимента в виде симплекса (план Шеффе). Симплекс в k -мерном факторном пространстве представляет собой k -мерную замкнутую геометрическую фигуру, образованную $k + 1$ вершинами, которые соединены между собой прямыми линиями. При этом координаты вершин симплекса являются значениями факторов в отдельных опытах. В двухфакторном пространстве – это симплекс треугольник (рис. 1).

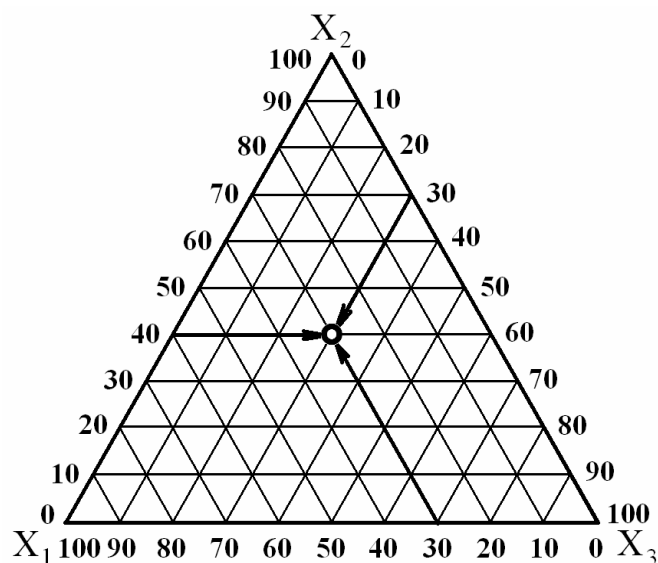


Рисунок 1 – Ключ симплексной решетки

Коды исследуемых сплавов в соответствии со схемой (рис. 1), их элементарный состав и коды функций откликов приведены в табл. 1, 2, 3.

Таблица 1

Кодовое обозначение опытных сплавов

Номер сплава	Условное обозначение	Состав					
		в натуральном масштабе (% , по массе)			в кодированном масштабе		
		Cr	Ti	Fe	X ₁	X ₂	X ₃
1	X ₁	100	-	-	1	0	0
2	X ₂	-	100	-	0	1	0
3	X ₃	-	-	100	0	0	1
4	X ₁₂	50	50	-	1/2	1/2	0
5	X ₁₃	50	-	50	1/2	0	1/2
6	X ₂₃	-	50	50	0	1/2	1/2
7	X ₁₂₃	33,333	33,333	33,333	1/3	1/3	1/3

Таблица 2

Кодовое обозначение опытных сплавов

Номер сплава	Условное обозначение	Содержание элемента в сплаве, % (по массе)		
		Cr	Ti	Fe
1	X ₁	1,17	0,01	92,805
2	X ₂	5,63	0,01	88,134
3	X ₃	5,03	0,2	88,723
4	X ₁₂	3,4	0,01	90,756
5	X ₁₃	3,1	0,105	90,66
6	X ₂₃	5,33	0,105	88,58
7	X ₁₂₃	3,94	0,07	89,996

По плану Шеффе возможно построение модели следующего вида:

$$Y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \beta_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + \beta_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (1)$$

где Y – свойство материала;

β – коэффициент регрессии;

x – количество материала в сплаве.

Таблица 3

Коды функций отклика

Функция отклика	Код
Микротвердость перлита, МПа (H ₅₀ П)	Y ₄
Микротвердость цементита, МПа (H ₅₀ Ц)	Y ₅
Твердость, HRC	Y ₆
Плотность, кг/м ³ (ρ)	Y ₇
Максимальная плотность тока в активной области, А/м ² (i _{max})	Y ₈
Жаростойкость, г/м ² час (G)	Y ₉

Коэффициенты регрессии определяли по формулам:

$$\beta_1 = \xi_1, \quad (2)$$

$$\beta_{ij} = 4 \cdot \xi_{ij} - 2 \cdot \xi_i - 2 \cdot \xi_j, \quad (3)$$

$$\beta_{123} = 27 \cdot \xi_{123} - 12 \cdot (\xi_{12} + \xi_{13} + \xi_{23}) + 3 \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3), \quad (4)$$

где ξ_i , ξ_j , ξ_{123} – результаты опытов в точках симплексных решёток.

По результатам экспериментальных исследований рассчитаны коэффициенты регрессии и реализованы симплексные решетки, где поля нежелательных значений параметров – затемнены. Выделение на симплексных решётках полей с недопустимым уровнем свойств, с последующим наложением полученных изображений на одну решётку, позволило определить поле оптимальных содержаний элементов в разрабатываемом составе чугуна.

Изменение микротвердости цементита и перлита показано на рис. 2, а, б соответственно. С увеличением содержания хрома и титана микротвердость обоих структурных составляющих увеличивалась. В исследуемом легирующем комплексе хром в основном находится в цементите и упрочняет его, в то время как соединения титана распределяются в перлите и способствуют повышению его твердости. Достоверность полученных данных подтверждают результаты измерения твердости (рис. 2, в). Твердость слитков экспериментальных чугунов возрастает с увеличением количества легирующего комплекса Cr + Ti.

Зависимость плотности экспериментальных чугунов от количества легирующего комплекса Cr + Ti представлена на рис. 3, а. Расположение изолиний показывает, что с увеличением количества хрома и титана плотность экспериментальных отливок увеличивалась.

Коррозионную стойкость сплавов исследовали по их электрохимическому поведению потенциодинамическим методом в среде 5 %-ного раствора серной кислоты. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением количества титана токи в активной области растворения уменьшаются. Так, при 0,01 % титана и 5,63 % хрома ток составляет 528 А/м², а при 0,20 % титана и 5,03 % хрома – 376 А/м². В сплавах с большим содержанием титана ток в активной области уменьшается, соответственно они будут иметь лучшую коррозионную стойкость. Снижение тока в активной области с увеличением

содержания хрома и титана подтверждают результаты, показанные на рис. 3, б.

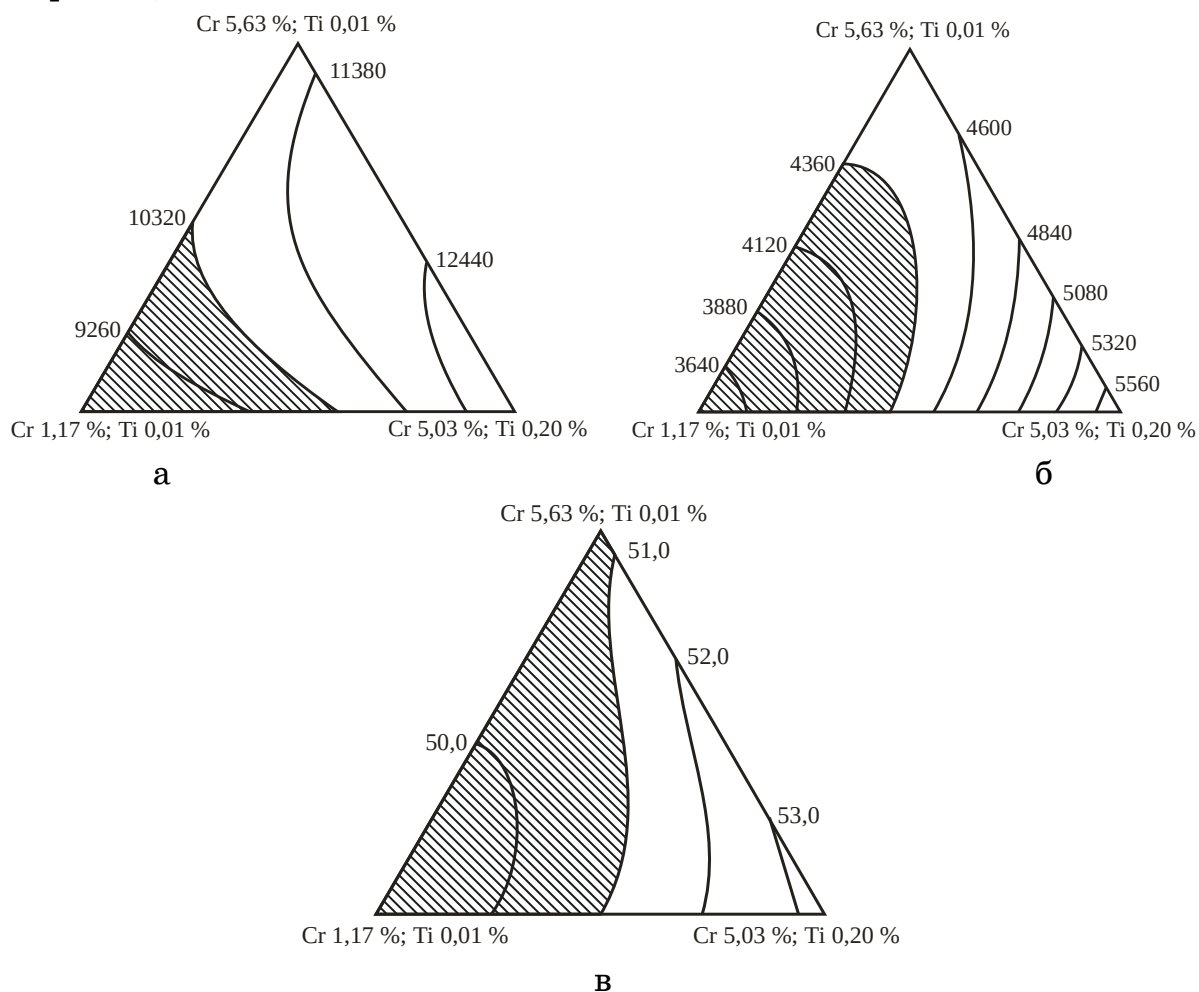


Рисунок 2 – Микротвердость (МПа) цементита (а), перлита (б), твердость (HRC) отливок (в)

Установлено, что на процессы коррозии в опытных чугунах влияют количество цементита, размеры эвтектических колоний и плотность сплава. Получено еще одно подтверждение того, что наличие титана на уровне примеси отрицательно сказывается на свойствах чугуна.

По результатам проведенных исследований наиболее устойчивыми к коррозии были сплавы с большим содержанием титана, о чем свидетельствуют более низкие токи в активной области. При этом увеличение количества хрома (в исследуемых пределах) ухудшает уровень стойкости не столь выражено.

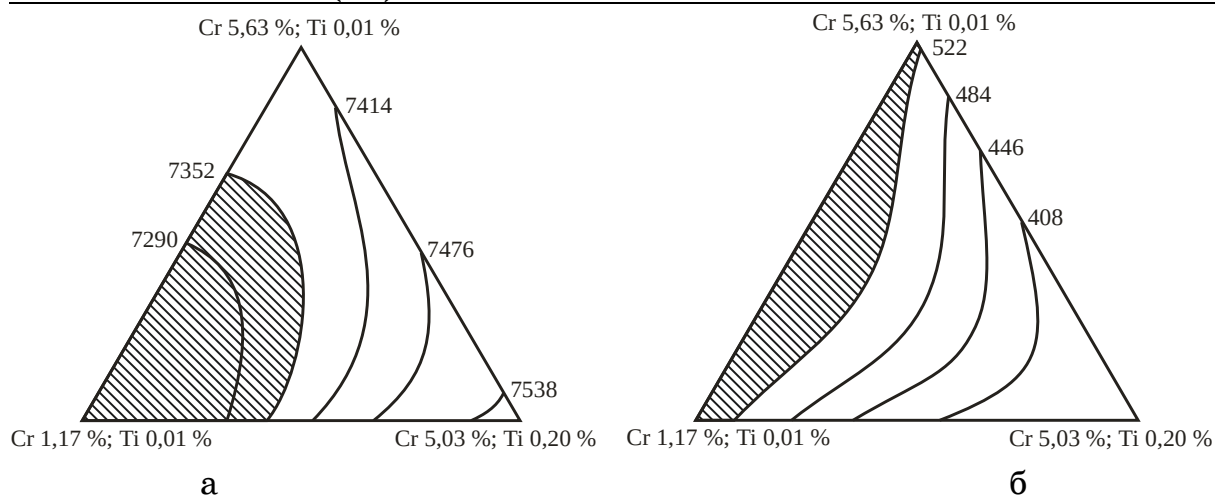


Рисунок 3 – Плотность экспериментальных чугунов, кг/м^3 (а); максимальная плотность анодного тока растворения чугуна в активной области, А/м^2 (б)

Согласно ГОСТ достаточной считается жаростойкость при приросте массы не более $0,5 \text{ г/м}^2 \text{ час}$ при определенной температуре испытаний в течение 150 часов. При температуре испытаний 500°C все экспериментальные сплавы имели достаточную жаростойкость $0,10 - 0,32 \text{ г/м}^2 \cdot \text{час}$. С повышением температуры до 600°C жаростойкость отливок с содержанием $0,01\%$ титана становилась неудовлетворительной $0,59 - 0,68 \text{ г/м}^2 \cdot \text{час}$. Удовлетворительную жаростойкость при 700°C $0,45 - 0,50 \text{ г/м}^2 \cdot \text{час}$ имели отливки с возрастающим содержанием хрома и титана. Лучшим был сплав с $5,03\%$ Cr и $0,20\%$ Ti, он же сохранил достаточную жаростойкость и при температуре испытаний 800°C . При температуре 900°C все сплавы потеряли жаростойкость. Результаты анализа жаростойкости при всех температурах испытаний показаны на рис. 4.

Жаростойкость экспериментальных чугунов тем лучше, чем выше в них содержание хрома и титана. С увеличением количества титана свыше $0,1\%$ он перестает отрицательно влиять на этот показатель.

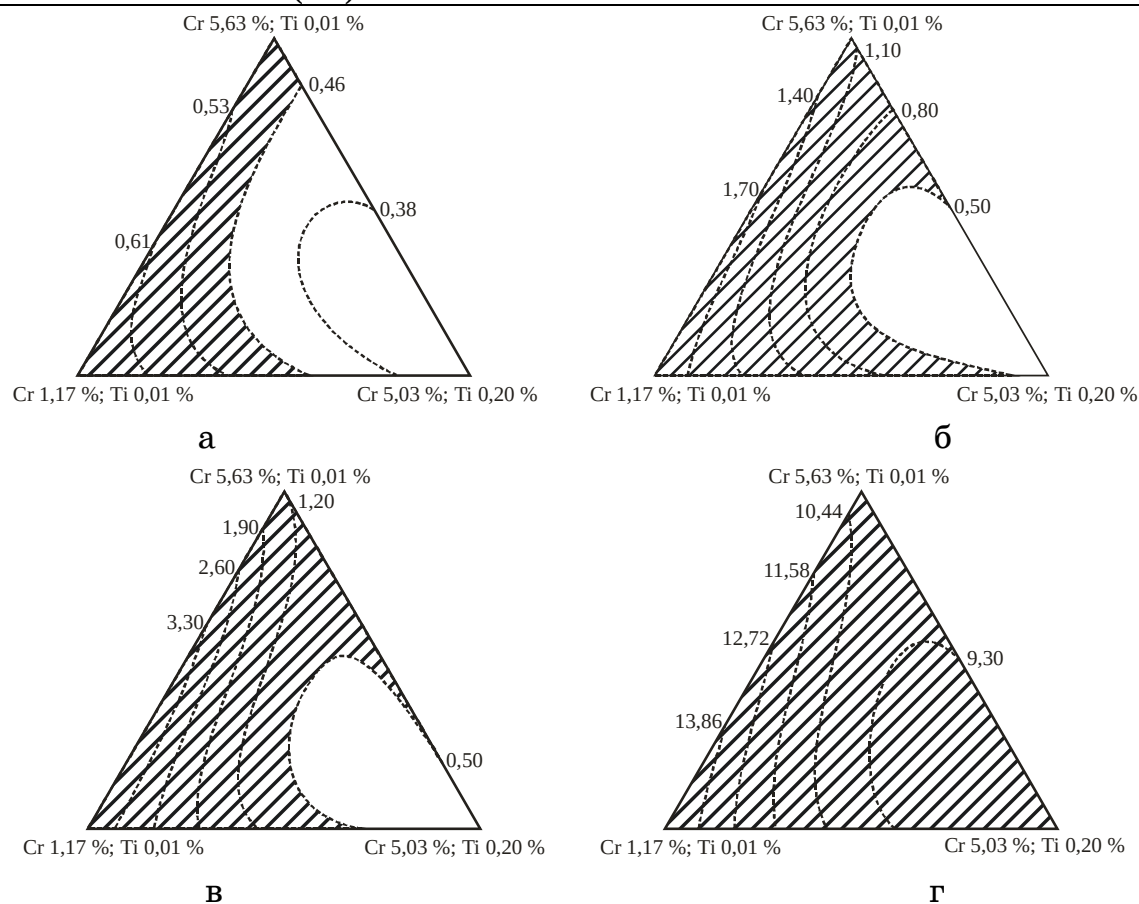


Рисунок 4 - Жаростойкость экспериментальных отливок при температурах 600 °C (а), 700 °C (б), 800 °C (в), 900 °C (г)

Результат совмещения симплексных решеток представлен на рис. 5, где поле оптимальных содержаний осталось незатемненным. Исходя из того, что с увеличением температуры испытаний на жаростойкость оптимальная область содержаний исследуемых элементов сужается и стремится к точке X_3 , рационально принять следующее содержание хрома и титана (% , по массе): 3,20 – 5,03 Cr; 0,014 – 0,20 Ti.

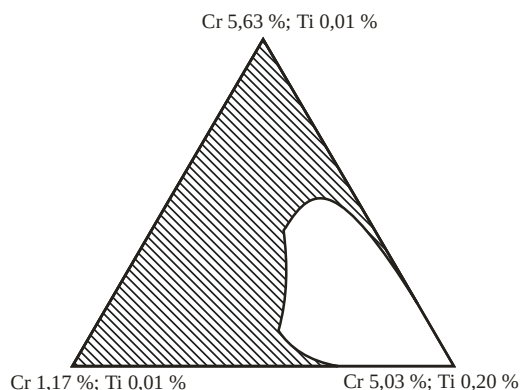


Рисунок 5 - Совмещенная симплексная решетка

Выводы

В результате симплексной оптимизации по плану Шеффе установлено поле оптимальных содержаний хрома 3,20...5,03 % и титана 0,014...0,20 % в легирующем комплексе для отливок, сочетающих твердость не менее 51,0 HRC, микротвердость цементита и перлита выше 10320 МПа и 4360 МПа соответственно, плотность отливок не ниже 7352 кг/м³, максимальную плотность тока в активной области при коррозионных испытаниях в серной кислоте менее 522 А/м², жаростойкость при приросте массы не более 0,5 г/(м² час) и температурах испытаний 500 – 800 °С в течение 150 часов.

Разработанные составы сплавов рекомендуется использовать для деталей пресс-форм стекловырабатывающих машин, элементов плунжерных пар машин для литья под давлением, деталей коксохимического оборудования и др. Так, изготовление поршней плунжерных пар машин литья под давлением вместо серого чугуна из экспериментального повысит срок их службы в 2,0 – 4,0 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чугун / [Шерман А.Д., Жуков А.А., Абдуллаев Е.В. и др.]; под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова.-1-е изд.- М. Металлургия, 1991.- 576 с.
2. Матвеева М.О. Влияние титана на формирование структуры чугуна/ М.О.Матвеева, О.М.Шаповалова // Металознавство та термічна обробка металів. – 2008. - № 1. – С. 65-75.
3. Матвеева М.О. Исследование коррозионной стойкости чугунов экономнолегированных титаном/ М.О.Матвеева, Е.Э.Чигиринец, А.А.Макарова // Вісник Донбаської Державної Машинобудівної Академії. – 2009. - № 1. – С.203-207.
4. Матвеева М. О. Влияние содержания хрома на морфологию структуры перлита / М. О. Матвеева, О. М. Шаповалова // Теория и практика металлургии. – 2005. – № 3. – С. 52–58.
5. Матвеева М. О. Влияние хрома на плотность белого и половинчатого чугуна / М. О. Матвеева, О. М. Шаповалова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 5. – С. 37–41.
6. Матвеева М. О. Разработка чугунов с повышенными эксплуатационными свойствами / М. О. Матвеева // Литейное производство. – 2007. – № 9. – С. 2–5.
7. Матвеева М. О. Исследование коррозионной стойкости чугунов экономнолегированных хромом / М. О. Матвеева, Е. Э. Чигиринец // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 5. – С. 52.

Н.В. Сарафаннікова

ПЛАНУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

Анотація. Розвиток виробництва молочної продукції із значним збільшенням асортименту готової продукції технологічної модернізації підприємств, підвищення науково-технічного забезпечення і застосування сучасних систем керування виробництвом. Для забезпечення ефективного виробництва молочної продукції необхідно з ряду задач вирішувати задачу оптимізації планування технічного завдання виробництва. Планування технічного завдання представлено задачею лінійного програмування і розв'язано за допомогою симплекс-методу. Оптимізація проводилась за параметром максимального прибутку підприємства.

Ключові слова: підприємство, виробництво молочної продукції; планування технічного завдання, функціонал цілі, управління виробництвом, параметри готової продукції.

Постановка проблеми

За останні десятиріччя спостерігається розвиток виробництва молочної продукції зі значним збільшенням асортименту виробів. Значне відставання вітчизняних технологій харчової промисловості від рівня іноземних виробництв призводить до неможливості випуску якісної конкурентноспроможної продукції через недостатній рівень техніки і технологій, підвищену енергоємність та трудомісткість виробництва і його незадовільну організацію. Підвищення якості продукції і її конкурентноспроможності може бути досягнуто шляхом технологічної модернізації підприємств, підвищенням рівня науково-технічного та кадрового забезпечення галузі, а також застосуванням сучасних систем керування виробництвом – інтегрованих автоматизованих систем управління. Тому постає гостра необхідність переглянути концепцію організації та управління виробництвом молочної продукції в цілому [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для забезпечення ефективного виробництва молочної продукції необхідно розв'язувати такі задачі:

- послідовність аналізування і прогнозування процесів;
- підвищення ефективності виробництва задля скорочення витрат;
- забезпечення стабільності показників якості продукції;
- прийняття оптимальних рішень на основі аналізу даних;
- організації управління корпоративними джерелами інформації [4-5].

Отож управління виробництвом молочної продукції є задачею комбінованою з рядом пунктів: задача планування виробництвом (оптимальний розмір партії); задача розподілу ресурсів (по окремим типам обладнання); календарне планування (послідовність виконання операцій виробництва). Перераховані три задачі неможливо виконувати ізольовано одну від одної, тому їх розв'язують відповідно послідовно одну за одною, причому оптимальний параметр завдання вибирається на базі оптимального параметра попередньої задачі. Але така послідовна оптимізація окремих підзадач не завжди призводить до оптимального розв'язання задачі в цілому. Тому для розв'язання комбінованих задач необхідно використовувати відповідні стандартні методи оптимізації, які дадуть можливість наблизитися до шуканого рішення комбінованої задачі як найближче, а остаточне рішення буде прийматися на верхньому рівні управління керівником підприємства.

Постановка завдання

Необхідно здійснити оптимізацію випуску готової продукції із заздалегідь відомими параметрами якості для здобуття більшого прибутку підприємством.

Основна частина

Технологія виробництва молочної продукції є розгалуженою і складною системою. Для раціонального планування технічного завдання виробництва необхідно дослідити технологічний процес. Більшість операцій на сучасних молочних заводах цілком механізовано. Функціональну схему виробництва найбільш поширеної молочної продукції (питне молоко, кефір і сметана) відображено на рисунку 1.

Метою планування оптимального складу молочної продукції є встановлення функціональної залежності між властивостями сировини і властивостями готових виробів. Адже необхідно зважати на те, що споживчі властивості молочної продукції різного призначення мають певні розходження. Технологія процесу змішування повинна здійснюватися на підставі науково обґрунтованих методів, а розрахунків складу продукції має виконуватися окремо для кожного виду продукції.

Оптимальний склад продукції і планування технічного завдання доцільно проводити методами лінійного програмування [6].

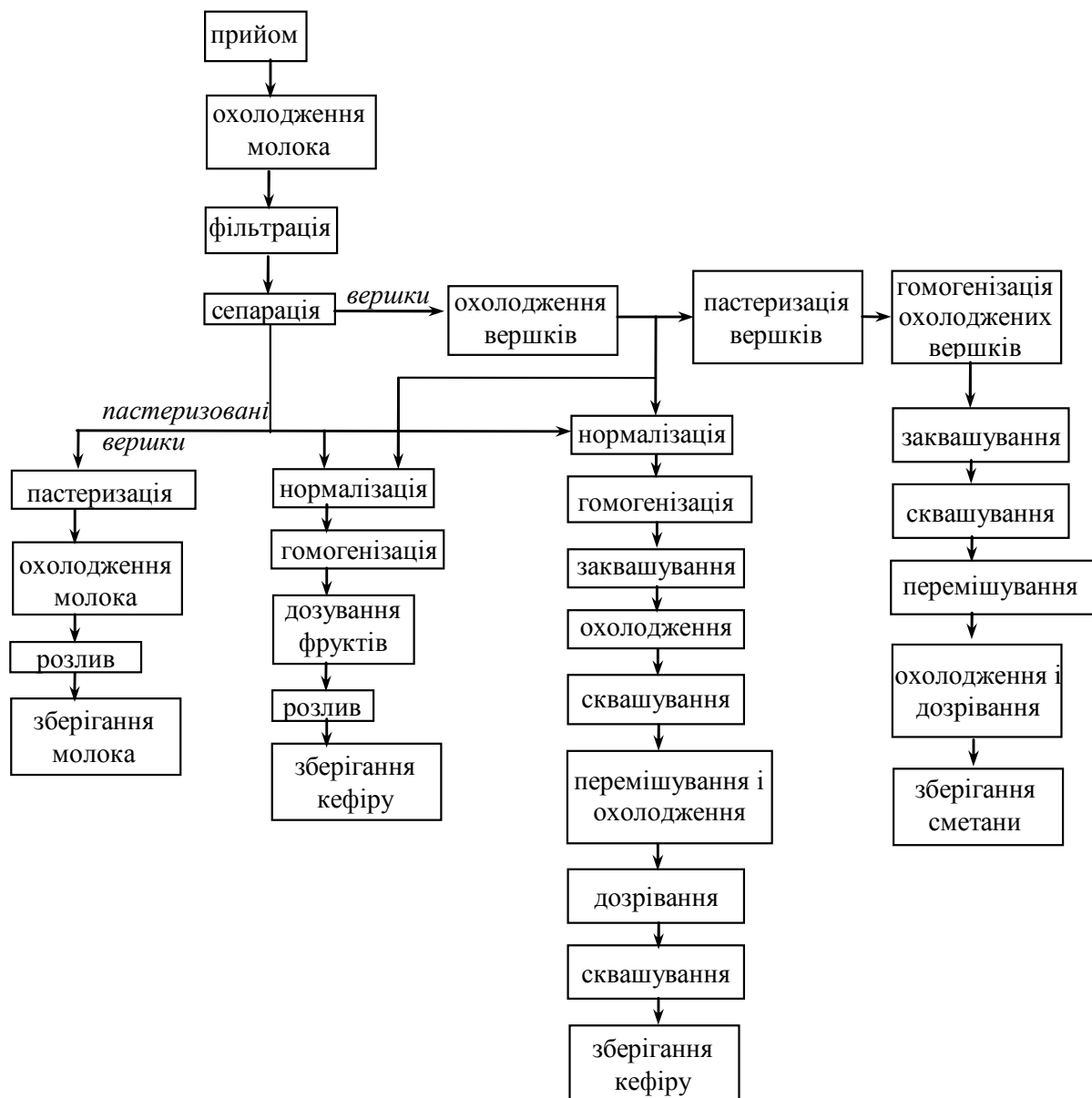


Рисунок 1 - Функціональна схема виробництва молочної продукції

Методами сучасної математичної статистики визначають залежність між показниками, які характеризують ту або іншу якість сировини у складі суміші, якщо відомо суму якісних показників що складаються і доля їхньої участі в суміші. Визначивши показники кожного з компонентів, підбирають таку характеристику властивостей суміші, що потрібна для одержання окремої властивості в готовій продукції.

Таким чином технологічні показники суміші, що складають з n -го числа компонентів мають вид:

$$Y_i = A_1X_1K_1 + A_2X_2K_2 + \dots + \sum_{i=1}^n A_iX_iK_i, \quad (1)$$

де Y_i - показник якості готової продукції; A_i - показник певної властивості компонентів суміші; K_i - коефіцієнти, що враховують зміну властивостей одних компонентів під впливом інших.

При цьому вважається, що кожен компонент вносить у суміш властивість пропорційну участі на паях у суміші:

$$Y_i = A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n \quad (2)$$

Витрати сировини при виробництві різних видів молочної продукції зведено у таблицю 1.

Таблиця 1

Витрати сировини на виробництво молочної продукції

Вид сировини	Види молочної продукції							Запас сировини
	Мо-локо 2,5% %	Мо-локо 3,2%	Сме-тана 15%	Сме-тана 20%	Сме-тана 30%	кефір	йогурт	
1.молоко	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	A_{15}	A_{16}	A_{17}	Q_1
2.вершки	A_{21}	A_{22}	A_{23}	A_{24}	A_{25}	A_{26}	A_{27}	Q_2
3.добавки	A_{31}	A_{32}	A_{33}	A_{34}	A_{35}	A_{36}	A_{37}	Q_3

Залежно від кількості проєктованих властивостей багатокомпонентної суміші складається система лінійних рівнянь з формули (2), що і являє собою математичну модель багатокомпонентної суміші для вироблення молочної продукції із заданими показниками властивостей продукції.

$$\begin{cases} Y_1 = A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + A_{14}X_4 + A_{15}X_5 + A_{16}X_6 + A_{17}X_7 \leq Q_1 \\ Y_2 = A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + A_{24}X_4 + A_{25}X_5 + A_{26}X_6 + A_{27}X_7 \leq Q_2 \\ Y_3 = A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 + A_{34}X_4 + A_{35}X_5 + A_{36}X_6 + A_{37}X_7 \leq Q_3 \end{cases} \quad (3)$$

Ця система ураховує всі показники властивостей готових виробів і являє приклад розрахунку суміші, що складається з трьох компонентів для вироблення молочної продукції. Таким чином необхідно знайти значення, при яких дотримуються задані вимоги до продукції і забезпечується мінімум її вартості й максимум резерву здатності:

$$F_{\min} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4 + C_5X_5 + C_6X_6 + C_7X_7 \quad (4)$$

де $F_{\min}$ - цільова функція; $C_1..C_7$ - оптова ціна і-го продукту за 1 кг, грн.

Для розв'язання задачі лінійного програмування доцільно застосувати симплекс – метод, який дозволить здійснити цільовий перебор допустимих планів у такий спосіб, що на кожному кроці здійснюється перехід від одного опорного плану до наступного, який за значенням цільової функції був би хоча б не гіршим чим попередній. Значення функціонала при переході змінюється в потрібному напрямку: збільшується (для задачі на максимум) чи зменшується (для задачі на мінімум).

Визначення нових опорних планів полягає у виборі вектора, який слід ввести в базис, і вектора, який необхідно вивести з базису. Така процедура відповідає переходу від одного базису до іншого за допомогою методу Жордана – Гаусса.

Отже після визначення змісту компонентів у суміші можна приступати до розв'язання основної задачі, до проектування багатокомпонентних сумішей із заданими споживчими властивостями молочних виробів відповідно до вище викладеної послідовності.

Приклад витрат сировини при виробництві різних видів молочної продукції наведено у таблиці 2.

Витрати сировини на виробництво молочної продукції

Вид сировини	Види молочної продукції							Запас сировини
	Мо-локо 2,5%»	Мо-локо 3,2%	Сме-тана 15%	Сме-тана 20%	Смета-на 30%	кефір	йо-гурт	
1.молоко	0.8805	0.841	0.4712	0.33	0.115	0.7948	0.9061	Q ₁
2.вершки	0.1195	0.159	0.4718	0.355	0.835	0.849	0.0069	Q ₂
3.добавки	0	0	0.5	0.25	0.05	0.5	0.087	Q ₃
Вартість	3.8	4.3	5.8	6.3	6.9	5.4	7.9	

За даними система рівнянь (3) буде мати вигляд

$$\begin{cases} 0.8805X_1 + 0.841X_2 + 0.4712X_3 + 0.33X_4 + 0.115X_5 + 0.7948X_6 + 0.9061X_7 \leq Q_1 \\ 0.1195X_1 + 0.159X_2 + 0.4718X_3 + 0.355X_4 + 0.835X_5 + 0.849X_6 + 0.0069X_7 \leq Q_2 \\ 0X_1 + 0X_2 + 0.5X_3 + 0.25X_4 + 0.05X_5 + 0.5X_6 + 0.087X_7 \leq Q_3 \end{cases}$$

Якщо уточнити, що поступило сировини 1000 кг в результаті процесу сепарації отримуємо 79,46% молока = 794,6 кг, вершки 195,4 кг, втрати складають 1% = 10 кг. Тоді обмеження для виробництва молочної продукції із заданими показниками властивостей продукції мають вид:

$$\begin{cases} 0.8805X_1 + 0.841X_2 + 0.4712X_3 + 0.33X_4 + 0.115X_5 + 0.7948X_6 + 0.9061X_7 \leq 794.6 \\ 0.1195X_1 + 0.159X_2 + 0.4718X_3 + 0.355X_4 + 0.835X_5 + 0.849X_6 + 0.0069X_7 \leq 195.4 \\ 0X_1 + 0X_2 + 0.5X_3 + 0.25X_4 + 0.05X_5 + 0.5X_6 + 0.087X_7 \leq 70 \end{cases}$$

Розв'язання системи здійснюється методами лінійної математики з використанням сучасних комп'ютерних технологій.

Оптимальний розподіл неоднорідних ресурсів після оптимізації фіксується у векторі (x₁, x₂, x₃, x₄, x₅, x₆, x₇) і дорівнює (0, 148.48, 0, 0, 146.194, 0, 720.578). За отриманим вектором витікає, що вироби x₁, x₃, x₄, x₆ виготовляти не вигідно, а потрібно виробляти другий виріб – молоко 3.2%, п'ятий – сметану 30% і сьомий – йогурт. Такий оптимальний розподіл ресурсів забезпечить здобуття максимального прибутку підприємства.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

Таким чином визначено параметри сировини для виробництва якісної молочної продукції, визначено функціонал цілі максимального прибутку підприємства і здійснено оптимізацію технічного завдання на виробництво молочної продукції.

Результати оптимізації планування технічного завдання виробництва можна використати для задачі розподілу ресурсів за типами обладнання і в календарному плануванні підприємства. Алгоритм оптимізації планування виробництва необхідно включати у функціонування автоматизованої системи управління технологічними процесами молокозаводу для оперативного управління сортаментом продукції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Храмцов, А. Г. Безотходная технология в молочной промышленности / В. В. Храмцов, П. Г. Нестеренко. – М. : Агропромиздат, 1989. – 279 с.
2. Голубева, Л. В. Современные технологии молока пастеризованного/ Л. В. Голубева, А. Н. Панамарёва, К. К. Полянский. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2001. – 104с.
3. Технология и системы контроля качества, применяемые при производстве продуктов детского питания / ред. Г. Ю. Сажина. – М.: Министерство сельского хозяйства РФ, Изд-во «РИА РАЙ СТИЛЬ», 2002. – 732с.
4. Крусъ Г.Н. Технология молока и молочных продуктов/ Г.Н. Крусъ, А.Г. Храмцов, З.В. Волокитина, С.В. Карпычев; Под. Ред. А.М. Шалыгиной. – М.: Колос, 2006. – 455с.
5. Організація та планування виробництв харчової промисловості. Власенко Н.А. – Херсон: ХДТУ, 2003 – 176с.
6. Зайченко Ю.П. Исследование операций: учебник. – 6 изд., перераб. и доп.-Киев: Издательский Дом «Слово», 2003. – 688с.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ

Аннотация. В данной работе рассмотрено моделирование плазмохимических процессов в системе газ-жидкость.

Ключевые слова: неравновесная плазма пониженного давления, биполярный электрод, заряженные частицы, плазмохимическая обработка жидкости, многоатомное моделирование.

Введение

В настоящее время газоразрядные источники плазмы используются во множестве приложений: в гетерофазных и гомофазных плазмохимических реакторах, в источниках света. Параметры плазмы в этих устройствах изменяются в широких пределах (плотности заряженных частиц от 10^7 до 10^{15} см⁻³, давления газа от 10^{-4} Тор до атмосферного, в качестве рабочего вещества используются инертные, молекулярные газы и их смеси).

Взаимодействие газового разряда с растворами может быть организовано несколькими существенно различающимися способами [1]:

1. Импульсный пробой жидкой фазы.
2. Контактирующий с жидкостью разряд между расположенными в газовой фазе электродами.
3. Стационарный или квазистационарный разряд, в котором роль одного или обоих электродов выполняет раствор электролита.

В спектре излучения плазмы разряда с жидкостными электродами при всех условиях наблюдаются линии атомов водорода серии Бальмера, полосы радикалов ОН', молекулярного азота и NO (при использовании воздуха в качестве исходного плазмообразующего газа). При использовании растворов солей в спектре излучения появляются линии атомов соответствующих металлов. Плазма разряда не-

однородна в осевом направлении. Компонентный состав плазмы у катода и анода сильно различен.

Наиболее интересным для нас является именно третий способ при котором ток разряда проходит через электролит, что существенно меняет свойства границы раздела фаз плазма - жидкость. При этом плазма может создаваться в исходном плазмообразующем газе, содержащем пары растворителя или в паровой оболочке, возникающей внутри жидкой фазы вследствие перегретой неустойчивости.

Физические свойства границы плазма-раствор и характер активации химических процессов в растворе в сильной степени зависят от полярности электрода, расположенного в газовой фазе. В случае электролитного катода падение потенциала у поверхности раствора выше и более эффективно протекают окислительные процессы.

Постановка проблемы

При рассмотрении плазмохимических процессов, протекающих в системе газ-жидкость, возникает ряд трудностей, из-за необходимости рассматривать все процессы, протекающие в ней комплексно.

Прежде всего, это касается использования поверхности жидкости как биполярного электрода, поверхность которого контактирует со столбом плазмы. В данном случае плазма является инструментом обработки жидкой среды, которая в свою очередь является источником заряженных частиц, способствующих ионизации разряженного газа, и образованию плазменного разряда.

Анализ исследований и публикаций

В работе Дивина [2] представлено уравнение для плазмы в многомерно-неоднородной системе, где силовые линии электромагнитного поля и траектории ионов не совпадают друг с другом. Плотность ионов в точке наблюдения u_0 может быть представлена в виде

$$n(u_0) = \int_L du_s n_e(u_s) v_i F((u_s, u_0)), \quad (1)$$

где интегрирование идет по кривой L , такой, что траектории ионов рожденных в точках этой кривой проходят через точку наблюдения. Для расчета $F((u_s, u_0))$, кроме величин определенных Ленгмюром и Тонксом, необходимо определить скорость разбегания траекторий ионов при их движении. Итоговый вид одной из простейших форм уравнения плазмы и слоя в цилиндрических координатах r, θ

($\eta = e\varphi/kT_e$ – безразмерный потенциал, V_S – ионно-звуковая скорость, ν_i – частота ионизации).

$$\exp(-\eta(r))r_{De}^2\Delta\eta = 1 - \frac{\nu_i}{\sqrt{2}V_S} \int_0^r e^{\left(\eta(r_S, \theta) - \eta(r, \theta)\right)} \frac{r_S}{r} \frac{dr_S}{\sqrt{\left(\eta(r_S, \theta) - \eta(r, \theta)\right)}} \times$$

$$\times \left(1 + \int_{r_S}^r \frac{dr'}{2\sqrt{\eta(r_S, \theta) - \eta(r', \theta)}} \int_{r_S}^{r'} \frac{dr''}{\sqrt{\eta(r_S, \theta) - \eta(r'', \theta)}} \left(\frac{\partial \eta}{\partial \theta} \frac{\partial \eta}{\partial r} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} \right) \right) \quad (2)$$

Данное уравнение может быть основой для расчета пространственных характеристик плазмы положительного столба в режиме свободного пробега ионов при произвольной форме границы положительного столба разряда [3].

Процессы, приводящие к образованию заряженных частиц в жидкости, преимущественно протекают благодаря наличию электрода, погруженного в раствор. Обычно, в этом качестве выступает катод. Основным показателем, позволяющим оценить количество заряженных частиц, переданных от электрода в жидкость, является плотность тока.

Механизм, представленный в виде совокупности реакций различных порядков, описывает химические процессы, протекающие в растворе.

В общем виде, упрощенное уравнение, которое позволяет учитывать большинство процессов, протекающих при плазмохимической обработке, предложенное нами в работах [4-6], позволяет достаточно точно определить кинетические изменения в жидкой среде в процессе обработки. Уравнения (1)-(2) позволяют уточнить количественные характеристики плазмохимических выходов, в зависимости от пространственных характеристик разряда.

Вместе с тем при решении систем из 16 и более дифференциальных уравнений с большим разбросом коэффициентов при переменных (для водного раствора от 10^{-5} до 10^{18}), математический аппарат достаточно ограничен. Широко известные методы Адамса, Гира и производные от них [7-8] достаточно точны на определенном, достаточно большом промежутке, но при длительных расчетах возможно накопление ошибок.

Принимая во внимание, что при проведении численного эксперимента, обычно, в связи с развитием возможностей вычислительной техники, предшествующего лабораторным исследованиям, достаточно

определить возможность и направление процесса, а также способы управления им. Для этого достаточно провести расчеты не на макро-, а на уровне взаимодействия кластеров и частиц. Используя методы многомасштабного моделирования [9,10] можно рассмотреть систему как совокупность взаимодействующих между собой частиц.

В настоящее время в компьютерном моделировании многоатомных систем и процессов используются в основном следующие подходы [11-15]:

1) метод классических (эмпирических) потенциалов В этом подходе полагается, что взаимодействие атомов может быть описано заданием некоего потенциала (в простейших случаях — парного), являющегося функцией межатомного расстояния и углов межатомных связей. Потенциалы взаимодействия задаются в виде простых аналитических формул с использованием численных параметров, значения которых берутся либо из эксперимента, либо из квантово-механических расчетов. Наиболее известные из них - потенциал Морзе и потенциал Леннарда-Джонса;

полуэмпирический подход. Полуэмпирические методы развивались для решения задач квантовой химии и поэтому реализованы, обычно, в кластерном варианте;

неэмпирический подход (моделирование из первых принципов). Применяемые вместе с теорией функционала плотности, сохраняющие псевдопотенциалы дают возможность проводить вычисления полной энергии сложных многоатомных систем для многих элементов периодической таблицы;

Квантовый метод Монте-Карло [12], который заключается в том, что методом Монте-Карло (с использованием статистического интегрирования) решаются квантово-механические уравнения, находятся волновые функции и электронные энергии. При этом получаются результаты, зачастую более точные, чем с помощью стандартных методов. Кроме этого, его алгоритм хорошо распараллеливается и пригоден для вычислений на многопроцессорных суперкомпьютерах.

Цель работы

Целью данной работы является поиск и анализ методов, позволяющих получать как качественные, так и количественные характеристики процесса плазмохимической обработки жидких сред.

Основная часть

Принимая во внимание, что не один из методов и подходов не позволяет при компьютерном моделировании многоатомных систем и процессов работать сразу с большим количеством частиц (молекул, атомов, кластеров и т.п.), обычно 1000-5000 максимум, то естественно, пока с помощью данных методов возможно получение только качественных характеристик процесса. Использование программных продуктов реализующих методы и подходы для многоатомных систем, например, пакеты семейства Gaussian [16], пакет GAMESS [17], пакета SageMD2[18]. С помощью последнего можно моделировать свойства различных материалов при постоянной температуре и/или давлении, вычислять функцию радиального распределения атомов (RDF) и среднеквадратичное смещение атомов (MSD) для вычисления коэффициента диффузии. Программа позволяет использовать различные граничные условия, например: периодические граничные условия, свободную поверхность, подвижную стенку. Для моделирования материалов с ковалентными химическими связями в программу интегрирован алгоритм уравнивания зарядов (QEq). Для расчета межатомного силового поля на основе методов *ab initio* в SageMD2 реализована возможность его сопряжения с коммерческими квантово – химическими кодами. Пакет SageMD2 включает модули, которые взаимодействуют с наиболее известными квантово-механическими программами такими как Abinit, Gaussian, и при этом используя стандартные форматы ввода/вывода результатов вычисления межатомных сил в этих программах. [18].

Однако, среди всего многообразия существующих программных пакетов, нет таких программных продуктов, с помощью которых можно достаточно полно моделировать процесс плазмохимической обработки жидкости на молекулярном уровне. В настоящее время достаточно полно можно отследить только поведение кластеров в жидкости и то, в достаточно упрощенном варианте [19-20].

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых методик, позволяющих моделировать взаимодействие плазмы и жидкости, появлении новых пакетов прикладных программ или расширения возможностей уже имеющихся. Необходимость учитывать как можно большее число атомов в системе, в дальнейшем предполагает или увеличение вычислительных мощностей многопроцессорных сис-

тем на основе суперкомпьютеров, либо появления иных инструментов моделирования.

Висновки

На основе проведенного анализа существующих методик и программных средств можно утверждать, что количественных характеристики процесса, касающиеся изменения концентраций большого количества частиц, преимущественно следует рассчитывать на основе кинетических параметров и механизма химических реакций и тому подобных методов. Многоатомное моделирование пока позволяет провести только качественный анализ вероятного поведения частиц в системе. Однако, несмотря на данные, достаточно существенные недостатки применение методов многоатомного моделирования помогает значительно сократить время и материалы, необходимые для экспериментальных исследований.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кутепов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Растворы и плазма, Наука в России, №5(107), 1998, с. 11-13.
2. Двинин С. А. Развитие моделей газовых разрядов в постоянных, высокочастотных и сверхвысокочастотных электрических полях : диссертация доктора физико-математических наук : 01.04.08 / Двинин Сергей Александрович; [МГУ].- Москва, 2009.- 369 с
3. Берлин Е.В., Двинин С.А., Михеев В.В. и др. Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде низкого давления. – Физика плазмы, 2004, №12, с.1043–1051.
4. Сергеева О.В., Пивоваров А.А., Дубовик Т.Н. Пример решения прямой кинетической задачи моделирования процесса превращений в дистиллированной воде под действием контактной неравновесной плазмы // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – №5. – С. 161-166.
5. Сергеева О.В., Пивоваров А.А., Овчаренко О.В. Пример решения прямой задачи химической кинетики с использованием средств Mathcad Professional // Вопросы химии и химической технологи. –2009. – №5. – С. 166-170.
6. Сергеева О.В., Пивоваров А.А., Фролова Л.А., Дубовик Т.Н. Моделирование процесса плазмохимической обработки газ-жидкость // Системні технології. – 2012. – №4. – С. 11-17.
7. Димитров В.И. Простая кинетика. Новосибирск, 1982.- 438с.
8. Артамонов А.Г., Володин В.М., Авдеев В.Г. Математическое моделирование и оптимизация плазмохимических процессов.- М.: Химия, 1989.- 224с.

9. Шахнов В.А., Панфилов Ю.В., Власов А.П. [и др.]. Наноразмерные структуры: классификация, формирование и исследование. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 100 с.
10. Власов, А. И., Назаров А.В. Основы моделирования микро- и наносистем. - М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. - 142 с.
11. Beckstedte M., Kley A., Neugebauer J., Scheffler M. Density functional theory calculations for poly-atomic systems: electronic structure, static and elastic properties and ab initio molecular dynamics. // Comp. Phys. Commun. 1997. V. 107. P. 187-205.
12. A. Baldereschi. Mean-value point in the Brillouin zone, Phys. Rev. B 7 (1973) 5212-5215.
13. M. Fuchs, M. Scheffler. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of poly-atomic systems using density-functional theory. Computer Physics Communications, 1999, 119, p. 67-98.
14. W. M. C. Foulkes, L. Mitas, R. J. Needs and G. Rajagopal. Quantum Monte Carlo simulations of solids. Rev. Mod. Phys., Vol. 73, No. 1, January 2001 33-83.
15. Комаров В.П., Жеренкова Л.В, Халатур П.Г., Хохлов А.Р. Самосборка металлоорганического наноагрегата на основе электростатического взаимодействия молекулы днк и поляризованных в ее поле наночастиц золота // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 7–8. – С. 92–98.
16. <http://www.lrz.de/services/software/chemie/gaussian/>
17. <http://www.msg.ameslab.gov/GAMESS/>
18. <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2009/rossiiskii-paket-dinamicheskogo-nanomasshtabnogo-modelirovaniya-sagemd2>
19. I. M. B. Nielsen, E. T. Seidl, C. L. Janssen, “Accurate structures and binding energies for small water clusters: The water trimer” J. Chem. Phys. 1999, v 110, p. 9435.
20. АЛЕХИН А. П. Исследование геометрических и динамических свойств самоподобных кластеров, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, 01.04.02 – теоретическая физика Казань – 2012, -20с.]

Л.А. Фролова, О.А. Пивоваров, Т.Е. Бутырина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТООБРАЗОВАНИЯ ШПИНЕЛЬНЫХ ПИГМЕНТОВ

Аннотация. С помощью экспериментальных исследований установлено влияние катионов хромофоров и термообработки на цветообразование в системе Fe-Al-Co-O, что позволяет в дальнейшем выполнять целенаправленный синтез пигментов синей, красной и желтой цветовой гаммы.

Ключевые слова: пигменты, цвет, цветообразование, шпинель, синий кобальтовый, гетит

Введение

Синтез высокодисперсных, с заданными свойствами, шпинельных пигментов является актуальной задачей. В настоящее время используются различные технологии их получения: керамическая, золь-гель, плазмохимическая, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [1-4]. Основной является, имеющая ряд недостатков, керамическая технология. С целью снижения энергозатрат и температуры синтеза при получении пигментов сложной структуры, в данной работе использован метод осаждения исходных компонентов в виде смешанных гидроксидов с последующим промыванием, сушкой, обжигом.

Известно, что окраска пигментов зависит от ионов хромофоров, входящих в состав структуры пигментов. В пигментах, в том числе и в шпинелях основными хромофорами являются ионы переходных металлов: Co^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Cr^{2+} , V^{3+} , Cu^{2+} и др. Они имеют неполностью завершенную электронную оболочку и обладают высокой поляризационной способностью. Окрашенность их будет изменяться в зависимости от поляризуемости кислорода, входящего в комплексы ионов переходных металлов [5, 6]. Внимание исследователей привлекают также разнообразные отходы, используемые в качестве источников катионов-хромофоров [7-9].

Цель данной работы – изучение закономерностей цветообразования и разработка составов для получения шпинелей с использованием метода осаждения и дальнейшей термообработкой.

Основная часть

Для получения совместно осажденных гидроксидов использовали водные растворы солей. Условия синтеза варьировали по следующим параметрам: природа исходных солей металлов, соотношение катионов металлов, концентрация растворов солей (0,1-0,5 моль/л) и осадителей (0,5-1 моль/л). Оттенки пигмента варьировали за счет добавления растворов солей металлов в различных количествах.

Результаты измерения цветовых характеристик обрабатывали с помощью симплекс-решетчатого планирования. При изучении свойств смеси в зависимости от содержания компонентов в ней, факторное пространство можно представить в виде правильного $(q-1)$ – размерного симплекса. С целью изучения зависимости обозначенных физико-химических и оптических характеристик пигментов от состава и температуры отжига пигментов с помощью симплекс-решетчатого метода планирования были проведены соответствующие эксперименты. Поверхность отклика на диаграммах «состав-свойство» изображали с помощью изолиний, которые выполняли с использованием математических моделей. При построении контурных кривых в трехкомпонентной системе использовали следующий прием. Для какого-нибудь фиксированного значения x_1 рассчитывали значение отклика для разных x_2 (или x_3), которые изменяли от 0 до $(1 - x_1)$ с каким-нибудь шагом h , например, 0,1. Полученные значения откликов наносили на двумерную диаграмму напротив соответствующих величин x_i . Воспользовавшись этими двумерными диаграммами, определяли относительное содержание компонентов x_1, x_2, x_3 , которое обеспечивает заданное значение отклика, линии которого наносили на диаграмму. Полученные точки наносили на симплекс и соединяли плавной кривой. Таким образом строили ряд изолиний, которые в целом дают представление о поверхности отклика.

Рентгенограммы пигментов получали на приборе ДРОН - 2.0 в монохроматизованном медном излучении с никелевым фильтром. Определение цветовых характеристик и чистоты цвета проводили с помощью компаратора цвета ФКЦШ-М. Результаты измерений цве-

товых характеристик пигментов системы Fe-Al-Co-O до и после термообработки приведены в таблице 1 и 2.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что цвет обусловлен фазовым составом образующихся гидроксидов и оксигидроксидов. Желтый цвет образца №1 отвечает образованию оксигидроксида железа. Изменение насыщенности желтого цвета по стороне Fe-Al треугольника зависит от содержания алюминия. Причем, цветообразование происходит согласно закону аддитивности. Присутствие алюминия приводит к образованию твердых растворов оксигидроксидов железа и алюминия. Опыт № 4 отвечает образованию гидроксида алюминия белого цвета. Образцы № 5 и 6 соответствуют разному содержанию кобальта и определяют розово-сиреневые цвета образованных продуктов. Соосажденные оксигидроксиды кобальта и железа отвечают образованию твердого раствора оксигидроксидов. Однако цветообразование в данном случае подчиняется другим закономерностям. Гидроксид кобальта имеет темно-зеленый цвет с табачным оттенком - длина волны 591 нм отвечает желто-зеленому участку спектра. Комбинации катионов кобальта и железа придают пигментам коричневые оттенки, преобладающая длина волны которых 596 нм отвечает красной области спектра.

Таблица 1

Цветовые характеристики пигментов Fe-Al-Co-O до прокаливания

№	Состав	K ₃ O, %	X	Y	Z	x	y	λ, нм	P, %
1.	100% Fe	36,49	43,66	36,20	5,645	0,5106	0,4233	588	69
2.	1/3Fe+2/3Al	33,24	42,25	33,21	6,505	0,5154	0,4052	596	40
3.	2/3Fe+1/3Al	33,85	43,85	34,77	6,203	0,5169	0,4098	599	50
4.	100% Al	94,25	102,7	93,86	32,73	0,4479	0,4093	700	1
5.	1/3Al+2/3Co	62,68	74,00	62,78	20,98	0,4690	0,3979	605	10
6.	2/3Al+1/3Co	79,97	93,96	82,33	28,73	0,4582	0,4015	700	5
7.	100% Co	26,15	31,20	27,29	7,710	0,4713	0,4122	591	15
8.	1/3Co+2/3Fe	18,76	23,85	19,76	5,024	0,4903	0,4063	595	30
9.	2/3Co+1/3Fe	28,33	37,24	29,46	6,367	0,5096	0,4031	596	40
10.	1/3Co+1/3Fe+ 1/3Al	25,23	31,72	26,07	6,391	0,4942	0,4062	595	35

Большое содержание железа придает пигменту темно-коричневый цвет. Тройная точка (Fe - Al - Co) имеет тоже коричневый цвет.

Также было выявлено положительное влияние катиона алюминия на блеск пигментов. Наибольший показатель КЗО (коэффициент зеркального отражения) свидетельствует о хорошем блеске для точки №4 (100% Al - 94,25...94,62).

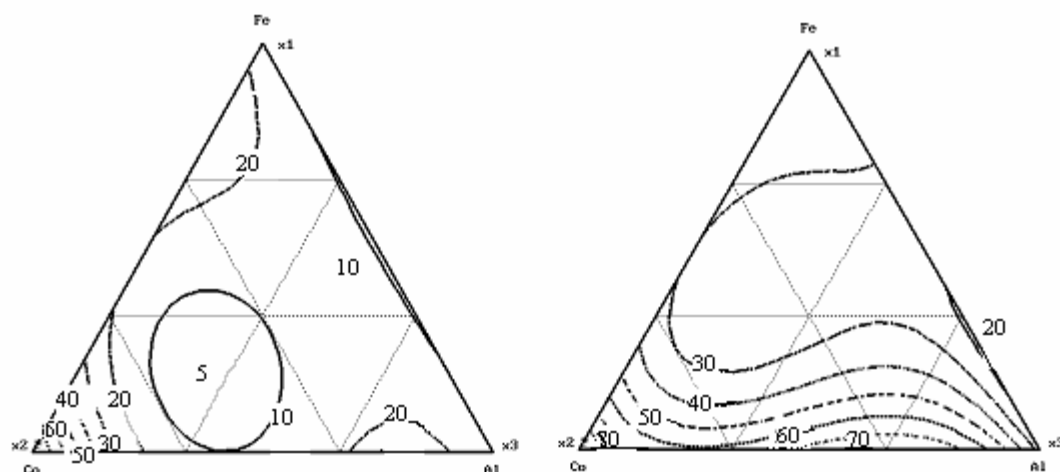


Рисунок 1 – Зависимость чистоты цвета пигментов от их химического состава а) температура синтеза 30 °С б) температура синтеза 800 °С

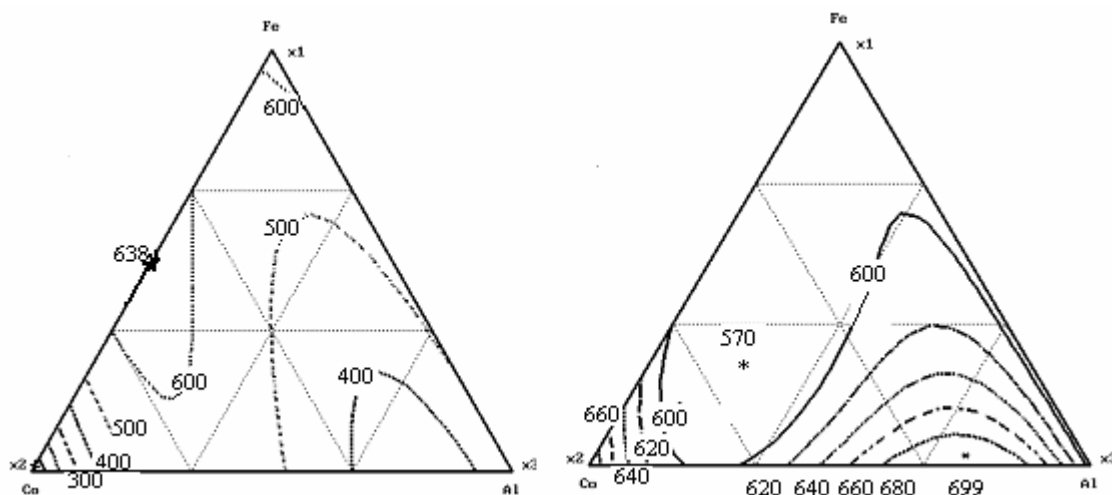


Рисунок 2 – Зависимость цветового тона пигментов от их химического состава а) температура синтеза 30 °С

б) температура синтеза 800 °С

Чистота цвета Р - это степень приближения данного цвета к чистому спектральному, выраженному в частях единицы. Наибольшей чистотой обладают цвета спектра. Поэтому чистота всех спектральных цветов принимается за единицу, несмотря на их разную насы-

ценность. Наиболее насыщенный синий цвет, наименее - желтый. Особенно насыщенные цвета наблюдаются в спектре, который не содержит примесей белого или черного. Было установлено, что добавление к железу кобальта или алюминия увеличивает чистоту цвета приблизительно на 20-25%. Для изучения влияния термообработки, пигменты прокаливали при 780-800 °С. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Цветовые характеристики пигментов Fe - Al – Co - O после прокаливания

№	Состав	K ₃ O, %	X	Y	Z	x	y	λ, нм	P, %
1	100% Fe	12,76	18,49	15,15	4,935	0,4792	0,3928	630	10
2	1/3Fe+2/3 Al	24,47	35,56	26,22	5,003	0,5325	0,3926	601	45
3	2/3Fe+1/3Al	20,66	31,32	22,76	4,412	0,5354	0,3891	602	45
4	100% Al	85,85	96,67	87,33	29,92	0,4518	0,4082	700	0
5	1/3Al+2/3Co	12,12	18,27	14,87	13,00	0,3960	0,3221	579	1
6	2/3Al+1/3Co	19,16	26,84	21,62	22,58	0,3777	0,3043	400	1
7	100% Co	10,61	14,56	13,39	4,867	0,4436	0,4080	500'	0
8	1/3Co+2/3Fe	9,48	13,91	12,49	4,435	0,4510	0,4051	510'	0
9	2/3Co+1/3Fe	9,34	13,76	12,19	4,548	0,4511	0,3996	560'	1
10	1/3Co+1/3Fe +1/3Al	10,19	13,67	12,90	4,798	0,4356	0,4113	499	4

После прокаливания, в результате образования шпинелей, цвета изменились. Цветообразование, в этом случае происходит в соответствии с образованием шпинельных соединений. Показатель яркости и блеска снизился, но остался достаточно высоким у пигментов системы Fe-Al-O, в состав которых входит алюминий (2/3 Al - 24,47...24,24%; 1/3 Al – 20,66...20,52%). Нужно учитывать, что с увеличением чистоты цвета коэффициент отражения увеличивается.

При термообработке двухкомпонентных пигментов изменился цветовой тон: в комбинациях с алюминием он увеличился (579-630 нм), в комбинациях с кобальтом – снизился (400-560 нм). Возрастание ковалентности после термообработки ведет к сдвигу цвета в длинноволновую область спектра и к увеличению интенсивности окраски. Например, общее присутствие в растворе железа и алюми-

ния обусловило терракотово-красный цвет пигментов. Пигменты, в состав которых входили алюминий и кобальт, из розовых перешли в ярко-синие. Комбинации кобальта с железом дали серо-коричневые оттенки. Это связано с тем, что обычно интенсивность цвета, возникающего при d-d переходах в ионах переходных металлов при октаэдрическом расположении сравнительно мала. Однако из-за колебательного движения атомов в соединении возможно появление слабого поглощения света. Степень насыщенности цвета пигмента зависит от его чистоты цвета. Из двух равнонасыщенных цветов более насыщенным воспринимается более светлый. Чистота цвета осталась высокой лишь у пигментов, в состав которых входили железо и алюминий ($P=45\%$).

Наиболее характерные рентгенограммы пигментов приведены на рисунках 3,4. Общим для всех рентгенограмм является наличие сложных соединений, которые и определяют цвет пигментов. Интенсивность цвета кобальтовой шпинели зависит от положения катиона кобальта в кристаллической структуре и его координационного числа. Для соединений кобальта точки №5 (табл.2), в которых катион кобальта находится в тетраэдрической координации, характерна длина волны 579...580 нм. При соотношении, соответствующем точке №6, присутствие ионов кобальта в октаэдрическом окружении приводит к появлению поглощения в интервале длин волн 400...410 нм. Кроме того, если рассмотреть систему Co-Al-O, то число возможных шпинелей значительно возрастает за счет их способности к образованию твердых растворов, в которых границы нормальных и обратных шпинелей разделены двухфазной границей. Традиционно шпинель CoAl_2O_4 относят к прямой. Но шпинель можно рассмотреть как $\text{Co Co}_2\text{O}_4$ с замещением всего кобальта на алюминий. Этим можно объяснить независимость вида рентгенограммы от соотношения алюминия и кобальта. Очевидно, что чем больше содержание алюминия, тем меньше граница растворимости кобальта. Таким образом, на рентгенограммах наблюдается наличие одной фазы CoAl_2O_4 , а отличаются они степенью кристалличности систем. Система Fe-Al-O характеризуется зависимостью фазового состава образованных веществ от исходного состава. Увеличение количества алюминия приводит к появлению не только соединений FeAlO_3 , а и индивидуальных оксидов.

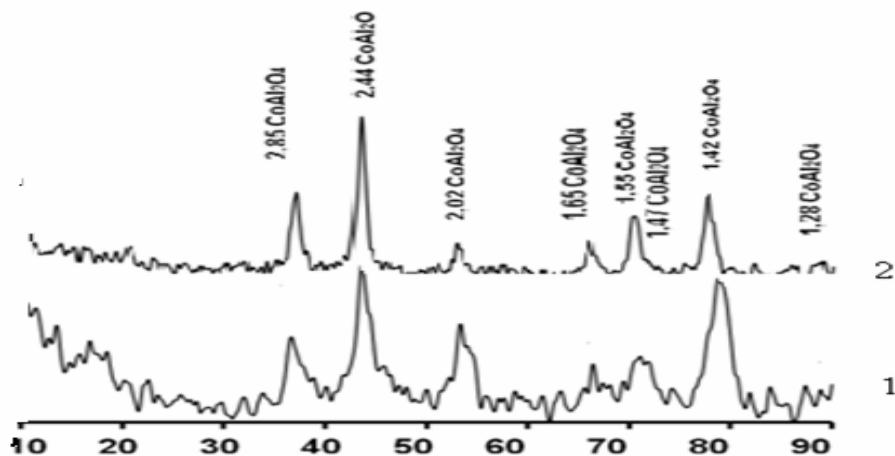


Рисунок 3–Рентгеновская дифрактограмма пигмента, полученного осаждением из 1–сульфатов алюминия (2/3) и кобальта (1/3), 2–сульфатов алюминия (1/3) и кобальта (2/3)

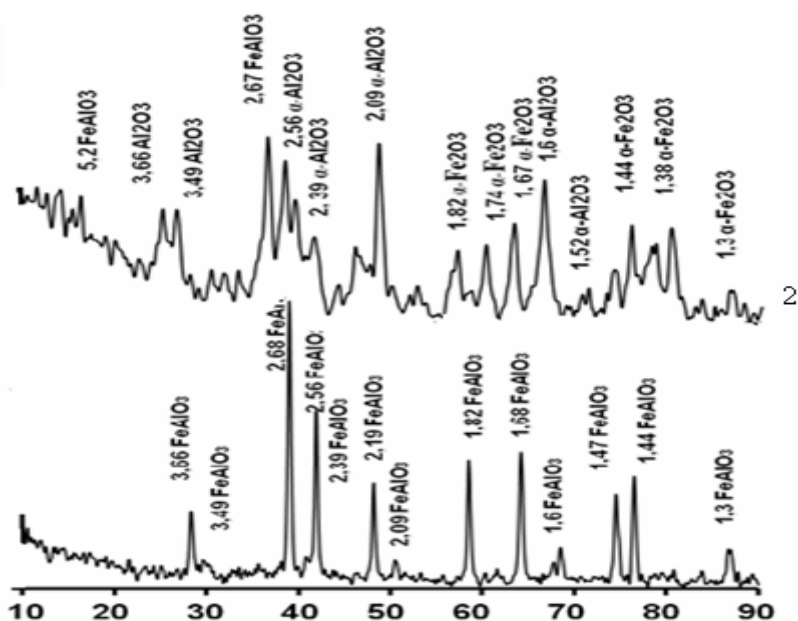


Рисунок 4–Рентгеновская дифрактограмма пигмента, полученного осаждением из 1–сульфатов алюминия (1/3) и железа (2/3), 2–сульфатов алюминия (2/3) и железа (1/3)

Выводы

В данной работе было изучено влияние модификаторов на цветовые свойства пигментов в системе Fe-Co-Al-O. Цвет синим пигментам придает алюмокобальтовая шпинель. В темноокрашенных пигментах цвет определяют феррошпинели CoFe_2O_4 и Fe_3O_4 .

Системы Fe-Co-O и Co-Al-O образуют непрерывные ряды твердых растворов в то время, как Fe-Al-O, ограниченно растворимы друг в друге и образуют твердые растворы лишь до определенных пределов. Этим объясняется тот факт, что с увеличением мольной концентрации хромофора в шпинелях типа FeCo_2O_4 интенсивность окраски образцов равномерно увеличивается, а окраска шпинелей FeAl_2O_4 с увеличением содержания Al_2O_3 меняется от ярко-оранжевого через грязно-желтый до белого. Предельная растворимость Fe_2O_3 в Al_2O_3 составляет порядка 60%, а Al_2O_3 в Fe_2O_3 – 80%.

Для получения пигментов с необходимыми свойствами (цветом, оттенком, интенсивностью и др.) нужно четко выдерживать технологические параметры технологии. При незначительном отклонении от них может образовываться пигмент другой структуры и неудовлетворительного качества.

Таким образом, установлены не только оптимальные соотношения окрашивающих катионов в составе сложных пигментов, но и возможность регулирования яркости и насыщенности цвета.

На основании проведенных исследований для получения пигментов различной цветовой гаммы предлагается технология получения шпинельных пигментов методом осаждения и последующей термообработкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачян, А.Н. Исследование новых пигментов для получения цветных цементов / А.Н.Грачян, П.П.Гайджуров, Н.В.Ротыч, С.П.Голованова // Известия вузов. Химия и химическая технология.-1972.-№1.-С.115-118.
2. Грачян, А.Н. Получение и свойства красно-коричневого пигмента для производства цветных портландцементов / А.Н.Грачян, П.П.Гайджуров, Н.В.Ротыч, С.П.Голованова // Известия вузов. Химия и химическая технология.- 1973.- №5.- С.741-751.
3. Мачикина, Т.А. Получение красного железистоокисного пигмента из магниевых колчедановых огарков / Т.А.Мачикина, В.И.Богданов, П.Д.Торгашев // Известия вузов. Химия и химическая технология.- 1974.- №6.- С.865-869.
4. Тищенко, Г.П. Исследование влияния железистоокисных пигментов-наполнителей на износостойкость эпоксидных покрытий / Г.П.Тищенко, Р.Ю.Логачев, Д.О.Клешня, Ю.А.Харкута // Вопросы химии и химической технологии.- 2009.- №1.- С.135-137.
5. Орлова О.В., Фомичев Т.Н. Технология лаков и красок: Учебник для техникумов. М.: «Химия», 1990. - 384 с.

6. Индейкин, Е.А. Пигментирование лакокрасочных материалов / Е.А.Индейкин, Л.Н.Лейбзон, И.А.Толмачев.-Л.: Химия.-1986.-160с.
7. Орлова, А.М. Исследование возможности использования гальваношламов в качестве пигмента / А.М.Орлова, А.М.Славин // Вестник МГСУ.- 2009.- №3. Спецвыпуск.- С. 154-159.
8. Орлова,А.М. Исследование свойств смешанного железистоокисного пигмента на основе гальваношламов / А.М.Орлова, А.М.Славин // Промышленное гражданское строительство.- 2009.-№12.- С.55-56.
9. Шевченко, Л.А. Применение продукта регенерации отработанных травильных растворов для изготовления лакокрасочных материалов / Л.А.Шевченко, В.В.Зелинская, Л.Т.Жупинская // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.- 2005.- Вып.11.- С.233-236.

УДК 669.162.262:002.55.001.8

А.Ф. Хамхотько, А.И. Белькова, Н.А. Циватая, А.С. Скачко,
Ю.М. Лихачев

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ЩЕЛОЧЕСОДЕРЖАЩИХ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Аннотация. С целью обеспечения АСУТП доменной плавки средствами оперативной оценки металлургических свойств железорудных материалов, актуализирована база данных «Железорудные материалы» банка данных «Металлургия» сведениями о металлургических свойствах щелочесодержащих агломератов и окатышей. Развиты модели для прогнозирования свойств щелочесодержащих железорудных материалов и изучено влияние K_2O на их температуры начала и конца размягчения.

Ключевые слова: база данных, железорудные материалы, шихта, температура размягчения, щелочи.

Постановка проблемы. Важнейший фактор повышения эффективности доменного производства – улучшение подготовки железорудного сырья к плавке, повышающее газопроницаемость столба шихты и степень использования тепловой и восстановительной способности газов в печи.

Качество железорудных материалов определяется их физико-химическими свойствами в исходном состоянии и поведением в процессе металлургического передела. В частности, внимание исследователей сосредоточено на поиске мероприятий, обеспечивающих окатышам и агломерату способность сохранять высокую прочность, газопроницаемость и восстановимость в процессе доменной плавки.

Расположение зоны плавления шихты в доменной печи определяется плавкостью исходных материалов, причем критериями положительной оценки являются высокие температуры начала размягчения ($T_{нр}$) и плавления ($T_{п}$) агломератов и окатышей при малом интервале между ними.

© Хамхотько А.Ф., Белькова А.И., Циватая Н.А., Скачко А.С., Лихачев Ю.М., 2013

Изменение свойств железосодержащих шихтовых материалов под воздействием щелочей оказывает отрицательное влияние на ход доменной плавки. К таким изменениям относятся разрушение, т.е. образование мелочи при высоких температурах, разбухание, преждевременное размягчение и образование тестовидной фазы. Эти изменения могут проходить в широком диапазоне температур и распространяться на значительные области печи. Влияние щелочей на преждевременное размягчение шихты легко объяснимо. Оно обусловлено тем, что щелочи вызывают снижение температуры плавления. При этом имеет значение, разумеется, и исходный состав пустой породы.

Сложившийся, в условиях нынешнего дефицита энергоресурсов, переменный (не стабильный) уровень качества комбинированного дутья (концентрация восстановителей, температура, доля фурменного газа) обуславливает разную степень развития восстановительно-тепловых процессов в доменной печи, влияющих на характер агрегатных превращений железорудных материалов. Следствием этого является расширение температурных диапазонов жидкообразования, изменения соотношения в протяженностях зон существования материалов в твердом, размягченном и капельножидком состоянии. В результате этого заметно отклоняются от рационального распределения газов по сечению печи, возрастает сопротивление его движению (нижний перепад) нарушается теплообмен в зоне формирования расплавов, возрастает колеблемость состава продуктов плавки, снижается ровность хода печи и ее экономичность.

Целью работы является актуализация базы данных «Железорудные материалы» банка данных «Металлургия», содержащей сведения о металлургических свойствах щелочесодержащих агломератов и окатышей и развитие моделей для их прогнозирования в современных условиях доменной плавки. Определение влияния K_2O на температуры начала и конца размягчения шихтовых материалов.

Основная часть. Важность оперативной оценки металлургических свойств и отсутствие соответствующих установок для испытания материалов на отечественных металлургических предприятиях обуславливает актуальность прогнозирования свойств компонентов доменной шихты с целью выбора железорудного сырья с оптимальными свойствами, совершенствования методов управления его производством и доменной плавкой в изменяющихся шихтовых и технологиче-

ских условиях. Достоверность прогноза при этом в значительной степени определяется репрезентативностью массива экспериментальных данных. С этой целью в Институте черной металлургии НАН Украины на основе накопленных собственных экспериментальных данных и публикаций в справочниках, монографиях, отраслевых сборниках и периодических изданиях создана документально-фактографическая база данных «Железорудные материалы», которая органически входит в банк данных «Металлургия» (БДМет) [1,2].

База данных «Железорудные материалы» создана в 1990 г. в рамках развития банка данных «Металлургия» на основе накопленных в ИЧМ собственных экспериментальных данных и литературных публикаций других авторов. К 2001 году в базе собраны и систематизированы сведения о химсоставах и свойствах более 750 различных железорудных материалов (окатышей, руд, агломератов) с глубиной поиска 30 лет. В базу были введены 77 источников информации, в том числе данные о свойствах материалов в исходном состоянии (плотность, пористость, ударная прочность, истираемость, гранулометрия, сопротивление сжатию) и свойствах, характеризующих процесс восстановления (восстановимость, степень металлизации, размягчаемость, прочностные и теплофизические характеристики и др.).

Для актуализации базы данных «Железорудные материалы» к настоящему времени проанализированы данные об их составе и свойствах, опубликованные за последние 12 лет в журналах «Сталь», «Известия ВУЗов. Черная металлургия», «Металлургическая и горнорудная промышленность», Бюллетень «Черная металлургия» и «Металлург». Согласно разработанному стандарту представления экспериментальных данных в виде паспортов соответствующей структуры [3] подготовлено 12 паспортов (рисунок 1), включающие данные о 60 химических составах и свойствах агломератов и окатышей, в том числе и данные щелочесодержащих материалов. Полученными на ряде предприятий стран СНГ, в частности, на ОАО «МК Азовсталь», заводе им.Петровского, в условиях ОАО «НМЛК», Западно-Сибирского меткомбината [4-9] и др. Причем отобраны только источники информации, содержащие одновременно сведения о составе и свойствах материалов, что необходимо для последующего решения задач прогнозирования свойств. Пополнение и актуализация базы данных «Железорудные материалы» осуществляется постоянно.

Документ 19(14-93)

Классификация: минеральное сырье, железорудные материалы, горнодобывающие предприятия

Авторы: Кулиш Е.А., Плотников А.В.

Название: Геологические факторы экономической ценности железорудных месторождений

Издание: НАН Украины, Институт геологии окружающей среды, Криворожский экономический ин-т Киевского национального университета, - К., 2005. - 291 с.

Реферат: Показана тенденция к снижению качества исходной руды, что приводит к снижению конкурентоспособности продукции железо-добывающих предприятий Украины на мировом рынке. Также приведена оценка перспектив развития железорудной минерально-сырьевой базы Украины, учитывая требования как отечественных, так и зарубежных металлургических предприятий к качеству железорудной продукции, а также потенциал железорудной минерально-сырьевой базы основных конкурентов Украины на мировом рынке

Референт: Скачко А.С.

Эксперт: к.т.н. Хамхатба А.Ф.

Наименование (сырья, минерала): железная руда

Месторождение, предприятие: Бразилия (Samarco), Австралия (Mt. Newman), Швеция (Malmberget), Канада (OCM, Fire lake, Kero lake), Мауритания (Tielva), Россия (ЛьбГОК, Кастанушский ГОК), Украина (ш. Гигант, ЮГОК, ЦГ ОК, СевГОК, ИнГОК, НКГОК)

Методика: химический состав руды определялся по ГОСТ 23591.0-80

Химический состав железорудного минерального сырья основных предприятий Украины и мира, %

№	фирма	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P	S	MnO
1	Samarco	67,00	1,8	1,1	0,06	0,04	0,02	0,03	0,004	0,03	
2	Mt. Newman	66,7	2,8	1	0,04	0,03	0,01	0,02	0,044	0,06	0,1
3	Malmberget	71,5	0,2	0,21	0,06	0,2	0,03	0,04	0,01	0,01	0,13
4	OCM	66,3	5,00	0,34	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,026	0,03
5	Fire lake	66,5	5,00	0,15	0,51	0,36	0,02	0,02	0,1	-	0,1
6	Kero lake	65,83	4,44	0,15	0,53	0,38	0,00	0,00	0,008	0,005	0,1
7	Tielva	65,7	8,15	0,18	0,41	0,2	0,14	0,13	0,01	0,032	0,02
8	ЛьбГОК	68,4	4,34	0,17	0,16	0,2	0,2	0,1	0,001	0,034	0,62
9	Кастанушский ГОК	67,6	5,73	0,26	0,17	0,17	0,07	0,06	0,015	0,371	-
10	ш. Гигант	65,7	7,1	0,19	0,15	0,34	0,22	0,1	0,018	0,04	0,05
11	ЮГОК	65,13	8,78	0,18	0,42	0,6	0,19	0,1	0,007	0,054	0,05
12	ЦГОК	65,59	7,2	0,25	0,15	0,38	0,09	0,06	0,007	0,04	0,04
13	СевГОК	64,54	9,64	0,35	0,17	0,39	0,13	0,1	0,012	0,023	0,03
14	ИнГОК	64,93	9,7	0,56	0,26	0,6	0,12	0,1	0,019	0,118	0,03
15	НКГОК	65,59	7,7	0,1	0,25	0,36	0,2	0,14	0,011	0,054	0,03
16											

Рисунок 1 – Документ базы данных «Железорудные материалы»

Созданная база данных явилась основой для последующей разработки моделей прогнозирования свойств железорудных материалов на основе их химического состава с учетом щелочей с использованием физико-химических параметров межатомного взаимодействия [1]. Для расчета металлургических свойств шихтовых материалов с учетом влияния щелочей в зависимости от содержания в них Fe_2O_3 , FeO и параметров ρ и Δe , характеризующих структуру и свойства шлаковой связки системы, разработаны модели для прогнозирования температур начала и конца размягчения в виде уравнений: Свойство = $f(\rho, \Delta e, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{FeO}, \text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O})$ [2], где ρ - показатель стехиометрии, равный отношению чисел катионов и анионов; Δe - среднестатистическое число электронов, локализуемых на связующих орбиталях в направлении связи катион-анион. При этом величина Δe при исследованиях связи состав-свойство выполняет функцию химического эквивалента системы.

Разработанные модели прогнозирования свойств железорудных материалов программно реализованы на ПЭВМ. Исходными данными для расчета является химический состав материалов, точность и пол-

нота которого определяют точность расчетных значений свойств, при стабильном гранулометрическом составе и технологии производства. Модели могут быть использованы для оценки влияния щелочей на свойства железорудных материалов с целью принятия управляющего воздействия на формирование и стабилизацию состава и соотношения шихтовых материалов с учетом конкретных шихтовых и технологических условий.

На рисунке 2 представлены зависимости, отражающие влияние щелочей на свойства шихтовых материалов в диапазоне их содержания от 0 до 1,25%.

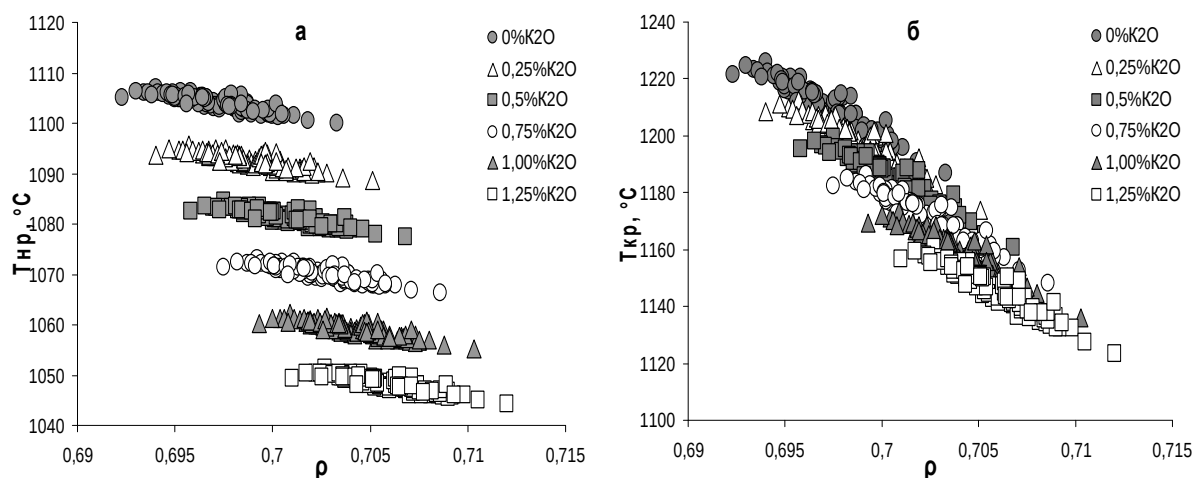


Рисунок 2 – Соотношение температур начала (а) и конца (б) размягчения шихтовых материалов и показателя стехиометрии ρ для различных содержаний K_2O

Из рисунка 2 следует, что повышение количества K_2O в шихте вызывает снижение температур начала и конца размягчения шихтовых материалов, причем каждые 0,25% оксида калия уменьшают эти температуры приблизительно на 11°C. При содержании в шихте 1,25% K_2O температуры начала и конца размягчения снижаются приблизительно на 56°C, что свидетельствует о существенном воздействии оксидов щелочных металлов на температуры начала и конца плавления шихты, а в высокотемпературных зонах доменной печи в условиях ее восстановимости это влияние, как показано в работе [10], еще и усиливается.

Актуализация банка данных «Металлургия» обеспечит создание репрезентативной выборки и перспективу уточнения моделей с учетом щелочей в различных зонах доменной печи.

Выводы. Актуализирована база данных «Железорудные материалы» банка данных «Металлургия», содержащая сведения о металлургических свойствах щелочесодержащих агломератов и окатышей. Развита модель для прогнозирования свойств щелочесодержащих железорудных материалов. Показано понижающее влияние K_2O на температуры начала и конца размягчения шихтовых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. База данных и модели для прогнозирования плавкости железорудных материалов / Э.В. Приходько, А.Ф. Хамхотко, Д.Н. Тогобицкая // Сталь. – 1998. - №9. – С.7-9.
2. Информационное обеспечение и прогноз свойств железорудных материалов / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотко, Л.А. Головкин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.2. – Киев: Наукова думка. – 1998. – С.93-100.
3. О паспортизации экспериментальных материалов для банка данных «Металлургия» / Жмойдин Г.И., Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н., Хамхотко А.Ф., Лихачев Ю.М. // Изв.ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. - №8. – С.136-139.
4. Особенности современных шихтовых условий в доменном цехе ОАО «ДМЗ им. Петровского» / А.Я. Ткач, А.В. Шепель, В.А. Петренко и др. // Металл и литейные технологии Украины. – 2003. - №5. – С.28-32.
5. Влияние качества железорудного сырья и кокса на показатели работы доменных печей в условиях ОАО «НЛМК» / И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, В.Л. Емельянов и др. // Металлург. – 2010. - №1. – С.28-34.
6. Фазовый состав и структурные особенности промышленного агломерата Череповецкого металлургического комбината «ОАО Северсталь» / Т.Я. Малышева, Т.Я. Деткова, И.В. Логинов, А.В. Горшколупова // Металлург. – 2010. - №5. – С.39-43.
7. Особенности минерального состава и металлургические свойства высокоосновного магнезиального агломерата / В.А. Долинский, А.А. Пермяков // Вестник горно-металлургической секции РАН (отделение металлургии): сб. науч. тр. – Новокузнецк. – 2006. – Вып. 17. – С.64-72.
8. Производство и проплавка агломерата повышенной основности, полученного с применением бразильской руды / А.В. Дидевич, Н.С. Халапонин, Н.И. Храпко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. - №1. – С.12-15.
9. Влияние генезиса и основности шихты на минералогический состав и металлургические свойства агломерата: автореф. дис. на соискание научной степени канд. техн. наук // Н.Р. Мансурова. – М. – 2007. – 20с.
10. Доменная плавка. 2-е издание / Товаровский И.Г. - Днепропетровск: "Пороги". – 2009. – 768с.

В.В. Кравец, К.М. Басс, Вл.В. Кравец

**СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
БЛОКА ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ**

Аннотация. Проводится оценка структурной надежности электрического блока гибридного автомобиля в результате анализа возможных состояний системы, составляющих полную группу равновозможных, несовместных случайных событий.

Ключевые слова: надежность, структурная схема, матрица состояний, возможные состояния, безотказные состояния.

Введение. Гибридный автомобиль рассматривается как сложная техническая система [1, 8], состоящая из множества связанных и взаимодействующих элементов, включая водителя, которая функционирует в условиях влияния как внутренних, так и внешних случайных факторов [6]. Способ функционирования гибридного автомобиля может быть реализован различными структурами [4, 8]. Структура в основном определяет надежность проектируемого автомобиля [4, 9]. Оценить структурную надежность отдельных блоков и гибридного автомобиля в целом, а также оценить значимость отдельных блоков в обеспечении надежности гибридного автомобиля составляет актуальную задачу эскизного проектирования, решаемую математическими методами, включая теорию вероятностей, комбинаторику, булеву алгебру, матричное исчисление [2, 3, 7].

1. Постановка задачи. Электрический блок (ЭЛБ) гибридного транспортного средства (ГТС) состоит из электродвигателя/генератора (ЭД/Г), источника – накопителя электрической энергии №1 (аккумуляторной батареи (АКБ)), накопителя электроэнергии №2 (суперконденсатора (СК)), трех полупроводниковых устройств – ключей, управляющих потоками электрической энергии (K_1 , K_2 , K_3). В соответствии с принципом функционирования ГТС по параллельной конфигурации ЭЛБ может находиться в двух основных режимах: режим движения – при котором осуществляется расход электрической энергии АКБ и СК в электродвигателе и режим рекуперации элек-

трической энергии, вырабатываемой генератором с последующим накоплением в СК и АКБ.

Структурные схемы ЭлБ в режимах движения (а) и рекуперации (б) асимметричны и представлены на Рис.1:

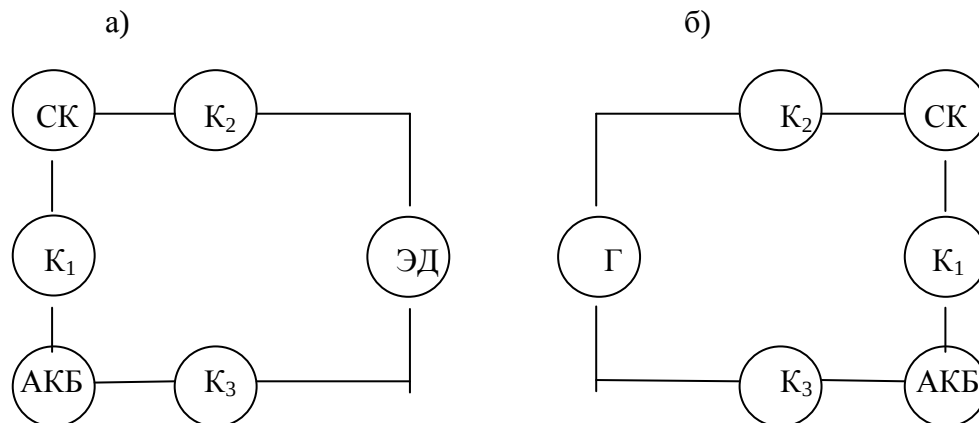


Рисунок 1

ЭлБ в режиме движения состоит из шести независимо работающих элементов: K_1 , K_2 , K_3 , СК, АКБ, ЭД, каждый из которых может находиться в двух состояниях – безотказном (работоспособном):

$$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$$

или неработоспособном (отказном):

$$\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_5, \bar{A}_6.$$

ЭлБ полагается работоспособным – событие A , если электрическая энергия АКБ и СК пройдя в соответствии со структурной схемой, преобразуется ЭД в кинетическую энергию вращательного движения мотор-колеса в условиях, когда отказавшие элементы блокируют (прерывают) поток энергии, т.е. безотказность ЭлБ характеризует его способность обеспечивать подвижность ГТС. Требуется найти вероятность случайного события A – безотказная работа электрического блока, в зависимости от случайных состояний составляющих его элементы, т.е. надежность ЭлБ определяется по классической формуле:

$$R = P(A).$$

2. Матрица состояний. Безотказное состояние каждого элемента и ЭлБ в целом обозначим «1», а отказное – «0». Тогда количество возможных состояний ЭлБ – $U(u_1, u_2, \dots, u_N)$, находятся по формуле:

$$N = 2^6, \text{ т.е. } N = 64,$$

а возможные состояния ЭЛБ находятся с помощью диаграммы состояний, представленной прямоугольной – (6×64) -матрицей состояний [5]:

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}
A_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
A_5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
A_6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	u_{17}	u_{18}	u_{19}	u_{20}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{26}	u_{27}	u_{28}	u_{29}	u_{30}	u_{31}	u_{32}
A_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
A_5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
A_6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	u_{33}	u_{34}	u_{35}	u_{36}	u_{37}	u_{38}	u_{39}	u_{40}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}	u_{45}	u_{46}	u_{47}	u_{48}
A_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
A_5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
A_6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

	u_{49}	u_{50}	u_{51}	u_{52}	u_{53}	u_{54}	u_{55}	u_{56}	u_{57}	u_{58}	u_{59}	u_{60}	u_{61}	u_{62}	u_{63}	u_{64}
A_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
A_4	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
A_5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
A_6	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

3. Структурная надежность в режиме движения. С помощью структурной схемы (Рис. 1 а) и построенной матрицы состояний из

полной группы случайных событий $U(u_1, u_2, \dots, u_{62})$ находятся работоспособные состояния ЭлБ (А):

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	u_{17}	u_{18}	u_{19}	u_{20}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{26}	u_{27}	u_{28}	u_{29}	u_{30}	u_{31}	u_{32}
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	u_{33}	u_{34}	u_{35}	u_{36}	u_{37}	u_{38}	u_{39}	u_{40}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}	u_{45}	u_{46}	u_{47}	u_{48}
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	u_{49}	u_{50}	u_{51}	u_{52}	u_{53}	u_{54}	u_{55}	u_{56}	u_{57}	u_{58}	u_{59}	u_{60}	u_{61}	u_{62}	u_{63}	u_{64}
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Т.е., случайное событие (А) является суммой соответствующих несовместных случайных событий

$$u_j (j=1, 3, 5, 9, 11, 17, 21, 33, 35, 37, 41, 43, 49, 53), \text{ т.е.}$$

$$A = u_1 + u_3 + u_5 + u_9 + u_{11} + u_{17} + u_{21} + u_{33} + u_{35} + u_{37} + u_{41} + u_{43} + u_{49} + u_{53}.$$

Количество работоспособных (безотказных) состояний ЭлБ рассматриваемой структуры в режиме движения ГТС оказалось равным четырнадцати из шестидесяти четырех равновозможных, несовместных, составляющих полную группу случайных состояний. Соответствующая структурная надежность ЭлБ определяется по классической формуле расчета вероятности:

$$R_{str}^a = \frac{14}{64}, \text{ т.е. } R_{str}^a = 0,21875.$$

4. Структурная надежность в режиме рекуперации. Аналогичным методом находится структурная надежность ЭлБ в режиме рекуперации. В режиме рекуперации ЭлБ также состоит из шести независимо работающих элементов: $K_1, K_2, K_3, СК, АКБ, Г$, каждый из которых может находиться в двух состояниях:

1–безотказное (работоспособное) $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$

0–неработоспособное (отказное) $\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_5, \bar{A}_6$.

ЭлБ полагается работоспособным в режиме рекуперации – событие А, если кинетическая энергия вращательного движения преоб-

разуется генератором в электрическую энергию, накапливаемую в СК и АКБ согласно структурной схемы (Рис. 1 б) в условиях, когда отказавшие элементы блокируют (прерывают) поток энергии. Возможные состояния ЭлБ в режиме рекуперации также представляет составленная ранее матрица состояний $-(6 \times 64)$. С помощью структурной схемы (Рис. 1 б) и матрицы состояний находятся работоспособные состояния ЭлБ в режиме рекуперации:

	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	u_{17}	u_{18}	u_{19}	u_{20}	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{26}	u_{27}	u_{28}	u_{29}	u_{30}	u_{31}	u_{32}
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	u_{33}	u_{34}	u_{35}	u_{36}	u_{37}	u_{38}	u_{39}	u_{40}	u_{41}	u_{42}	u_{43}	u_{44}	u_{45}	u_{46}	u_{47}	u_{48}
A	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

	u_{49}	u_{50}	u_{51}	u_{52}	u_{53}	u_{54}	u_{55}	u_{56}	u_{57}	u_{58}	u_{59}	u_{60}	u_{61}	u_{62}	u_{63}	u_{64}
A	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Сравнивая полученные результаты с предыдущими, устанавливаем, что матрицы работоспособных состояний ЭлБ в режимах рекуперации и движения ГТС полностью совпадают. Следовательно, структурная надежность ЭлБ в режимах рекуперации и движения количественно равны, т.е.

$$R_{str}^{\sigma} = R_{str}^a = 0,21875.$$

Выводы. На основе составленной матрицы состояний проведена оценка структурной надежности ЭлБ гибридного автомобиля в режимах рекуперации и движения. Показано, что, в силу асимметричности структурных схем в режимах рекуперации движения соответствующая структурная надежность ЭлБ оказалась количественно равной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем.- М.: «Советское радио», 1973. - 440с.
2. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М.: Наука.- 1988. – 480с.
3. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука. – 1965. – 524с.
4. Канарчук В.Е., Полянський С.К., Дмитрієв М.М. Надійність машин: Підручник. – К.: Либідь, 2003. – 424с.
5. Кравец В.В., Басс К.М., Кравец Вл.В. Надежность автомобиля как сложной технической системы (статика отказов): учебное пособие – Д.: ГВУЗ «НГУ», 2012.- 65с.
6. Ротенберг Р.В. Основы надежности системы водитель-автомобиль-дорога-среда. М.: Машиностроение. – 1986. – 214с.
7. Салуквадзе Г.П. Теоретические основы надежности. М.: - Высш. школа, 1986. – 208с.
8. Хубка В. Теория технических систем: пер. с нем. – М.: Мир, 1987.- 208с.
9. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 304с.

І.С. Дмитрієва, Д.В. Усік

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ УСАМІТНЕНИХ ХВИЛЬ
ПРИ НАТІКАННІ НА БЕРЕГ**

Аннотация. Исследование формирования первоначальной волны, взаимодействие ее с преградами, эволюция при подходе к берегу и накатывание ее на берег.

Ключевые слова: солитон, моделирование движения волны, метод комплексных граничных элементов.

Цунамі найчастіше формується, коли достатньо крупний, але нешкідливий у відкритому океані солітон викидається на берег. Не всі цунамі викликані солітонами, але на думку спеціалістів, більшість цунамі - солітонового походження. Висота солітону в океані звичайно невелика, тому таку плавну хвилю важко відстежити. Однак при підході до берега, солітон вповільнює рух та стає коротше та вище.

Такі хвилі особливо хвилюють сучасних науковців. Найважливішими проблемами, які вивчається сьогодні теорією цунамі, є умови формування початкової хвилі, взаємодія з перешкодами, її еволюція при підході до берега та накат на берег.

Усамітнена хвиля - хвилевий рух, який в кожен момент часу локалізований в кінцевій області простору і досить швидко убиває з віддаленням від цієї області. Просте хвилеве рівняння має вигляд:

$$u_{tt} = c^2 u_{xx} \quad (1)$$

описує плоску одновимірну хвилю, аналогом якої може служити хвиля в струні.

Рішення хвилевого рівняння (1), яке уперше було отримано Ж. Д'Аламбером в 1748 році, має вигляд:

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct). \quad (2)$$

Тут функції f і g знаходять з початкових умов для u [1]. Також активно дослідженням руху усамітненої хвилі займалися Рассел,

Буссинеск, Дидерика Йоганна Кортвега і його учень Густава де Вриз.

На рисунку 1 наведені приклади усамітнених хвиль у різних середовищах. По осі абсцис відкладена змінна $\xi = t - \frac{x}{v}$, де t - час, x - координата, v - швидкість усамітненої хвилі.

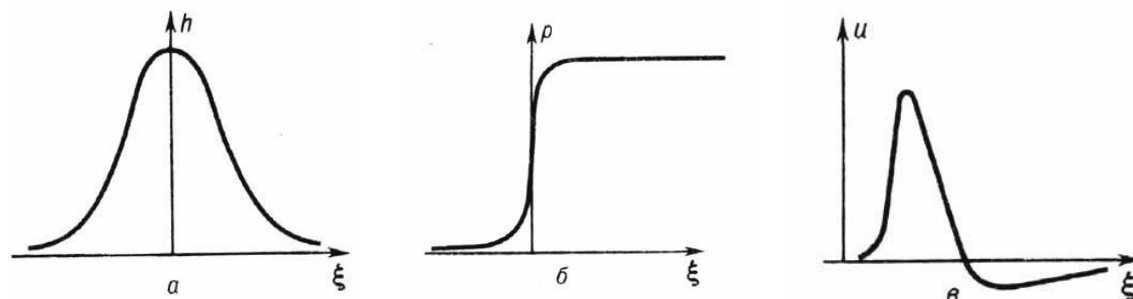


Рисунок 1 – Приклади усамітнених хвиль.

(а - стаціонарне підвищення (солітон) на мілкій воді;

h - зміщення поверхні рідини;

б- ударна хвиля невеликої амплітуди в газі; p - зміна тиску;

в - імпульс збудження в аксоні нерва; u - потенціал мембрани).

Солітон це нелінійна усамітнена хвиля, яка зберігає свою форму і швидкість при власному русі і зіткненні з собі подібними усамітненими хвилями, тобто є стійким утворенням. Єдиним результатом взаємодії солітонів може бути деяке зрушення фаз.

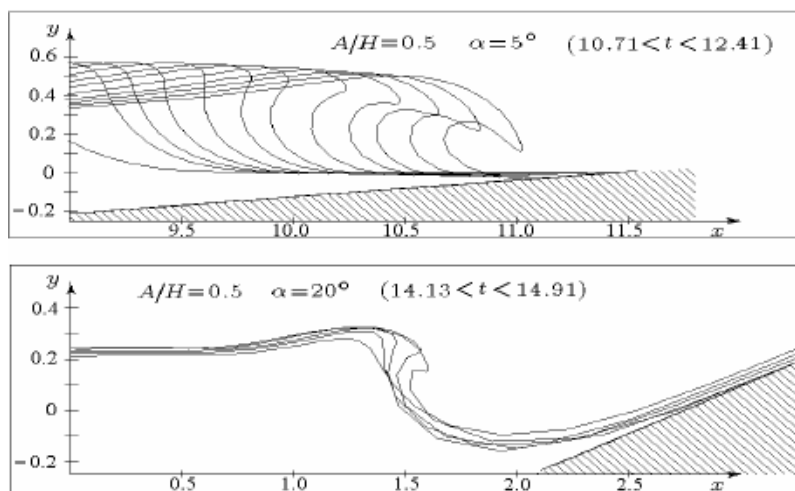
Здатність солітону зберігати при поширенні свою форму незмінною пояснюється тим, що поведінка його визначається двома діючими взаємно протилежно процесами. По-перше, це, так зване, нелінійне укрупнення (фронт хвилі досить великої амплітуди прагне перекинутися на ділянках наростання амплітуди, оскільки задні частки, що мають велику амплітуду, рухаються швидше попереду тих, що біжать). По-друге, проявляється такий процес як дисперсія (залежність швидкості хвилі від її частоти, визначена фізичними і геометричними властивостями середовища; при дисперсії різні ділянки хвилі рухаються з різними швидкостями і хвиля розпливається). Таким чином, нелінійне укрупнення хвилі компенсується її розпливанням за рахунок дисперсії, що і забезпечує збереження форми такої хвилі при її поширенні [2].

В роботі розглядається стійка усамітнена хвиля, що рухається зі швидкістю v , поверхні позбавленої тертя, нестиглої рідини кінце-

вої глибини H . Вільна поверхня знаходиться при постійному тиску і має нульовий поверхневий натяг.

Зроблено дослідження для визначенню максимального запліску хвилі в залежності від її амплітуди та кута нахилу стінки, а також фіксування зміни тиску на перешкоду в процесі нахату хвилі. Виявлено, що для деякого діапазону кутів нахилу перепони накат хвилі супроводжується її перекиданням. У повному обсязі завдання є складним і багатопараметричним, тому всі результати роботи були отримані лише при накаті солітону на похилу стінку тільки для амплітуди A від 0.2 до 0.6 C . В результаті спостережень було одержано різноманітні форми, що виникають, та виявлено чотири зони за типом перекидання в залежності від кута нахилу стінки.

Рішення завдання ґрунтувалося на застосуванні техніки методу комплексних граничних елементів (МКГЕ). Початкове положення вільної поверхні і розподіл потенціалу на ній були отримані на основі рішення стаціонарної задачі про відокремленій хвилі [3]. Контроль точності методу проводився на тестових розрахунках і порівнянні результатів з роботами інших авторів.



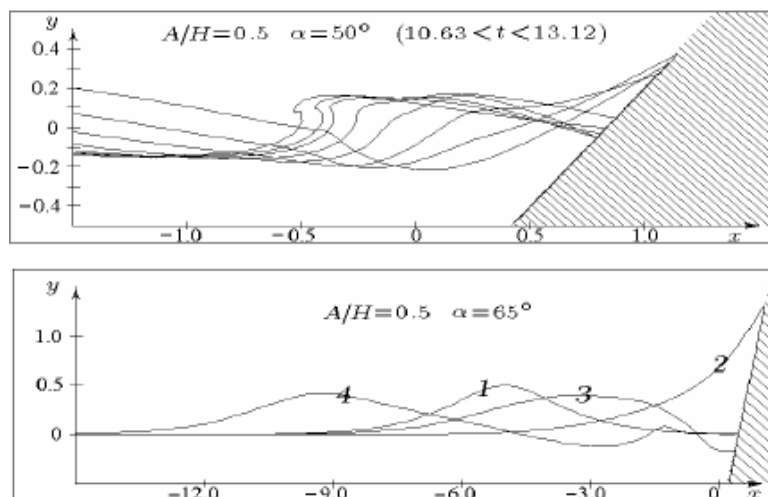


Рисунок 2 – Хвильові картини течії при взаємодії соліона з боковою похилою стінкою

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Н.А. Нелинейные волны и солитоны. Соросовский образовательный журнал, № 2, 1997
2. Новокшенов В. Ю. Введение в теорию солитонов. - Ижевск. Институт компьютерных исследований, 2002
3. Бреббия К. и др. Методы граничных элементов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987

А.А. Журба, А.И. Михалёв, С.И. Губенко

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ

Анотація. В роботі розглядаються поверхні неметалевих включень при пластичній деформації сталі та зміна фрактальних характеристик із збільшенням ступеня їх деформації. Побудовано емпіричні розподіли локальних фрактальних розмірностей неметалічних включень, а також проведений порівняльний аналіз фрактальних характеристик, отриманих класичним і модифікованим алгоритмом BOX COUNTING.

Ключевые слова: пластическая деформация стали, фрактальная размерность, неметаллические включения, фрактальное распределение, фрактальные сигнатуры, глобальное и локальные фрактальные распределения, классический и модифицированный алгоритм box counting.

Введение. Скейлинговое свойство фрактальных объектов обеспечивает постоянство их основных геометрических особенностей при изменении масштаба. К объектам, которые характеризуются фрактальными свойствами, можно отнести и металлические сплавы с неметаллическими включениями [2]. При этом известно [1], что неметаллические включения оказывают существенное влияние на пластичность и деформируемость сталей. В свою очередь, неметаллические включения являются концентраторами напряжений и деформаций. В этой связи представляет интерес исследование фрактальными методами поведения системы включение-матрица при пластической деформации сталей как в случае пластичных так и недеформируемых включений.

Целью данной работы является анализ фрактальных характеристик поверхностей неметаллических включений при пластической деформации стали, полученных классическим и модифицированным алгоритмами Box Counting.

Материалы и методики исследования. В процессе исследования анализировались фотографии поверхностного слоя образцов из

стали 08Ю, содержащей неметаллические включения после горячей деформации прокаткой при температуре 1100°C (рис. 1, 2).

Известно, что поведение неметаллических включений при пластической деформации зависит от их типа, способа деформации, температуры плавления или размягчения, температуры и степени деформации, а также от соотношения физико-механических свойств включения и стальной матрицы, которая в свою очередь определяется температурой. Неметаллические включения, окруженные деформированной стальной матрицей находятся в сложно-напряженном состоянии, определяемом схемами главных напряжений и главных деформаций при обработке стали давлением [1].

Пластичность и сопротивление деформации включений зависят от схемы главных деформаций, которые определяют характер перераспределения недеформируемых включений в пластической матрице и изменение формы пластичных включений в процессе деформирования.

В условиях высоких давлений и температур взаимодействие контактирующих поверхностей включения и матрицы происходит путем установления механического контакта и развития диффузионных процессов. Между включением и стальной матрицей развивается контактное трение, что обусловлено взаимодействием, возникающим в месте их соприкосновения и препятствующим их относительному перемещению.

Включения сульфидов и силикатов, железа, марганца пластически деформируются и с увеличением степени деформации меняют свою форму с компактной на вытянутую в направлении прокатки (рис. 1). Оксидные включения пластически не деформируются, часто хрупко разрушаются и осколки разрушенных включений, увлекаясь пластически деформирующейся стальной матрицей, перераспределяются и образуют строчки в направлении прокатки (рис. 2).

В процессе пластической деформации стали изменяется и ее микроструктурная фрактальная размерность, которая в данном случае интегрально характеризует самоподобность коэрцитивных свойств материала.



Рисунок 1 - Сталь 08Ю. Изменение формы пластичного сульфида при деформации стали 08Ю со степенью деформации ε : а) $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$



Рисунок 2 - Сталь 08Ю. Разрушение недеформируемых оксидных включений при пластической деформации стали 08Ю со степенью деформации ε : а) $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$

В процессе исследований фрактальная размерность микроструктур стали определялась двумя методами: классическим и модифицированным методами BOX COUNTING, которые могут быть применены к изображениям различной структуры и позволяют определить фрактальную размерность не строго самоподобных объектов.

Для оценки фрактальной размерности классическим алгоритмом BOX COUNTING, эвклидово пространство, которое содержит изображение объекта, разделяется сеткой с ячейкой размера r и подсчитываются непустые, занятые исследуемым объектом, квадраты $N(r)$. Далее размер r уменьшается и снова подсчитывается количество непустых полей $N(r)$ (рис. 3а). Наклон графика в логарифмическом масштабе $N(r)$ от $1/r$ соответствует величине размерности (рис. 3б) [2].

При оценке фрактальной размерности модифицированным алгоритмом BOX COUNTING, в классический алгоритм вносится ряд изменений. Эвклидово пространство, которое содержит изображение объекта, разделяется сеткой с ячейкой размера r и подсчитываются непустые, занятые исследуемым объектом, квадраты $N(r)$. При этом непустыми квадратами считаются только те, которые содержат в себе

границу. Дальнейшие действия совпадают с классическим алгоритмом: размер r уменьшается и снова подсчитывается количество непустых полей $N(r)$. Наклон графика в логарифмическом масштабе $N(r)$ от $1/r$ соответствует величине размерности. Сложность реализации этого алгоритма заключается в том, что изображение содержит квадраты полностью окрашенные, которые необходимо учитывать только в том случае, если они являются граничными. Полностью окрашенный квадрат будет считаться граничным, если хотя бы один из соседних квадратов не окрашен (рисунок 4). Отличие значений, полученное для двух алгоритмов, заключается в том, что в зависимости от конфигурации границы, могут быть потеряны квадраты, которые учитывались в классическом алгоритме [3].

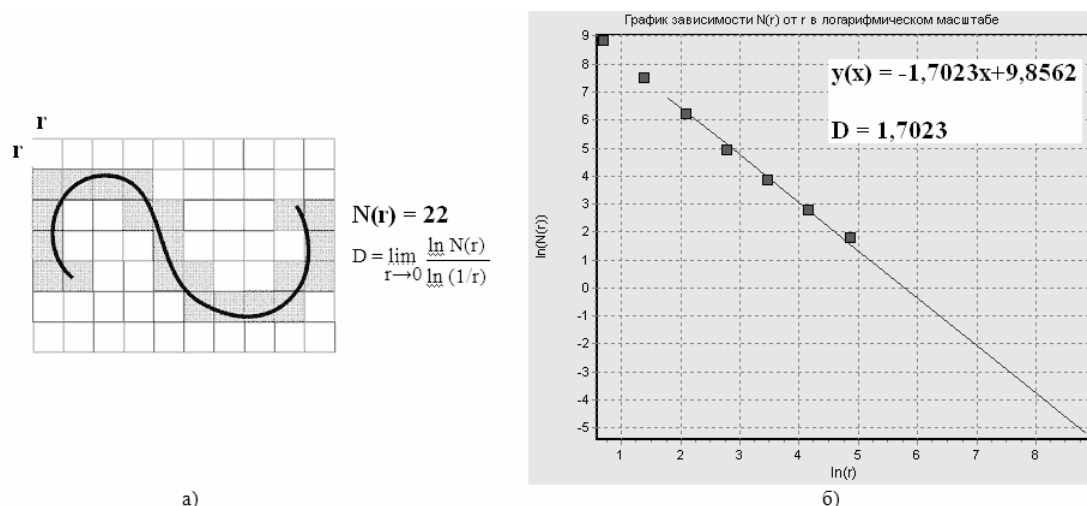


Рисунок 3 - Метод BOX COUNTING: а) пример разбиения изображения поверхности; б) график зависимости $N(r)$ от r в логарифмическом масштабе

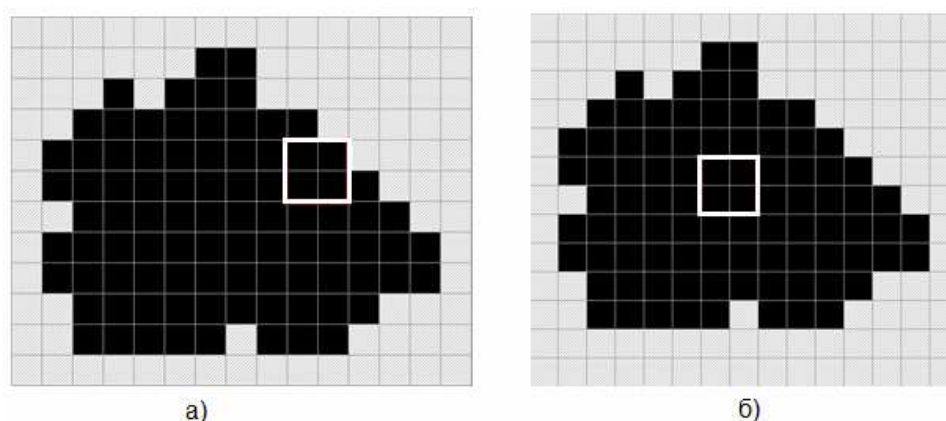


Рисунок 4 - Пример граничного (а) и не граничного (б) квадратов

Для построения фрактальных распределений использовался метод скользящего окна. Данный метод заключается в определении фрактальной размерности в пределах окна, размер которого можно задавать произвольно. Окно попиксельно перемещается по изображению. При этом на каждом шаге производится вычисление фрактальной размерности. Размер окна зависит от масштаба δ и рассчитывается из соотношения $2\delta+1$ [4]. На основании классического и модифицированного алгоритмов строились фрактальные распределения.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе пластической и упругой деформации стали неметаллические включения претерпели ряд изменений. Степень деформации ε : на первой стадии $\varepsilon=10\%$; на второй стадии $\varepsilon=20\%$; на третьей - $\varepsilon=35\%$; на четвертой - $\varepsilon=60\%$. В таблицах 1 и 2 приведены значения классической и модифицированной фрактальной размерности неметаллических включений на четырех стадиях пластической и упругой деформации.

Таблица 1

Изменение величины фрактальной размерности пластичных неметаллических включений в процессе деформации стали

Описание	Степень деформации ε , %	Пластичные включения	
		Фрактальная размерность (классический алгоритм)	Фрактальная размерность (модифицированный алгоритм)
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	10	$D = 1.8567$	$D = 0.9492$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	20	$D = 1.9281$	$D = 0.9548$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	35	$D = 1.9422$	$D = 1.0206$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	60	$D = 1.9455$	$D = 1.0675$

**Изменение величины фрактальной размерности недеформируемых
неметаллических включений в процессе деформации стали**

Описание	Степень деформации ε , %	Недеформируемые включения	
		Фрактальная размерность (классический алгоритм)	Фрактальная размерность (модифицированный алгоритм)
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	10	$D = 1.8093$	$D = 0.8653$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	20	$D = 1.8114$	$D = 0.9157$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	35	$D = 1.8615$	$D = 1.0340$
Сталь 08Ю, горячая деформация прокаткой 1100°C	60	$D = 1.9417$	$D = 1.0412$

Из таблиц 1 и 2 видно, что фрактальная размерность имеет тенденцию к увеличению при увеличении степени деформации. При этом модифицированный алгоритм BOX COUNTING более чувствителен к изменению формы включений.

На рисунках 5, 6 представлены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей неметаллических включений при пластической деформации (по абсциссе отложены значения локальных фрактальных размерностей, по ординате - частота их появлений). При этом слева на рисунках представлены фрактальные распределения, построенные на основании фрактальных размерностей, которые посчитаны классическим алгоритмом BOX COUNTING, а справа - фрактальные размерности, вычисленные модифицированным алгоритмом BOX COUNTING. С другой стороны видно, что более информативными являются фрактальные распределения, построенные на основании размерностей, вычисленных при помощи классического алгоритма BOX COUNTING. Они позволяют увидеть многомодальность и различие характера распределений.

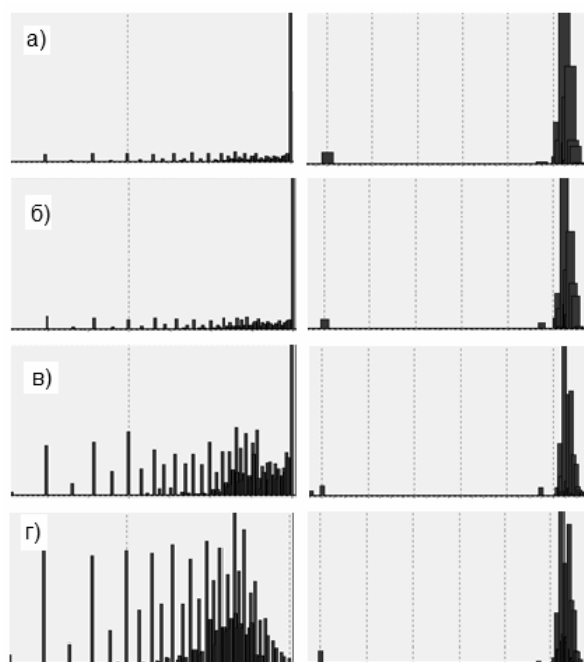


Рисунок 5 - Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей пластичных неметаллических включений при пластической деформации стали (размер скользящего окна 15x15 пикселей), полученных классическим (слева) и модифицированным (справа) алгоритмом BOX

COUNTING: а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$;

б) $\varepsilon = 20\%$; в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$

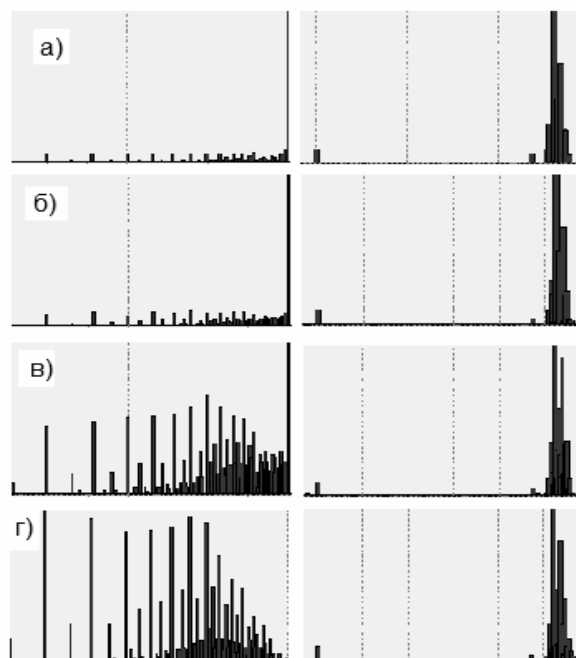
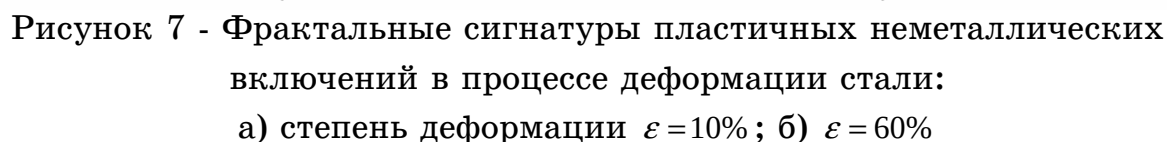


Рисунок 6 - Эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей недеформируемых неметаллических включений при пластической деформации стали (при размере скользящего окна 15x15 пикселей), полученных классическим (слева) и модифицированным (справа) алгоритмом

BOX COUNTING: а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 20\%$;

в) $\varepsilon = 35\%$; г) $\varepsilon = 60\%$



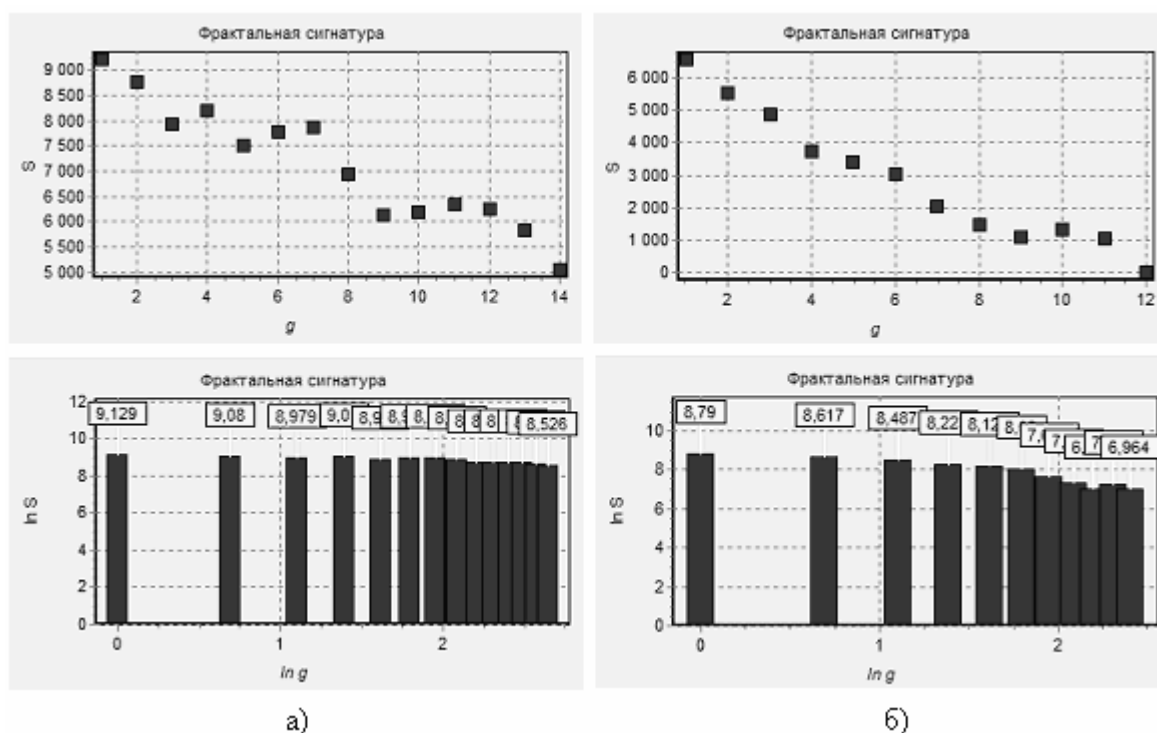


Рисунок 8 - Фрактальные сигнатуры недеформируемых неметаллических включений в процессе деформации стали:

а) степень деформации $\varepsilon = 10\%$; б) $\varepsilon = 60\%$

Выводы

В данной статье были рассмотрены поверхности неметаллических включений при пластической деформации стали и изменение их фрактальных характеристик с увеличением степени деформации. Были построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей неметаллических включений, а также произведен сравнительный анализ фрактальных характеристик, полученных классическим и модифицированным алгоритмом BOX COUNTING. Разработан программный продукт, позволяющий оценивать фрактальную размерность и строить распределение локальных фрактальных размерностей.

В процессе пластической деформации стали изменяется форма неметаллических включений, а, следовательно, и их фрактальная размерность. Выявлено, что значение фрактальной размерности растет с увеличением степени деформации. Значение фрактальной размерности неметаллических включений при пластической деформации стали со степенью деформации $\varepsilon = 60\%$, полученное классическим алгоритмом BOX COUNTING, в среднем на 6% больше фрактальной размерности неметаллических включений при степени деформации

$\varepsilon=10\%$. Для модифицированного алгоритма эта цифра составляет в среднем 15-16%, что говорит о большей чувствительности данного метода к изменению формы включений.

При пластической деформации стали с изменением степени деформации, меняет свое значение не только фрактальная размерность, но изменяется и характер фрактального распределения. Выявлено, что фрактальные распределения, построенные на основании размерностей, вычисленных при помощи классического алгоритма BOX COUNTING, являются более информативными и позволяют увидеть однородность неметаллических включений при степени деформации $\varepsilon=10\%$ и $\varepsilon=20\%$, а также многомодальность при степени деформации $\varepsilon=35\%$ и $\varepsilon=60\%$. Распределения, построенные с помощью модифицированного алгоритма BOX COUNTING, не меняют характер в зависимости от степени деформации.

Построение фрактальной сигнатуры позволяет различать самоподобные объекты и определять размер некоторых элементов, что позволяет оценивать их фрактальную размерность. Оценка фрактальных сигнатур неметаллических включений показала, что при разных степенях деформации стали они различны.

В заключение можно отметить, что модифицированный алгоритм BOX COUNTING целесообразно использовать для определения фрактальной размерности при отслеживании изменений границ объектов, но построение фрактальных распределений на его основе не имеет смысла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губенко С.И., Парусов В.В., Деревянченко И.В. Неметаллические включения в стали. – Д.: АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.
2. Журба А.А., Михалёв А.И., Губенко С.И., Черноиваненко Е.А. Анализ изменений фрактальной размерности и ее распределения в процессе формирования композитной структуры быстрорежущей стали // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4(81). – Дніпропетровськ, 2012. – С.155-164.
3. Журба А.О., Михальов О.І. Особливості визначення фрактальної розмірності методом BOX COUNTING у задачах металознавства // Інформатика та системні науки (ІСН-2012): матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Полтава, 1-3 березня 2012р. – с.109-111.
4. Потапов А.А., Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Пахомов А.А., Потапова В.А.. Новейшие методы обработки изображений. / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, А. И. Тимошкин
**О НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ УСЛОВИЯХ
2 – ПРОВЕРЯЕМОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДВУХКАНАЛЬНОЙ ЛОГИКИ ОТНОСИТЕЛЬНО
ОДИНОЧНЫХ КОНСТАНТНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
ВХОДОВ И ВЫХОДОВ**

Анотация. О необходимых и достаточных условиях 2-проверяемости функциональных элементов двухканальной логики относительно одиночных константных неисправностей входов и выходов.

Ставится проблема существования проверяющего теста длины 2 для функциональных элементов в отношении константных неисправностей их входов и выходов. Проблема рассматривается в отношении двухканальных функциональных элементов. Получены необходимые и достаточные условия 2-проверяемости для функциональных элементов двухканальной логики относительно одиночных константных неисправностей на их входах и выходах.

Ключевые слова: двухканальный функциональный элемент, одиночная константная неисправность, проверяющий тест.

Введение

Разработка и использование математических моделей сложных технических систем, а также методов анализа, синтеза и распознавания составляют теоретическую основу приложения математики в техническом диагностировании, теории управления, проектирования и т.п.

Развитие технической базы, изменение требований к техническим системам и условий их эксплуатации приводят к возникновению новых задач технического диагностирования. Математический аппарат стал необходимым средством тестирования, разработки контролепригодных схем и повышения контролепригодности технических систем.

С ростом сложности цифровых устройств и систем обеспечение их контролепригодности становится одной из важнейших задач про-

цесса проектирования и производства этих устройств и систем. К настоящему времени выявлены два альтернативных подхода к проблеме улучшения показателей контролепригодности:

1) контролепригодное проектирование – организация контрольных точек и LSSD-цепей в готовых проектах схем, а также их модификация;

2) синтез контролепригодных схем – обеспечение контролепригодности на ранних этапах проектирования.

Существенными недостатками многочисленных обособленных друг от друга методов контролепригодного проектирования [1-9] являются их малая эффективность и отсутствие достаточно точного прогнозирования результата. Эти недостатки обусловлены тем, что контролепригодное проектирование не позволяет в полной мере применять мощный аппарат дискретной математики.

Именно при втором подходе к проблеме улучшения показателей контролепригодности возможно широкое внедрение математических моделей и методов, необходимость которого подчеркивалась в работе [10]. Второй подход позволяет изначально задавать такие важнейшие показатели контролепригодности, как длина контрольного (проверяющего) теста, трудоемкость его построения и полнота контроля этим тестом.

Общая постановка задачи

Среди различных концепций второго подхода видное место занимает концепция синтеза S – контролепригодных функциональных элементов и схем из них (т.е. функциональных элементов и схем, обладающих проверяющим тестом постоянной длины, не зависящей от их сложности).

В работах [11-20] рассматриваются условия существования проверяющих тестов заданной длины, в том числе проверяющих тестов минимально возможной длины (длины 2), для функциональных элементов относительно константных неисправностей на их входах и выходах. Данные условия являются достаточными условиями существования проверяющих тестов заданной длины, но не являются необходимыми. Следовательно, эти условия сформулированы для частных случаев.

Очевидно, что всесторонний подход к проблеме разработки математических моделей и методов построения контролепригодных ци-

фровых схем требует поиска более общих условий, а именно необходимых и достаточных условий существования проверяющих тестов определенных (заданных) длин для функциональных элементов, включая длины, близкие к минимально возможной, и минимально возможную длину. Таким образом, актуальной является следующая задача. Задан класс I константных неисправностей на входах и выходах функциональных элементов. Требуется определить необходимые и достаточные условия существования проверяющего теста длины 2 для любого функционального элемента относительно данного класса неисправностей. Функциональный элемент, обладающий проверяющий тестом длины 2 относительно этого класса неисправностей в дальнейшем будем называть 2-проверяемым.

На протяжении ряда лет существует устойчивый интерес разработчиков интегральных микросхем к принципам организации самосинхронизирующихся схем и, в частности, к использованию парафазных кодов [21-28]. В связи с этим целесообразно рассмотреть поставленную задачу для случая функциональных элементов двухканальной логики.

Основное содержание

Пусть имеется множество U функциональных элементов двухканальной логики, каждый из которых имеет $2n$ входов, два выхода $\hat{y}, \bar{y}$ и реализует систему булевых уравнений

$$\begin{aligned} y &= f^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, \dots, x_n, \hat{x}_n) \\ \bar{y} &= \bar{f}^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, \dots, x_n, \hat{x}_n) \end{aligned}$$

либо систему булевых уравнений

$$\begin{aligned} y &= \bar{f}^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, \dots, x_n, \hat{x}_n) \\ \bar{y} &= f^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, x_2, \hat{x}_2, \dots, x_n, \hat{x}_n) \end{aligned}$$

При этом функции $f^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, \dots, x_n, \hat{x}_n)$ и $\bar{f}^{\varepsilon}(x_1, \hat{x}_1, \dots, x_n, \hat{x}_n)$ существуют образом зависят от всех своих $2n$ различных аргументов. Необходимые и достаточные условия 2 – проверяемости функционального элемента F из U относительно одиночных константных неисправностей на его входах и выходах дает следующая теорема:

Теорема 1. Функциональный элемент двухканальной логики F из U обладает проверяющим тестом длины 2 относительно одиночных константных неисправностей на входах и выходах тогда и только тогда, когда существуют входные вектора $b_1 = (\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)$, где для каждого $i \in \{1, \dots, n\}$ $\beta_i^1, \hat{\beta}_i^1, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2 \in \{0, 1\}$, удовлетворяющие следующим условиям:

$$(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(\forall \beta \in \{0, 1\})$$

$$\begin{aligned} & \left| \sum_{s=1}^2 \left(f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right) \right| + \\ & + \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| > \\ & > 0 \ \& \ \sum_{s=1}^2 \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \beta, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| + \\ & + \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \beta, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} f^\varepsilon(b_1) &\neq f^\varepsilon(b_2) \\ \hat{f}^\varepsilon(b_1) &\neq \hat{f}^\varepsilon(b_2) \end{aligned} \quad (2)$$

Доказательство. Для обнаружения любой константной неисправности $\beta \in \{0, 1\}$ на каком либо входе из произвольной пары входов (i, i) двухканального функционального элемента $F \in U$ проверяющим тестом длины 2 необходимо существование по крайней мере одной пары входных векторов $b_1 = (\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)$, где $\beta_i^1, \hat{\beta}_i^1, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2 \in \{0, 1\}$, такой, что

$$\begin{aligned} & (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(\forall \beta \in \{0, 1\}) \{ (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \neq f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)) \vee \\ & \vee (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \neq \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)) \vee (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \neq \\ & f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)) \vee (\hat{f}_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \neq \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)) \} \text{ и} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(\forall \beta \in \{0, 1\})\{(f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^1, \beta_1^1, \dots, \beta_n^1, \beta_n^1) \neq f^\varepsilon(\beta_1^1, \beta_1^1, \dots, \beta_n^1, \beta_n^1)) \vee \\
& \vee (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^1, \beta_1^1, \dots, \beta_n^1, \beta_n^1) \neq f^\varepsilon(\beta_1^1, \beta_1^1, \dots, \beta_n^1, \beta_n^1)) \vee (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^2, \beta_1^2, \dots, \beta_n^2, \beta_n^2) \neq \\
& f^\varepsilon(\beta_1^2, \beta_1^2, \dots, \beta_n^2, \beta_n^2)) \vee (f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^2, \beta_1^2, \dots, \beta_n^2, \beta_n^2) \neq f^\varepsilon(\beta_1^2, \beta_1^2, \dots, \beta_n^2, \beta_n^2))\}
\end{aligned}$$

Для определенности будем считать, что на пару входов i и $\hat{i}$ подается пара сигналов x_i и $\hat{x}_i$. При этом если сигнал x_i поступает на вход i , а $\hat{x}_i$ – на вход $\hat{i}$, то $(\forall s \in \{1, 2\})$

$$\begin{aligned}
& \{f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s)\}
\end{aligned}$$

Если сигнал x_i поступает на вход $\hat{i}$, а $\hat{x}_i$ – на вход i , то $(\forall s \in \{1, 2\})$

$$\begin{aligned}
& \{f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s), \\
& f_{i/\beta}^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s) = f^\varepsilon(\beta_1^s, \beta_1^s, \dots, \beta_i^s, \beta_i^s, \dots, \beta_n^s, \beta_n^s)\}
\end{aligned}$$

Следовательно, независимо от способа подачи сигналов x_i и $\hat{x}_i$ на входы i и $\hat{i}$ необходимо чтобы для b_1 и b_2 выполнялось условие

$$\begin{aligned}
& (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(\forall \beta \in \{0, 1\}) \{ \left| f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) - f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \hat{\beta}_i^1, \dots, \right. \\
& \left. \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) - f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \hat{\beta}_i^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^2, \right. \\
& \left. \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) - f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta, \hat{\beta}_1^2, \dots, \right. \\
& \left. \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) - f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \right| > 0 \} \& \left(\left| f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \beta, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) - \right. \right. \\
& \left. \left. - f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \hat{\beta}_i^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \beta, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) - f^\varepsilon(\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_i^1, \right. \right. \\
& \left. \left. \hat{\beta}_i^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \beta, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) - f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \right| + \right. \\
& \left. + \left| f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \beta, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) - f^\varepsilon(\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_i^2, \hat{\beta}_i^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2) \right| > 0 \} \right\}
\end{aligned}$$

или условие

$$(\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})(\forall \beta \in \{0, 1\})$$

$$\begin{aligned}
& \left\{ \sum_{s=1}^2 \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| + \right. \\
& \left. + \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| \right\} > \\
& > 0 \& \sum_{s=1}^2 \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \beta, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \right. \\
& \left. \hat{\beta}_n^s) \right| + \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \beta, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \right. \\
& \left. \hat{\beta}_n^s) \right| > 0 \}
\end{aligned}$$

Кроме этого для обнаружения любой константной неисправности $\beta \in \{0, 1\}$ на выходах $y, \hat{y}$ функционального элемента $F \in U$ тестом из двух рассматриваемых векторов b_1 и b_2 необходимо чтобы

$$(f^\varepsilon(b_1) \neq f^\varepsilon(b_2)) \& (f^\varepsilon(\hat{b}_1) \neq f^\varepsilon(\hat{b}_2))$$

Действительно, предположим противное, т.е. что из двух данных неравенств хотя бы одно не выполняется. Пусть для определен-

ности на выходе функционального элемента $F \in U$ формируется выходной сигнал $f^\varepsilon(x_1, \hat{x}_1, \dots, x_n, \hat{x}_n)$, а на выходе $\hat{y}$ – выходной сигнал $\hat{f}^\varepsilon(x_1, \hat{x}_1, \dots, x_n, \hat{x}_n)$. Тогда если $f^\varepsilon(b_1) = f^\varepsilon(b_2)$, то неисправность $y / \beta = f^\varepsilon(b_1)$ не будет обнаруживаться тестом, состоящим из векторов b_1 и b_2 . Если $\hat{f}^\varepsilon(b_1) = \hat{f}^\varepsilon(b_2)$, то неисправность $\hat{y} / \beta = \hat{f}^\varepsilon(b_1)$ не будет обнаруживаться тестом из векторов b_1 и b_2 . Таким образом, необходимость условий (1) – (2) доказана. Достаточность условий (1) – (2) очевидна. Теорема доказана.

Следствие 1. Если функциональный элемент двухканальной логики $F \in U$ проверяем двумя векторами $b_1 = (\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)$, относительно одиночных константных неисправностей на входах и выходах, то $\beta_i^1 \neq \beta_i^2, \hat{\beta}_i^1 \neq \hat{\beta}_i^2$ для $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Доказательство. Пусть имеется противное предположение, т.е. существует пара входов $(i, \hat{i})$ функционального элемента $F \in U$ такая, что для подаваемых на входы этой пары сигналов x_i и $\hat{x}_i$ на входных векторах b_1 и b_2 выполняется равенство $\beta_i^1 = \beta_i^2$ либо равенство $\hat{\beta}_i^1 = \hat{\beta}_i^2$. Тогда

$$\sum_{s=1}^2 \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| +$$

$$+ \left| \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| = 0$$

если неисправность $\beta \in \{\beta_i^1, \beta_i^2\}$ и $\beta_i^1 = \beta_i^2$, или

$$\sum_{s=1}^2 \left| f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - f^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| +$$

$$+ \left| \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \hat{\beta}_{i-1}^s, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \beta_{i+1}^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) - \hat{f}^\varepsilon(\beta_1^s, \hat{\beta}_1^s, \dots, \beta_i^s, \hat{\beta}_i^s, \dots, \beta_n^s, \hat{\beta}_n^s) \right| = 0$$

если неисправность $\beta \in \{\hat{\beta}_1^1, \hat{\beta}_1^2\}$ и $\hat{\beta}_1^1 = \hat{\beta}_1^2$.

Следовательно, функциональный элемент F двухканальной логики не является проверяемым двумя векторами $b_1 = (\beta_1^1, \hat{\beta}_1^1, \dots, \beta_n^1, \hat{\beta}_n^1)$ и $b_2 = (\beta_1^2, \hat{\beta}_1^2, \dots, \beta_n^2, \hat{\beta}_n^2)$. Получено противоречие. Следовательно, противное предположение неверно и $\beta_i^1 \neq \beta_i^2, \hat{\beta}_i^1 \neq \hat{\beta}_i^2$ для любой пары входов (i, i) , где $i \in \{1, \dots, n\}$. При этом очевидно, что $\beta_i^1 = \bar{\beta}_i^2, \beta_i^2 = \bar{\beta}_i^1$ и $\hat{\beta}_i^1 = \bar{\hat{\beta}_i^2}, \hat{\beta}_i^2 = \bar{\hat{\beta}_i^1}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сформулированных условий проверяемости функциональных элементов двухканальной логики двумя векторами относительно одиночных константных неисправностей могут быть разработаны различные методы синтеза легко тестируемых и самоконтролирующихся схем. Представляют интерес также условия проверяемости двумя векторами цифровых функциональных элементов из других классов, а также схем из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беннеттс Р.Дж. Проектирование тестопригодных логических схем: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 176с.
2. Меренков А.М., Панфилов А.П. Проектирование БИС со встроенными средствами тестирования и самотестирования. – М.: Препринт МИФИ, 1989. – 24 с.
3. Убар Р. Проектирование контролепригодных дискретных систем. – Т.: Издательство Таллиннского политехнического института, 1988. – 68 с.
4. Feng S., Malaiya. Optimization of test parallelism with limited hardware overhead// Microelectronics and Reliability, v.31, №2/3, 1991. – p. 271-276.
5. Ha D.S., Reddy S.M. On the design of pseudo-exhaustive testable PLA's// IEEE Trans. on computers, v.37, №4, 1988. – p. 468 - 472.
6. Oosdikj S., Beenker F., Thijssen L. A model for test-time reduction of scan testable circuits// Proceedings of 2-nd European Test Conference, Munich, 1991. – p. 243-252.
7. Pradhan D., Nori S., Swaminathan I. A methodology for partial scan design// Proceedings of 2-nd European Test Conference, Munich, 1991. – p. 263-271.

8. Reddy S.M., Ha D.S. A new approach to the design of testable PLA's// IEEE Trans. on computers, v.C-36, №2, 1987. – p. 201-211.
9. Schwederski T., Buchner T., Leenstra I., Roos G., Spaanenburg L. Built – In pad test with boundary scan// Proceedings of 2-nd European Test Conference, Munich, 1991. – p. 385-392.
10. Твердохлебов В.А. Логические эксперименты с автоматами. – С.: Издательство Сарат. ун-та, 1988. – 184с.
11. Горяшко А.П. Некоторые результаты теории синтеза легко тестируемых схем// Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. №2,-1982.- с.139-150.
12. Варданян В.А. Об одном методе синтеза легко тестируемых схем// Автоматика и телемеханика. №7,-1987.- с.136-139.
13. Шевченко В.И. Синтез схем с минимальной трудоёмкостью тестирования//VII Всесоюзная. конференция «Проблемы теоретической кибернетики». Тез. докл. Ч.1, Иркутск, 1985.-с.202-203.
14. Hayes J.P. On realization of Boolean functions requiring a minimal or near minimal numbers of test// IEEE Trans. on computers. №6, 1971, p. 1506-1513.
15. Lombardi F., Huang W.K. Fault detection and design complexity in C-testable VLSI arrays // IEEE Trans. on computers, v.39, №12, 1990, p.1477-1481.
16. Saluja K.K., Reddy S.M. On minimally testable logic networks // IEEE Trans. on computers, №5, 1974, p.552-554.
17. Huang W.K., Lombardi F. On the constant diagnosability of baseline interconnection networks // IEEE Trans. on computers, №12, 1990, p.1485-1488.
18. Hayes J.P. On modifying logic networks to improve their diagnosability// IEEE Transactions on computers, №1, 1974.-p.56-63.
19. La Paugh A.S., Lipton R.J. Total fault testing using the bipartite transformation//International Test Conference, 1983.-p.428-434.
20. Vergis A., Steiglitz K. Testability conditions for bilateral arrays of combinational cells.//IEEE Transactions on computers, Vol. C-35, N1, 1986.- p.13-22.
21. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах/ Под ред. В.И.Варшавского. – М.: Наука, 1986. – 400с.
22. Ангер С. Асинхронные последовательностные схемы: Пер. с англ./ Под ред. П.П.Пархоменко. – М.: Наука, 1977. – 400с.
23. Аperiодические автоматы/ Под ред. В.И.Варшавского. – М.: Наука, 1976. – 424с.
24. Варшавский В.И., Мараховский В.Б., Песчанский В.А., Розенблюм Л.Я. О возможности реализации асинхронного интерфейса, использующего самосинхронизирующий код с идентификатором// Автоматика и вычислительная техника, №5, 1981. – с.84-88.

25. Варшавский В.И., Розенблюм Л.Я., Таубин А.Р. Полностью самопроверяемые асинхронные комбинационные схемы и свойство индицируемости// Автоматика и телемеханика, №5, 1982. – с.138-146.
26. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Дискретные автоматы с обнаружением отказов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 112с.
27. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самопроверяемый фиксатор ошибок для парафазных сигналов// Автоматика и телемеханика, №2, 1992. – с.197-199.
28. Corsini P. Self-synchronising asynchronous arbiter//Digital Processes, v.1, №1, 1975. – p. 67-73.

СОДЕРЖАНИЕ

Баюл К.В., Петренко В.И.

Разработка экспертной системы принятия оптимальных решений, обеспечивающих увеличение ресурса эксплуатации бандажей валковых прессов 3

Борзов С.А., Журавлев В.Н.

Анализ эффективности методов обнаружения процесса вибрационного горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей 12

Гожий О.П., Кобилінський І.А.

Дослідження ефективності методів аналізу співвідношень при вирішенні задач багатоцільового вибору 21

Guda A.I., Mikhalyov A.I.

Chaotic system with relay hysteresis in return force: simulation and analysis 30

Зайцев В.Г.

Причины и следствия в процессах самоорганизации 36

Капитонов А.Г.

Компьютерная система обработки кулоноэлектростатических кривых сложных электрохимических систем 42

Прокопчук Ю.А.

Модель рефлексивного агента в контуре управления сложным технологическим процессом 47

Стадник Н.И.

Системы управления современными горными машинами 55

Чумаков Л.Д.

Выбор величины гарантийного срока для технического устройства при его разработке 66

Біляєва В.В., Грибанова А.В.

Розрахунок нестационарних граничних умов на стінках конструкцій за експериментальними замірами температури 71

Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Ткач М.О.

Дослідження проблеми підбору компонентів модульної багатопроекторної системи в задачі термічної обробки металовиробу 78

Великонская Н.М., Величко В.В., Стогний Ю.Д., Мешалкин А.П.,**Бабенко А.В.**

Перспективы использования комбинированных способов извлечения редких и рассеянных металлов из золотшлаковых отходов 93

Перескока В.В., Камкина Л.В., Анкудинов Р.В., Стомба Я.В.,**Колбин Н.А.**

Распределение компонентов системы «Металл-Шлак-Газ» при получении низкокремнистого ферросилиция 106

Куцова В.З., Тимошина М.И., Носко О.А., Тимошина Г.Г.

Влияние термообработки и легирования на свойства монокристаллического кремния.....	115
Матвеева М.О., Климович Б.В., Климович В.В., Дворникова Е.А.	
Симплексный метод оптимизации при литье чугунов с заданным комплексом свойств.....	124
Сарафаннікова Н.В.	
Планування технічного завдання для виробництва молочних продуктів.....	132
Сергеева О.В., Пивоваров А.А.	
Проблемы моделирования плазмохимических процессов газ-жидкость	139
Фролова Л.А., Пивоваров О.А., Бутырина Т.Е.	
Моделирование цветообразования шпинельных пигментов.....	146
Хамхотько А.Ф, Белькова А.И., Циватая Н.А., Скачко А.С., Лихачев Ю.М.	
Информационное обеспечение задач прогнозирования свойств щелочесодержащих шихтовых материалов доменной плавки	155
Кравец В.В., Басс К.М., Кравец Вл.В.	
Структурная надежность электрического блока гибридного автомобиля	161
Дмитрієва І.С., Усік Д.В.	
Дослідження поведінки усамітнених хвиль при натіканні на берег	167
Журба А.А., Михалёв А.И., Губенко С.И.	
Анализ фрактальных характеристик неметаллических включений при пластической деформации стали.....	171
Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Тимошкин А.И.	
О необходимых и достаточных условиях 2 – проверяемости функциональных элементов двухканальной логики относительно одиночных константных неисправностей входов и выходов	181

РЕФЕРАТЫ

УДК 622.788.32: 621.777.06.083.133

Баюл К.В., Петренко В.И. **Розробка експертної системи прийняття оптимальних рішень, що забезпечують зростання ресурсу експлуатації бандажів валкових пресів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.3 - 11.

Розроблено експертну систему для оптимізації умов експлуатації бандажів валкових пресів, за допомогою якої реалізується комплексний підхід до вирішення задач з визначення раціональних режимів роботи бандажів на різних стадіях їх зносу з врахуванням багатofакторності процесів брикетування дрібнофракційних шихт та зношування бандажів.

Бібл. 1.

УДК 621.452.3

Борзов С.А., Журавльов В.Н. **Аналіз ефективності методів виявлення процесу вібраційного горіння в камерах згоряння газотурбінних двигунів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.12 - 20.

У статті досліджуються існуючі у наявності сучасні методи виявлення процесу вібраційного горіння у вузлах камер згоряння газотурбінних двигунів. Виконується усебічний аналіз «сильних» та «слабких» сторін кожної з груп цих методів. Надається стислий опис фізичної моделі вібраційного горіння. Розглядаються фізичні характеристики віброгоріння як у основних, так і у форсажних камерах згоряння. Докладно розглядаються особливості застосування різноманітних методик. Надані результати експериментальних вимірів вібрацій корпусу камери згоряння. Показана різниця між газотурбінним двигунами наземного застосування та авіаційними газотурбінним двигунами, та причини виникнення вібраційного горіння в їх камерах згоряння.

Бібл. 8.

УДК 519.6

Гожий О.П., Кобилінський І.А. **Дослідження ефективності методів аналізу співвідношень при вирішенні задач багатоцільового вибору** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.21 - 29.

В статті розглянуто методи вирішення багатоцільових задач на основі методу аналізу співвідношень. Було розглянуто особливості побудови співвідношень та точок відліку для методів MULTIMOORA, та MULTIMOORA-FG. Наведені результати порівняння методів

Бібл 14.

УДК 681.876.2

Гуда А.И., Михалёв А.И. **Хаотическая система с релейным гистерезисом в восстанавливающей силе: моделирование и анализ** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.30 - 35.

Статья посвящена задаче моделирования квазигармонической динамической системы, с нелинейной возвращающей силой, представленной релейным гистерезисом. Исследованы различные режимы и влияние параметров системы.

Библ: 6. илл: 5.

УДК 681.513.8

Зайцев В.Г. **Причини та наслідки в процесах самоорганізації** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.36 - 41.

Анотація. Досліджуються умови, що мають місце у процесах самоорганізації: нелінійність, нестійкість, незворотність, випадковість, детермінізм. Наведені приклади показують, які твердження Г. Хакена та І. Пригожина можливо є наслідками, а які є причинами синергетичних процесів.

Бібл. 12.

УДК 004.9:518.5

Капітонов О.Г. **Комп'ютерна система обробки кулоноstaticких кривих складних електрохімічних систем** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.42 - 46.

В рамках уточненої математичної моделі релаксації потенціалу в кулоноstaticких умовах розроблена методика відновлення імпедансного спектра об'єкту, що вивчається. Методика реалізована на базі комп'ютерної системи та апробована на реальних електрохімічних процесах.

Бібл. 3.

УДК 519+61:681.3

Прокопчук Ю.О. **Модель рефлексивного агента в контурі керування складним технологічним процесом** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.47 - 54.

У роботі приводиться математична модель рефлексивного агента, призначеного для керування складними системами та технологічними процесами. Дано опис процесу формування «моделі миру» і «особистої поведінки» рефлексивного агента. Розглядаються варіанти збіжності рефлексивного процесу.

Бібл. 7.

УДК 681.51.002.5

Стаднік Н.І. **Системи управління сучасними гірськими машинами** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.55 - 65.

Особливістю гірничих машинного покоління є істотне зростання енергозброєності, впровадження частотно-регульованого привода переміщення вугільних комбайнів (як вбудованого так і винесенного на штрек), двошвидкісних електродвигунів для приводу потужних лавних конвеєрів, а також впровадження багатофункціональних систем управління нового покоління на мікропроцесорній техніці з високим рівнем діагностики і безперервної реєстрації режимів роботи машин.

У статті приведені функціонально-структурні схеми і принципи функціонування систем.

Перетворювач частоти призначений для управління двигунами різання і переміщення з виконанням усіх необхідних пристроїв захисту і блокування, а також для регулювання

по заданому алгоритму частоти обертання вбудованих двигунів переміщення. Перевагою перетворювача є те, що для його живлення уперше застосована напруга 1140В без знижувального трансформатора, при цьому діапазон зміни вихідної частоти - від 2,5 до 150 Гц. Схемно-технічні і конструктивні рішення, закладені в перетворювачі, дозволили значно зменшити габарити вітчизняних очисних комбайнів порівняно з іноземними аналогами. Перетворювач і його інформаційна компонента конструктивно інтегровані в корпус вугільного комбайна і використовуються в приводі переміщення.

Системи управління двовидкісними лавними скребковими конвеєрами реалізують модульний принцип побудови.

Для організації ремонтно-профілактичних і ремонтно-відновних робіт на сучасному технічному рівні з урахуванням фактичного і прогнозного(залишкового) ресурсу гірничої машини розроблено блок реєстрації подій, що сталися, фіксування основних параметрів режимів роботи машини, хронологію подій, їх зберігання з часом накопичення даних - 5 років і тому подібне.

Бібл. 5.

УДК 519.2:658.8

Чумаков Л.Д. **Выбор величины гарантийного срока для технического устройства при его разработке** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.66 - 70.

Обсуждаются вопросы выбора величины гарантийного срока эксплуатации для технического устройства на этапе его разработки. 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, изучая зависимость спроса от величины гарантийного срока, можно оценить повышение прибыли.

Библ. 3, илл. 1

УДК 536.2:539.3

Біляєва В.В., Грибанова А.В. **Розрахунок нестаціонарних граничних умов на стінках конструкцій за експериментальними замірами температури** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.71 - 77.

Теоретичним шляхом отримано розв'язок зворотної задачі теплопровідності. Для розрахунку використовувались метод регуляризації, операційний метод та метод степеневих рядів. За експериментальними замірами температури відновлені граничні умови на стінках конструкції (температура поверхні, тепловий потік і коефіцієнт тепловіддачі).

Библ.7, Рис.3.

УДК 004.032.24

Иващенко В.П., Швачич Г.Г, Ткач М.А. **Исследование проблемы подбора компонентов модульной многопроцессорной системы в задаче термической обработки металлоизделия** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.78 - 92.

Статья посвящена исследованию проблемы согласования возможностей процессоров и сетевого интерфейса в многопроцессорных вычислительных системах. Основное

внимание уделяется исследованию эффективности и ускорению вычислений для решения задачи термической обработки металлоизделия за счет применения многопроцессорных вычислительных систем. Выведены аналитические соотношения для получения оптимального числа узлов многопроцессорной системы через ее параметры.

Библ. 13, ил. 4, табл. 2.

УДК 622.7

Великонська Н.М., Величко Н.М., Стогній Н.М., Мішалкін А.П., Бабенко О.В.

Перспектививикористаннякомбінованихспособіввилученнярідкихтарозсіяних металівіз золошлакових відходів // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.93 - 105.

Виконано аналіз золошлакових відходів, що утворюються при спаленні енергетичних вуглів та встановлено можливий вміст германію, галію та скандію. Проведений термодинамічний аналіз поведінки цих металів у водних розчинах соляної та сірчаної кислот. Встановлені значення рН і Е існування іонних форм елементів, що вивчалися, при різних температурах.

Бібл. 15, табл. 1, іл. 7.

УДК 669.15'782.9-198

Перескока В.В., Камкіна Л.В., Анкудінов Р.В., Стовба Я.В., Колбін М.О. **Розподіл компонентів системи «метал-шлак-газ» при одержанні низькокремністого феросиліцію** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.106 - 114.

Виконан аналіз перспективних матеріалів (хвостів збагачення і розкривної породи) для отримання низькокремністого феросиліцію. Проведен порівняльний аналіз матеріального балансу отримання феросиліцію з базових шихтових матеріалів та з використанням вторинних матеріалів. Обґрунтована поведінка елементів і їх сполук в відновлювальних умовах при одержанні заданого продукту при виконанні термодинамічного моделювання.

Бібл.12, іл.3, табл.6.

Удк 621.315.592.3

Куцова В.З., Тимошина М.І., Носко О.А., Тимошина Г.Г. **Вплив термообробки і легування на властивості монокристалічного кремнію** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.115 - 123.

У роботі проведений розрахунок енергії зв'язку і зарядової щільності кремнію при легуванні двома домішками. Показаний вплив термообробки на мікроструктуру і мікротвердість кремнію, легованого В, Sn, Ge, Hf, Zr, В+мо, Na, W, Na+W. Для виготовлення транзисторів розроблені способи термічної обробки підкладок кремнію, що дозволило підвищити вихід придатної продукції.

Бібл. 4, Іл. 5, Табл. 1.

УДК 621.74:669.131.2:669.131.4

Матвеева М.О., Климович Б.В., Климович В.В., Дворнікова Е.А. **Симплексний метод оптимізації при лиття чавуну з заданим комплексом властивостей** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.124 - 131.

У дослідженнях підтверджена доцільність застосування математичного планування експерименту для підвищення економічної та наукової ефективності досліджень по визначенню впливу окремих легуючих елементів та їх поєднання на комплекс механічних і експлуатаційних властивостей виливків. Для вивчення комплексного впливу Cr і Ti на структуру та властивості чавунів застосоване симплексне планування експерименту, у результаті встановлено поле оптимального вмісту легуючого комплексу для виливків, що поєднують задані твердість, щільність, корозійну та жаростійкість. Склади сплавів, що розроблені рекомендується використовувати для деталей пресс-форм скло переробних машин, елементів плунжерних пар машин для лиття під тиском, деталей коксохімічного обладнання та інше.

УДК 62-503,56

Сарафанникова Н.В. **Планирование технического задания для производства молочных продуктов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.132 - 138.

Рассматриваются пути решения проблем связанных с управлением производством молочных продуктов. Предложено управление производством рассматривать комплексно и одной из первых решать задачу оптимального планирования технического задания. Освещена возможность представить задачу оптимизации планирования технического задания в виде задачи линейного программирования, которая решена симплекс-методом. Рекомендуется предложенную методику расчёта оптимального плана включать в систему автоматизированного управления предприятием.

Библ. 6, ил. 1, табл.2.

УДК 519

Сергеева О.В., Пивоваров А.А. **Проблемы моделирования плазмохимических процессов газ-жидкость** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.139 - 145.

В данной работе рассмотрены вопросы моделирования плазмохимических процессов в системе газ-жидкость.

Библ. 20.

УДК 666.291

Фролова Л.А., Пивоваров О.А. Бутиріна Т.Є. **Модельювання кольороутворення пігментів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.146 - 154.

За допомогою експериментальних досліджень встановлений вплив катіонів хромофорів і термообробки на кольороутворення в системі Al-Co-Fe-O, що дозволяє надалі виконувати цілеспрямований синтез пігментів синьої, червоної і жовтої колірної гами.

Бібл. 12, іл.4, табл.2.

УДК 669.162.262:002.55.001.8

Хамхотько А.Ф, Белькова А.І., Цівата Н.О., Скачко О.С., Лихачов Ю.М. **Інформаційне забезпечення задач прогнозування властивостей луговмісних шихтових матеріалів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.155 - 160.

З метою забезпечення АСУТП доменної плавки засобами оперативної оцінки металургійних властивостей залізорудних матеріалів, актуалізована база даних «Залізорудні ма-

теріали» банка даних «Металургія» відомостями про властивості луговмісних агломератів і окатишів. Розвинені моделі для прогнозування властивостей луговмісних залізрудних матеріалів і вивчено вплив K₂O на їх температури початку і кінця розм'якшення.

Бібл. 10, іл. 2.

УДК629.114.53; 658.562

Кравець В.В., Басс К.М., Кравець Вл.В. **Структурна надійність електричного блоку-гібридний автомобіль** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.161 - 166.

Проводиться оцінка структурної надійності електричного блоку гібридного автомобіля в результаті аналізу можливих станів системи, складових повну групу рівновозможних, неспільних випадкових подій.

УДК 519.688-550.344.094

Дмитриева И.С., Усик Д.В. **Исследование поведения уединенной волн при натекающих на берег** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.167 - 170.

Исследование формирования первоначальной волны, взаимодействия ее с преградами, эволюция при подходе к берегу и накатывание ее на берег.

УДК 530.1

Журба А.А., Михалёв А.И., Губенко С.И. **Анализ фрактальных характеристик неметаллических включений при пластической деформации стали** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.171 - 180.

В работе рассматриваются поверхности неметаллических включений при пластической деформации стали и изменение фрактальных характеристик с увеличением степени их деформации. Построены эмпирические распределения локальных фрактальных размерностей неметаллических включений, а также произведен сравнительный анализ фрактальных характеристик, полученных классическим и модифицированным алгоритмом BOX COUNTING.

УДК 519.714

Іващенко В.П., Швачич Г.Г., Тимошкін А.І. **Про необхідні та достатні умови 2-перевіряємості функціональних елементів двоканальної логіки відносно одиночних константних несправностей входів та виходів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (85). - Днепропетровск, 2013. - с.181 - 190.

Виникає проблема існування перевіряючого тесту довжини 2 для функціональних елементів у відношенні константних несправностей їхніх входів та виходів. Проблема розглядається у відношенні двоканальних функціональних елементів. Отримані необхідні та достатні умови 2-перевіряємості для функціональних елементів двоканальної логіки відносно одиночних константних несправностей на їхніх входах та виходах.

Ключові слова: двоканальний функціональний елемент, одиночна константна несправність, перевіряючий тест.

Бібл. 28.

UDK 622.788.32: 621.777.06.083.133

Baiul K.V., Petrenko V.I. **Development of expert system of optimal solutions that increase resource of exploitation of pressing rings of roller presses** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.3 - 11.

Developed an expert system to optimize the operating conditions of pressing rings of roller presses, which is implemented using an integrated approach to solving problems by definition rational modes of exploitation of pressing rings in various stages of its wear, considering processes of briquetting charge materials and wearing of pressing rings.

Bibl. 1.

UDC 621.452.3

Borzov S.A., Zhuravlev V.N. **Analysis of the effectiveness of methods of detection of vibration combustion process in the combustion chambers of gas turbine engines** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.12 - 20.

The article is research available in industry modern methods for disclosure process of vibrocombustion in the combustion chamber units of gas turbine engines. Comprehensive analyse of "weak" and "strong" spots for each methods is perform. The brief description of vibrocombustion as physical model is represented. Examine physical characteristics vibrocombustion as for main combustion chambers and so for afterburners. Consider in detail about peculiarity of application of different methodics. Published the experimental results of vibration measurements for combustion chamber casing. The difference between land based gas turbo engines and aviation gas turbo engines and causes of arising of the vibrocombustion in their combustion chamber units are shown.

Bibl. 8.

UDK 519.6

Gozhyi O., Kobylinskii I. **The effectiveness analysis methods analysis of ratios in solving problems multi-objective choice** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.21 - 29.

In Article considered solutions to multi-task on the basis of correlation analysis methods. It considers the characteristics of building relationships and points of reference for methods MULTIMOORA, and MULTIMOORA-FG. The results of the comparison methods.

Bibl 14.

UDC 681.876.2

Guda A.I., Mikhalyov A.I. **Chaotic system with relay hysteresis in return force: simulation and analysis** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.30 - 35.

This article is devoted to problem of simulation of semi-harmonic dynamic system, with non-linear return force, presented by relay hysteresis. Different modes of operation are researched. Influences of system parameters are investigated.

Bibl: 6. ill: 5.

UDK 681.513.8

Zaytsev V.G. **Causes and effects in self-organization processes** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.36 - 41.

Conditions which characterize self-organization processes are investigated: nonlinearity, instability, irreversibility, accident uses up a determinism. It is shown that from them it is possible to carry to the reasons, and that to consequences of synergetic processes.

Bibl. 12.

UDC 004.9:518.5

Kapitonov A.G. **Computer system for coulостatic data processing of complex electrochemical systems** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.42 - 46.

Within the framework of advanced mathematical model of the potential relaxation under coulостatic conditions a method for EIS spectra reconstruction was proposed. The method was realized on the base of computer system and was tested on real electrochemical systems.

Bibl. 3.

UDC 519+61:681.3

Prokopchuk Iu.A. **Model of a reflexive agent in the control loop of a complex engineering process** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.47 - 54.

This paper presents a mathematical model of a reflexive agent designed for controlling complex systems and engineering processes. The process of the formation of a "world model" and the "inherent behavior" of the reflexive agent are described. Reflective process convergence types are considered.

Bibl. 7.

UDC 681.51.002.5

Stadnik N.I. **Management system with modern mining machines** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.55 - 65.

The feature of mountain machines of new generation is a существенный height of energized, introduction of the frequency-managed привода moving of coal combines (both built-in and вынесенного on a drift), twospeed electric motors for the drive of powerful главных conveyers, and also introduction of multifunction control system of new generation on a microprocessor technique with the high level of diagnostics and continuous registration of the modes of operations of machines

To the article functionally-structural charts and принципы functioning of the systems are driven .

The transformer of frequency is intended for a management by the engines of реза-ния and serves with implementation all necessary защит and blocking, and also for adjusting on the set algorithm of frequency of rotation of built-in engines of serve. Dignity of transformer is that for his feed tension of 1140В is first applied without a step-down transformer, here a turn-down of output frequency is from 2,5 to 150 Hertz. The Scheme-technical and structural decisions stopped up in a transformer allowed considerably to decrease the sizes of home cleansing combines by comparison to foreign analogues. A transformer and his informative component are structurally integrated in the corps of coal combine. Control system twospeedглавными scraper conveyers will be realize module principle of construction.

For organization of repair-prophylactic and repair-restoration works at modern technical level taking into account the actual and prognosis(remaining) resource of mountain machine раз-работан block of registration of happening events, fixative the basic parameters of the modes of operations of machine, chronology of events.

Bibl. 5.

UDC 519.2:658.8

Chumakov L.D. **The choice of the warranty period for the technical device in its development** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.66 - 70.

Questions of warranty period choice for technical device during its working out are discussed. The method is convenient because when you select the optimal value of the warranty period defined the price of the product, the volume of production, costs of warranty service. We can estimate the increase in profits by improving the processes of design and production, changes in fixed and variable costs, product quality, analysis of the dependence of demand on the size of the warranty period.

Bibl. 3, ill. 1.

УДК 536.2:539.3

Bilyaeva V.V., Grybanova A.V. **The calculation of unsteady boundary conditions on the walls of construction accordint to the measurements of the temperature** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.71 - 77.

We solve the inverse problem of heat conduction is obtained theoretically. We used the regularization method, the operating method and the power series method for the calculation. The boundary conditions on the walls construction (surface temperature, heat flux and heat transfer coefficient) are restored from experimental measurements of the temperature.

Lib.7, Pic.3.

UDK 004.032.24

Ivashchenko V.P., Shvachich G.G., Tkach M.A. **Research of problem of selection of components of the module multiprocessor system is in the task of heat treatment of metal products** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.78 - 92.

The article is devoted to investigation of problem of matching the possibilities of processors and the network interface in the multiprocessor computer systems. The main attention is concentrated on investigating the efficiency and acceleration of calculations for solving the problem of heat treatment of metal products due to application of the multiprocessor computer systems. Analytical correlations for getting the optimum number of knots in the multiprocessor system through parameters of the latter had been introduced.

Bibl. 13, ill. 4, table. 2.

UDK 622.7

Velikonskaya N.M., Velichkom, Stogniy Yu.D., Meshalkin A.P., Babenko A.V. **Prospects of using the combined method of extracting the rare and scattered metals from ash-slag waste** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.93 - 105.

Analysed the composition of ash-slag waste from combustion of steam coal and determined the possible content of germanium, gallium and scandium. Analysed the thermody-

dynamic of the behavior of these metals in aqueous solutions of hydrochloric and sulfuric acids. The values of pH and E of existence ionic forms of elements was studied at different temperatures.

Bibl. 15, Tabl. 1, ill. 7.

UDK 669.15'782.9-198

Pereskoka V.V., Kamkina L.V., Ankudinov R.V., Stovba Y.V., Kolbin N.A. **Distribution of system components "metal-slag-gas" for getting low-silicon ferrosilicon** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.106 - 114.

Tailings and overburdens were considered as promising materials for getting low-silicon ferrosilicon. Comparative analysis of material balance of getting ferrosilicon from basic charge materials with application of secondary materials was held. Behavior of elements and their compounds in reduction conditions for getting the given product at thermodynamic modeling implementation was substantiated.

Bibl.12, ill.3, tabl.6.

UDK 621.315.592.3

Kutsova V.Z., Timoshina M.I., Nosko O.A., **Timoshina G.G. Influence of heat treatment and alloying on properties of single-crystal silicon** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.115 - 123.

Calculation of the binding energy and the charge density of silicon doped with impurities was carried out by two. Effect of heat treatment on a microstructure and microhardness of silicon after alloying B, Sn, Ge, Hf, Zr, V+mo, Na, W, Na+W was researched. Means of heat treatment of silicon backing for making transistors were developed. This will increase the production of suitable products.

Ref. 4, Pic. 5, Tabl. 1

UDC 621.74:669.131.2:669.131.4

Matveeva M.O., Klimovich B.V., Klimovich V.V., Dvornikova E.A. **Simplex optimization methods for cast iron with a given set of properties** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.124 - 131.

In the present study confirmed the feasibility of mathematical planning of the experiment To increase the efficiency of the economic and scientific research by definition the effect of individual alloying elements and their combination tions to complex mechanical and performance properties of the castings. To study the combined effect of Cr and Ti on the structure and properties of cast irons used Simplex design of experiments, as a result of established field of optimal set-alloy castings for combining specified hardness, density, corrosion and heat resistance. Designed alloy compositions It is recommended to use for parts steklovyrabaty mold-ing machines, elements plunger machines for injection molding parts coking equipment, etc.

UDC 62-503,56

Sarafannikova N.V. **Planning of requirement specification for the production of suckling products** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.132 - 138.

The ways of decision of problems are examined related to the management by the production of suckling products. A management offers to examine a production complex and one of the first to decide the task of the optimal planning of requirement specification. Possibility to present the task of optimization of planning of requirement specification as a task of the linear programming, that is decided by simplex-method, is presented. It is recommended to plug an offer methodology of calculation of optimal plan in the system of the automated management an enterprise.

Bibl. 6, pic. 1, table.2.

UDK 519

Sergeyeva O.V., Pivovarov A.A. **Problems of modeling plasma-chemical processes of gas-liquid** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.139 - 145.

This paper deals with modeling of plasma-chemical processes in the gas-liquid

Bibl. 20.

UDK 666.291

Frolova L.A., Pivovarov O.O., Butyrina T.E. **Modeling coloration of spinel pigments** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.146 - 154.

With the help of experimental studies found influence of cations of chromophores and heat treatment on the color development of the system Fe-Al-Co-O, that allows in the future to perform purposeful synthesis of pigments blue, red and yellow colors.

Bibl. 12 il.4, Table 2.

UDK 669.162.262:002.55.001.8

Hamhotko A.F., Belkova A.I., Tsivata N.A., Skachko A.S., Likhachev Y.M. **Informational support of the forecasting problems of charge materials properties, containing alkalis** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.155 - 160.

In order to provide APCS of blast furnace smelting by means of rapid assessment of the iron ore materials metallurgical properties, data base "Iron ore materials" of data bank "Metallurgy" is actualized by information about the agglomerates and pellets metallurgical properties, containing alkali. Models for predicting of iron ore materials properties, containing alkalis are developed and the K₂O effect on their start and end softening temperature are studied.

Bibl. 10, ill. 2.

UDK629.114.53; 658,562

Kravets V.V., Bass K.M., Kravets K.M. **Structural reliability of the electrical unithybrid vehicle** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.161 - 166.

The estimation of the structural reliability of the electric power hybrid vehicle by analyzing the possible states of the system, are the entire group of equally, incompatible random events.

UDC 519.688, 550.344.094

Dmitrieva I.S., Usik D.V. **Research conduct solitary waves at sinters ashore** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.167 - 170.

Study pervonachalnoy generating waves, vzay-modeystvye ee s prehradamy, Evolution at the approach to the shore and nakaty-tion uh ashore.

UDC 530.1

Zhurba A.A., Mikhalev A.I., Gubenko S.Y. **Performance analysis fraktalnih nemetallycheskyh included with plastic deformation steel** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.171 - 180.

In this paper the surface of non-metallic inclusions during plastic deformation of steel and fractal characteristics change with increasing the degree of deformation are considered. Constructed empirical distributions of local fractal dimensions of nonmetallic inclusions, and provided comparative analysis of fractal characteristics of the classic and the modified algorithm BOX COUNTING.

UDK 519.714

Ivashchenko V.P., Shvachych G.G, Timoshkin A.I. **About necessary and sufficient conditions of two-testability for dual-link functional elements in respect of single stuck-at faults on their inputs and outputs** // System technologies. N 2(85) - Dnipropetrovsk, 2013.- P.181 - 190.

The problem of the existence of fault detection test of the length of two for functional elements in respect of stuck- at faults on their inputs and outputs is raised. This problem is considered in respect of dual-link functional elements. The necessary and sufficient conditions of two-testability for dual-link functional elements in respect of single stuck- at faults on their inputs and outputs have been obtained.

Keywords: dual-link functional element, single stuck-at fault, fault detection test.

Bibl. 28.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Баюл Константин Васильевич - кандидат технических наук, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Петренко Валентина Ивановна - Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Борзов Сергей Анатольевич - руководитель бригады жаровых труб отдела камер сгорания. Ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс».

Журавлев Владимир Николаевич – к.т.н., ведущий конструктор отдела приводов. ГП «Ивченко-Прогресс».

Гожий Александр Петрович - кандидат технических наук, доцент, декан факультета компьютерных наук Черноморского государственного университета им. П.Могила.

Кобилінський Ігор Андрійович - магістр, асистент, факультет комп'ютерних наук Черноморського державного університету ім. П.Могили.

Гуда А.І. – к.т.н, доц. каф ІТС НМетАУ.

Михальов О.І. – д.т.н, проф., зав. каф. ІТС НМетАУ.

Зайцев В.Г. - к.ф.-м.н. Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара.

Капітонов Олександр Георгійович - доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет».

Прокопчук Юрий Александрович - старший научный сотрудник, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ.

Стадник Николай Иванович - доктор технических наук, доцент. Донецкий национальный технический университет, профессор кафедры горных машин.

Чумаков Лев Дмитриевич - ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет».

Беляева Виктория Витальевна - к.т.н., доцент, кафедра аэрогидромеханики и энергомассопереноса, Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара.

Грибанова Анна Владимировна – аспирантка, кафедра аэрогидромеханики и энергомассопереноса, Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара.

Іващенко В.П. – д.т.н. проф., Національна металургійна академія України.

Швачич Г.Г. - Національна металургійна академія України.

Ткач М.О. - Національна металургійна академія України.

Великонская Наталья Михайловна - ст.преподаватель кафедры ТМП и ОХ, НМетАУ.

Величко Валерий Васильевич - к.х.н., доц.кафедры ТМП и ОХ, НМетАУ.

Стогний Юлия Дмитриевна - к.т.н., доцент кафедры ТМП и ОХ, НМетАУ.

Мешалкин Анатолий Павлович - к.т.н., доц.кафедры ТМП и ОХ, НМетАУ.

Бабенко Александр Викторович - к.т.н., доц.кафедры ТМП и ОХ, НМетАУ.

Перескока Виктория Викторовна - ассистент каф. ТМП и ОХ, НМетАУ.

Камкина Людмила Владимировна - д.т.н., проф., зав. каф. ТМП и ОХ, НМетАУ.

Анкудинов Руслан Валентинович - к.т.н., доц. каф. ТМП и ОХ, НМетАУ.

Стовба Яна Валерьевна - к.т.н., доц. каф. ИЭ и ОТ, НМетАУ.

Колбин Николай Алексеевич - к.т.н., доц. каф. ТМП и ОХ, НМетАУ.

Куцова Валентина Зиновьевна - зав. каф. материаловедения Национальной металлургической академии Украины, д.т.н., профессор.

Тимошина Маргарита Игоревна - доцент каф. «Технологии материалов электроники» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», к.т.н.

Носко Ольга Анатольевна - доцент каф. материаловедения Национальной металлургической академии Украины, к.т.н.

Тимошина Галина Георгиевна - доцент каф. «Технологии материалов электроники» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», к.т.н.

Матвеева М.О. – д.т.н., проф. Национальной металлургической академии Украины.

Климович Б.В. - Национальная металлургическая академия Украины.

Климович В.В. - Национальная металлургическая академия Украины.

Дворникова Е.А. - Национальная металлургическая академия Украины.

Сарафаннікова Наталя Вікторівна – к.т.н., доцент, Херсонський національний технічний університет, кафедра технічної кібернетики.

Сергеева Ольга Вячеславовна – к.т.н., доцент кафедры специализированных компьютерных систем УГХТУ.

Фролова Лілія Анатоліївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри ТНРтаЕ, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

Пізоваров Олександр Андрійович – д.т.н., професор, зав. кафедри ТНРтаЕ, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

Бутиріна Тетяна Євгенівна – к.х.н., доцент кафедри ТНРтаЕ, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

Хамхотько Анатолий Федорович - к.т.н., старший научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Белькова Алла Ивановна - к.т.н., старший научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Циватая Наталья Александровна - инженер 1-й категории отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Скачко Александр Сергеевич - ведущий инженер отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Лихачев Юрий Михайлович – научный сотрудник отдела физико-химических проблем металлургических процессов, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины.

Кравец Виктор Владимирович – д.т.н., профессор ДВНЗ «НГУ».

Басс Константин Маркович – к.т.н., доцент ДВНЗ «НГУ».

Кравец Владимир Викторович – к.т.н., доцент ДНУЗТ.

Дмитриева Ирина Сергеевна - к.т.н, доцент кафедры ИТС, Национальная металлургическая академия Украин.

Усик Дмитрий - магистр кафедры ИТС, Национальная металлургическая академия Украины.

Журба Анна Олексіївна – Національна металургійна академія України, асистент кафедри Інформаційних технологій і систем.

Губенко Світлана Іванівна – Національна металургійна академія України, кафедра матеріалознавства ім. Ю.Н. Тарана-Жовніра, д.т.н., проф.

Тимошкин А.И. - Национальная металлургическая академия Украин.