

А.В. Баглай, В.В. Веренев

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВИБРОПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СМЕЖНЫХ ПРОКАТНЫХ КЛЕТЯХ**

*Аннотация. Представлен сравнительный анализ результатов измерений переходных процессов в трех смежных черновых клетях стана 1680, отличающихся техническим состоянием по износу сочленений. Показано, что путем сравнения вибропараметров, измеряемых на идентичных участках линий привода можно давать оценку технического состояния оборудования.*

*Ключевые слова: вибрация, момент, линия привода, прокатная клеть, диагностика.*

При разработке систем технической диагностики одна из важных задач состоит в разработке методов и правил определения состояния оборудования по результатам измерений. Для машин и механизмов с постоянной частотой вращения такие методы разработаны и успешно используются на практике. Во многом они основаны на спектральном и корреляционном анализе записей измерений, на сравнении с допускаемыми значениями вибрации и др.

В прокатных станах кроме стационарного вращения линии главного привода существенно проявляются динамические процессы во время захвата полосы валками. На их уровень влияют зазоры в сочленениях последовательной линии передачи момента: хвостовик валка – шпиндель – шестеренный валок – зацепление муфт и редуктора, а также в подшипниковых опорах. В связи с этим актуально знание состояния не только подшипников, но и износ сочленений в крутильной системе, что может быть установлено по данным измерений только во время захвата полосы.

Поставленная задача состоит в разработке метода анализа общего состояния оборудования крутильной системы линии привода и тенденции его изменения путем сравнения вибродинамических процессов в смежных клетях прокатного стана.

Одним из первых, кто показал влияние износа сочленений и образующихся из-за этого угловых зазоров в прокатных станах был С.Н. Кожевников. Экспериментально это подтверждено результатами измерений в 1959–60 гг. момента сил упругости в клетях непрерывного широкополосного стана 1680 металлургического комбината "Запорожсталь" [1]. Тогда же С.Н. Кожевниковым и его школой был фактически разработан метод определения зазора в шпиндельном сочленении. Его суть состоит в том, что путем математического моделирования переходного процесса при захвате полосы валками подбирается такая величина зазора, при которой вид переходного процесса по частоте и величине максимального пикового момента совпадают с результатами измерений или весьма близки к ним. Такой подход к опосредованному диагностированию успешно применялся при исследовании многих станов. Однако, отсутствие на станах штатных измерителей механического момента на шпинделях или промежуточном валу не позволяет применять данный метод.

В последние два десятилетия существенно возросли интерес и потребность в расширении количества узлов и точек, в которых измеряются вибропараметры в прокатных клетях. Накоплен опыт совместного измерения крутящего момента с помощью бесконтактной системы передачи с вращающегося вала сигнала, разработанный Е.Я. Подковыриным [2], и вибрации в нескольких точках [3–5]. Анализ результатов измерений показал существенное подобие переходных процессов в этих сигналах. Это дало основание разработать новый подход к процессу диагностирования технического состояния оборудования линий главного привода прокатных клетей. Рассмотрим результаты одновременных измерений момента сил упругости на промежуточном валу между двигателем и редуктором и виброперемещения в нескольких точках корпусного оборудования вдоль линий привода черновых клетей № 1, 2 и 3 стана 1680 (рис.1). В период ударного нагружения при захвате полосы валками момент сопротивления, распространяющийся вдоль линии от валков к двигателю, представляет собой силовой параметр, на который оборудование откликается в виде вибрационного переходного процесса. Поэтому естественно, что при увеличении износа и зазоров в крутильной системе линии и подшипниковых опорах зубчатых колес динамические нагрузки по моменту и амплитуде вибраций также возрастают. Воспользуемся из-

вестными данными записей в агрегатных журналах. В клетки № 1 установлены шпиндели с новыми бронзовыми вкладышами. К моменту измерений их наработка составила 5 суток. Время работы шпинделей в клетях № 2 и 3 составило соответственно 27 и 93 суток. Поэтому естественно считать, что техническое состояние линий привода всех трех клеток, прежде всего шпиндельного участка, было различным.

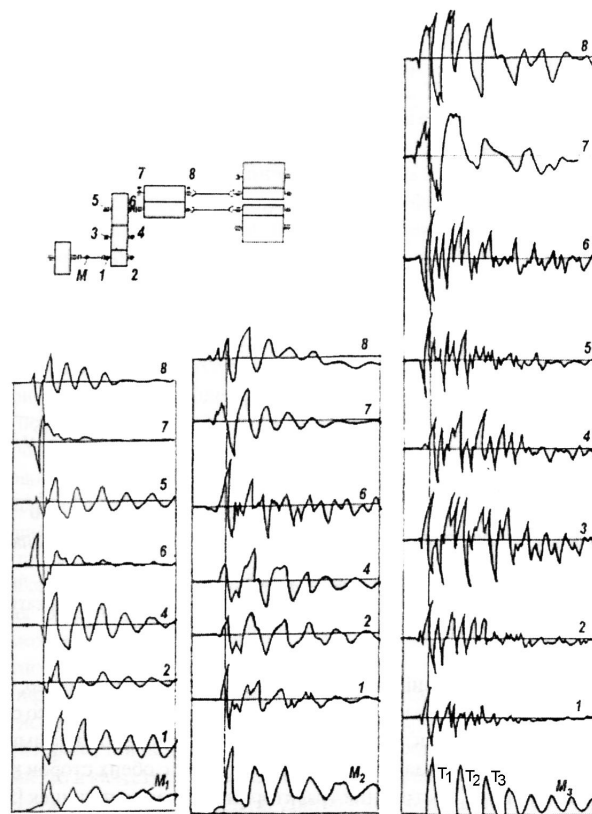


Рисунок 1 - Переходные процессы в оборудовании клеток 1, 2, 3 ста-  
на 1680 при захвате полосы валками. Точкам 1, 2...8 у кривых соот-  
ветствует виброперемещение корпуса редуктора и шестеренной клетки,  
М - момент сил упругости

С учетом этих знаний дадим анализ переходных процессов и их параметров. В клетки № 1 колебания момента с частой 19 Гц затухают в течение 0,5 с. В точках 1, 2, 4, 5 наблюдается аналогичный одночастотный затухающий процесс. Отметим, что составляющие более высоких частот отсутствуют. В точках 7 и 8 шестеренной клетки и точках 5, 6 колеса редуктора следовало ожидать совпадение процессов ввиду их симметрии. Однако этого не происходит. Можно полагать, что здесь процесс смягчается из-за действия на цапфы колеса и нижнего шестеренного валка массивной промежуточной муфты.

В подшипниковых опорах клетки № 2 в целом наблюдаются аналогичные затухающие колебания, равные или близкие по частоте колебаниям момента. Стало заметным наложение на вибрацию редуктора составляющей с более высокой частотой. Характер вибрации крышки шестеренной клетки в точках 7 и 8 идентичен моменту.

По сравнению с клетями № 1 и 2 колебания момента в клетке № 3 носят специфический характер: после первых 2–3-х пиков момент кратковременно падает до нуля. Это означает, что вал, на котором расположен измеритель момента, в этих промежутках не передает момент из-за разрыва силового контакта между зубьями (размыкания зазора) быстроходной шестерни и колеса (центра) редуктора. Какое-то время зубья шестерни и колеса движутся в поле зазора. Последующие его замыкания, отмеченные вторым и третьим пиком момента, приводят к ударному взаимодействию в зацеплении редуктора, что отражается на вибрации корпуса с высокой частотой его собственных колебаний. Результаты математического моделирования показывают, чем больше износ бронзовых вкладышей (угловой зазор) в шпиндельном сочленении и зубьев, тем больше динамическая составляющая момента и длительней размыкание зубчатого зацепления. Ввиду этого появляется высокочастотная составляющая вибрации крышки редуктора.

Отметим одну общую особенность, касающуюся времени распространения крутильного ударного импульса от шестеренной клетки к двигателю. Его можно определять по началу реакции датчиков. Из рис. 1 видно, что первыми начинают подавать сигнал датчики 7, 8 на крышке шестеренной клетки. Затем наблюдается тенденция последовательного увеличения времени запаздывания реакции. Позднее всех наступает реакция момента на промежуточном валу. Согласно работе [2] это время несет важную информацию о состоянии участков линии привода.

Кинематические схемы главных линий и редукторов рассматриваемых клеток идентичны. Отличие состоит в передаточных отношениях и массе (моменте инерции) колес. По динамическим свойствам системы близки (частота собственных колебаний момента составляет 14–19 Гц). Поэтому есть основания утверждать, что из-за ухудшения технического состояния (по износу) участков линии привода система от нормального (клеть № 1) через промежуточное (клеть № 2)

переходит в состояние с повышенным уровнем высокочастотной вибрации, подобно клетки № 3. Безусловно, сам факт, что наработка шпиндельного участка клетки № 3 наибольшая, позволяет считать, что из трех клеток ее техническое состояние в рассматриваемый период оказывается наихудшим. Однако измерения и анализ вибрационного поля без измерения момента позволяют существенно углубить познание состояния узлов линии привода.

На основании опыта экспериментальных измерений момента сил упругости и вибраций в клетях других широкополосных станов разработаны логические правила анализа вибрации в контрольных точках, способствующие распознаванию ТС по измерениям виброперемещения, как интегрального показателя переходных режимов.

1. Предполагается, что после капитального ремонта клеток стана и установки шпинделей с новыми бронзовыми вкладышами оборудование находится в наилучшем техническом состоянии, назовем его нормой (Н). Признаком этого является то, что переходные процессы в контрольных точках имеют вид явно выраженных затухающих колебаний, как это наблюдается в клетки № 1. В базе данных их параметры (частота, период, время затухания колебаний, максимальный размах) и вид с привязкой к дате и объему ремонтного обслуживания хранятся в качестве базовых или исходных.

2. Все следующие периодические измерения в идентичных точках вдоль линии привода сравнивают с базовыми параметрами: частота и длительность колебаний, максимальный размах (амплитуда) сигнала, период между первыми двумя пиками. При этом каждый раз из агрегатных журналов записываются даты и содержание текущих ремонтов, замены оборудования, время наработки после ремонта шпинделей, шестеренной клетки и редуктора. Сравнение ведется также между смежными клетями.

3. Появление на некотором этапе работы клетки в переходный период захвата полосы валками высокочастотной составляющей в одном или нескольких сигналах указывает на следующие момент.

а. Если время наработки шпинделей и редуктора сравнительно небольшое (менее 10–20 суток, в течение которого не могло произойти существенного износа зубчатых зацеплений и подшипниковых опор), следует предположить, что произошло ослабление затяжки

болтов крепления. Это особенно верно для случаев, когда высокая частота проявляется в одной-двух точках.

б. Если высокая частота начинает проявляться одновременно во всех точках редуктора и его наработка превышает 50 суток, можно сделать вывод о начале проявления износа зубчатых зацеплений.

в. Появление систематической высокочастотной составляющей во всех сигналах редуктора с заметно увеличившейся амплитудой подобно клетки № 3 указывает на существенный износ зубьев. Происходит размыкание их контакта, образование зазора и последующее его ударное замыкание. Повышенная частота составляющей вибрации в 2–4 раза превышает частоту колебаний момента. В вибросигнале проявляется частота колебаний момента – периоды  $T_1$ ,  $T_2$ . В клетки № 3, ко времени измерений наработка редуктора составила 9,5 месяцев.

4. Анализу подвергается разность времен запаздывания реакции различных виброточек. Например, в клетки № 1 разность  $\Delta t_{65} = 7$  мс, в других клетях она равна нулю. Это дает основание для тщательного анализа вибрации в т. 5 при постоянной скорости во время прокатки и холостого хода. Установка датчика на прокатной клетки позволяет глубже определять ТС линии привода, включая шпиндельный участок.

Приведенные примеры распознавания ТС оборудования не являются исчерпывающими. Использование в диагностических целях виброизмерений в режиме захвата полосы валками в разработках компании "ДИАМЕХ" находится в начальной стадии. Соединение информации в этом режиме наряду с измерениями во время процесса прокатки и холостого хода прокатного стана позволяет существенно расширить и углубить диагностирование ТС оборудования.

### **Выводы**

Переходные процессы во время захвата полосы валками обладают существенной информативностью связанной с техническим состоянием оборудования.

Путем сравнения отслеживания характера изменения вибраций, их уровня и частоты в идентичных точках нескольких смежных прокатных клеток можно давать качественную оценку общему техническому состоянию оборудования с учетом дат ремонтных воздействий.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кожевников С.Н. Экспериментальное исследование главных линий чистовой группы клеток непрерывного тонколистового стана 1680 мм завода "Запорожсталь" / С.Н. Кожевников, П.Я. Скичко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 12. – С. 179–184.
2. Подковырин Е.Я. Бесконтактный измеритель крутящего момента / Е.Я. Подковырин // Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия. Труды Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. – 1969. – Т. XXXI. – С. 159–161.
3. Діагностування механічного обладнання металургійних підприємств / Седуш В.Я., Кравченко В.М., Сидоров В.А. та ін. Монографія. Донецьк. 2004. – 98 с.
4. Ульяницкий В.Н. Техническая диагностика металлургического оборудования. Учебное пособие. – Алчевск. ДГМИ. 0 2004. – 186 с.
5. Диагностика и динамика прокатных станов / В.В. Веренев, В.И. Большаков, А.Ю. Путноки и др. // Монография. Днепропетровск, ИМА–пресс. – 2007. – 144 с.

А.А. Власов, С.В. Зданевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БАЛАНСИРНОГО ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

*Анотація. Розглядається динамічна система балансірного електродотримача дугової трифазної сталеплавильної печі на основі подвійного фізичного маятника з пружнодисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного впливу вимушених коливань. Складено диференціальні рівняння змушених коливань дисипативної системи з двома ступенями волі. Виконано математичне моделювання вимушених і вільних коливань електрода в горизонтальній площині.*

*Ключові слова: балансірний електродотримач, динамічна система, електродинамічний вплив, коливання, амплітуда.*

### Вступление

При эксплуатации сверхмощных трехфазных дуговых сталеплавильных печей (ДСП), отмечен повышенный расход графитовых электродов в результате их поломок из-за ударного или изгибного нагружения, а также интенсивного вибрационного нагружения электрододержателей при действии электродинамических сил [1]. Электродинамическое взаимодействие токоподводов электрододержателей и электродов соседних фаз при рабочих токах плавки или в режимах коротких замыканий (КЗ), возбуждает изгибно-крутильные колебания в системе «электрод - электрододержатель - стойка». Это приводит к пространственному перемещению электрода. Вынужденные колебания или автоколебательные процессы в динамической системе электрододержателя могут происходить с амплитудами, превышающими предельные по прочности материала электрода и его ниппельных соединений [2].

### Постановка проблемы

Механические колебания электродов в системе электрододержателей трехфазных ДСП влияют на процесс плавки и могут привес-



ти к разрушению электродов, поэтому следует считать актуальными исследования, направленные на совершенствование конструкций системы электрододержателей путем использования новых конструктивных решений с системами виброзащиты, рациональным выбором динамических параметров механической системы электрододержателей и применения устройств для демпфирования колебаний несущей электрод металлоконструкции.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Среди известных технических решений, направленных на снижение амплитуд колебаний электрододержателей ДСП, являются упругодемпферные роликовые опоры подвижных стоек, а также гасители колебаний, устанавливаемые на различных участках рукавов электрододержателей. Однако эти решения не позволяют снизить амплитуды колебания до приемлемого уровня по причине неподвижного соединения рукава электрододержателя с несущей стойкой. При таком соединении система электрододержателя отличается большой жесткостью при крайне малой диссипации.

В работе А.И. Сапко [3] для исследования свободных затухающих и вынужденных колебаний электрододержателя в горизонтальной плоскости предложена динамическая модель электрододержателя с жестким креплением рукава в виде одномассовой крутильной системы.

Для снижения амплитуд колебаний электрода предлагалось [4] применить крепление электрододержателя к стойке двумя шарнирными узлами, с вертикальной и горизонтальной осью вращения, и упругодемпферными элементами.

Система балансирного электрододержателя представляет собой колебательную систему типа двойного физического маятника [5] расположенного в горизонтальной плоскости с упругими связями между звеньями [6, 7] и демпфирующими элементами [8].

Для системы балансирного электрододержателя в работе [9] предложен алгоритм расчета координаты расположения шарнира рукава электрододержателя и выбора рационального значения жесткости упругих элементов гасителя колебаний при статическом действии максимальных электродинамических сил на элементы токопроводящего контура электрододержателя при условии минимального откло-

нения электрода от исходного положения в горизонтальной плоскости.

### Постановка задачи

Разработать математическую модель и определить параметры динамической системы балансирующего электрододержателя ДСП. Выполнить сравнительную оценку максимальных амплитуд и характера вынужденных и свободных затухающих колебаний электрода после сброса электродинамической нагрузки для балансирующего электрододержателя и электрододержателя с жестким креплением рукава к стойке.

### Основной материал исследований

Принимаем металлоконструкцию горизонтальной части стойки и рукав электрододержателя с электродом твердыми телами с соответствующими инерционными параметрами.

Для сравнительного исследования приняты две расчетные схемы (рис.1): исходная с жестким креплением электрододержателя к стойке (рис.1, а) и балансирующего электрододержателя с шарнирным креплением рукава к стойке и упруго-демпферными узлами (рис.1, б), где  $m_{st}$ ,  $I_{stz}$ ,  $c_1$  – соответственно масса, момент инерции относительно вертикальной оси и крутильная жесткость стойки;  $m_r$ ,  $I_{pz}$  – соответственно масса и момент инерции рукава относительно вертикальной оси;  $L_e$ ,  $d_e$ ,  $m_e$ ,  $I_{ez}$  – соответственно длина, диаметр, масса и момент инерции электрода относительно вертикальной оси;  $c_{gk}$ ,  $\lambda_{gk}$  – соответственно жесткость упругих элементов и коэффициент поглощения гасителя колебаний;  $L_1$ ,  $L_2$  – координаты расположения шарнира рукава и гасителя колебаний относительно оси стойки;  $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$  – геометрические размеры участков рукава.

Для исследования малых колебаний электрода в горизонтальной плоскости составлена приведенная двухмассовая динамическая система балансирующего электрододержателя (рис.2, а). Стойка 1 условно шарнирно закреплена (т.О1). Крутильная жесткость стойки  $c_1$  электрододержателя приведена к шарниру (т.В) на основании равенства потенциальных энергий

$$c_{st} = c_1 \cdot (\delta\varphi_1 / \delta s_B)^2 = c_1 / L_2^2. \quad (1)$$

Рукав электрододержателя 2 шарнирно закреплен на стойке (т.В) и опирается (т.А) на упругие элементы гасителя колебаний. Упругие элементы гасителя колебаний в исходном состоянии не дефор-

мированы. Параллельно упругим элементам установлены демпферы, создающие вязкое сопротивление. Сопротивление от сил трения в шарнире (т.В) не учитываем.

За обобщенные координаты приняты угловые перемещения:  $\varphi_1$  - стойки;  $\varphi_2$  - рукава электрододержателя. Положительные направления обобщенных координат (рис.2, б) приняты от положения равновесия ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ) по часовой стрелке.

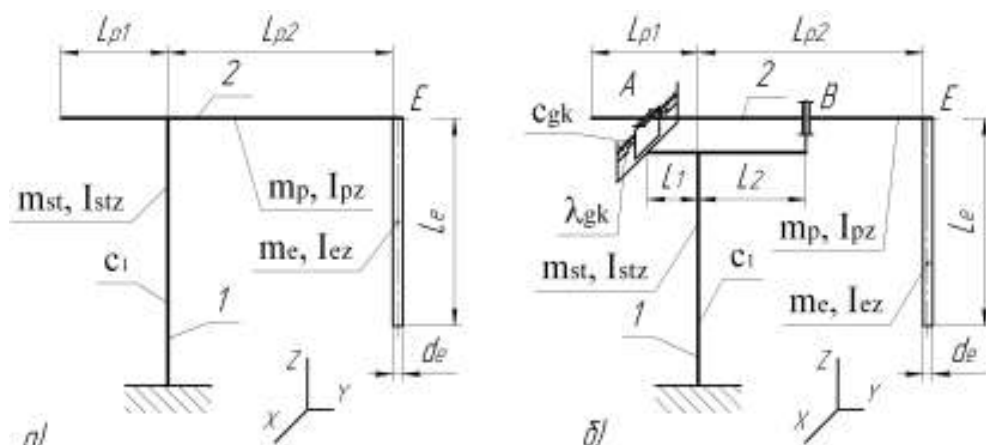


Рисунок 1 - Расчетная схема системы «стойка - электрододержатель - электрод»: а) с жестким креплением электрододержателя к стойке; б) балансирующего электрододержателя с шарнирным креплением рукава к стойке и упруго-демпферными узлами (1- стойка; 2- рукав с электродом)

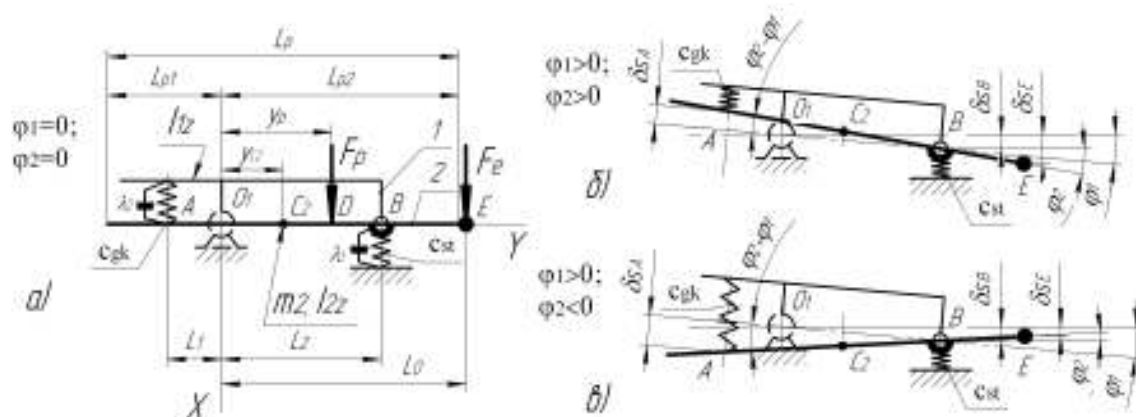


Рисунок 2 - Приведенная двухмассовая динамическая модель балансирующего электрододержателя: а) исходное положение ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ); б) первая форма колебаний ( $\varphi_1/\varphi_2 > 0$ ); в) вторая форма колебаний ( $\varphi_1/\varphi_2 < 0$ )

На основании уравнений Лагранжа второго рода дифференциальные уравнения малых вынужденных колебаний в диссипативной системе с двумя степенями свободы имеют вид [4]

$$\left. \begin{aligned} a_{11} \cdot \ddot{\varphi}_1 + a_{12} \cdot \ddot{\varphi}_2 + b_{11}\dot{\varphi}_1 + b_{12}\dot{\varphi}_2 + c_{11} \cdot \varphi_1 + c_{12} \cdot \varphi_2 &= Q_1 \\ a_{21} \cdot \ddot{\varphi}_2 + a_{22} \cdot \ddot{\varphi}_1 + b_{21}\dot{\varphi}_1 + b_{22}\dot{\varphi}_2 + c_{21} \cdot \varphi_1 + c_{22} \cdot \varphi_2 &= Q_2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $a_{js}$ ,  $b_{js}$ ,  $c_{js}$  - соответственно инерционные, диссипативные и квазиупругие коэффициенты;  $Q_s$  - обобщенная сила;  $j = 1, 2$ ;  $s = 1, 2$ .

На основании кинетической и потенциальной энергии, а также диссипативной функции колебательной системы, инерционные, квазиупругие и диссипативные коэффициенты в уравнениях (1) примут вид:

$$a_{11} = I_{1z} + m_2 L_2^2; \quad a_{12} = a_{21} = m_2 L_2 b; \quad a_{22} = I_{2C_2} + m_2 b^2. \quad (3)$$

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{st} L_2^2 + c_{gh} (L_1 + L_2)^2; \quad c_{12} = c_{21} = -c_{gh} (L_1 + L_2)^2; \\ c_{22} &= -c_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} b_{11} &= \lambda_1 L_2^2 + \lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \quad b_{12} = b_{21} = -\lambda_2 (L_1 + L_2)^2; \\ b_{22} &= -b_{12}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_2 = m_p + m_e$ ;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - коэффициенты неупругих сопротивлений.

Потенциальная энергия системы имеет в положении равновесия ( $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = 0$ ) минимум, следовательно, равновесие системы в данном положении будет устойчивым.

Обобщенные силы  $Q_1$  и  $Q_2$ , отвечающие суммарному электродинамическому воздействию на рукав и электрод от равнодействующих сил  $F_p$  и  $F_e$  составят:

$$Q_1 = (F_p + F_e) L_2; \quad Q_2 = -F_p (L_2 - y_p) + F_e (L_0 - L_2) \quad (6)$$

Электродинамические нагрузки в системе являются функцией времени и зависят от конфигурации контура, токов взаимодействующих фаз и принимают максимальные значения при ударных токах КЗ. Для оценки максимального вынуждающего электродинамического воздействия принимаем, что рукава электрододержателей триангулированного токоподвода ДСП расположены в одной горизонтальной плоскости [9].

Максимальное усилие на рукав электрододержателя при взаимодействии с токами соседних фаз

$$F_{p \max} = 10^{-7} \cdot k_p \cdot I^2, \quad (7)$$

где  $k_p$  – геометрический коэффициент контура токов взаимодействующих фаз;  $I$  – ударный ток КЗ.

Равнодействующая сила от равномерно распределенной электродинамической нагрузки при взаимодействии в трехфазной системе электродов, расположенных по углам равностороннего треугольника со стороной  $a_e$ , приведена к вертикальной плоскости, которая перпендикулярна оси рукава электрододержателя, и принимает максимальные значения при токах КЗ

$$F_{e \max} = 10^{-7} \cdot k_{KZ} \cdot k_{pr.e} \cdot \frac{L_e}{a_e} \cdot I^2, \quad (8)$$

где  $k_{KZ}$  – коэффициент, который зависит от вида КЗ  $k_{pr.e}$  – коэффициент приведения к плоскости нормальной к оси рукава;  $a_e$  – расстояние между электродами;  $L_e$  – рабочая длина электрода.

При моделировании колебаний электрододержателя с учетом синусоидального характера изменения тока в трехфазной сети электродинамическая нагрузка принята в виде

$$F_e(t) = F_{e \max} \cdot \sin^2(\omega t), \quad F_p(t) = F_{p \max} \cdot \sin^2(\omega t) \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая частота переменного тока ( $\omega = 314$  с-1).

Для конструкции электрододержателя с жестким креплением рукава к стойке дифференциальное уравнение вынужденных колебаний диссипативной системы с одной степенью свободы:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = Q/I_{np} \quad (10)$$

здесь обобщенная сила  $Q = F_e L_0 + F_p y_p$ ; собственная частота свободных колебаний  $k = \sqrt{c_1/I_{np}}$ ; коэффициент затухания  $n = 0,5 \lambda_1/I_{np}$ , где приведенный к оси стойки электрододержателя момент инерции системы  $I_{np} = I_{1z} + I_{2z}$ .

Крутильная жесткость стойки электрододержателя с учетом приведенной жесткости  $c_{rol}$  узла верхних опорных роликов (рис.3, а)

$$c_1 = c_b (c_a + c_{rol}) / (c_a + c_b + c_{rol}) \quad (11)$$

здесь крутильные жесткости участков стойки (рис.3, а): над верхними опорными роликами  $c_a(L_e) = GJ_{st} / (L_{st0} + L_e - L_{e \min})$ , между верхними и нижними опорными роликами  $c_b = GJ_{st} / L_{rol}$ , где  $G$  – модуль упругости второго рода;  $J_{st}$  – полярный момент инерции сечения

стойки;  $L_{st0}$  – минимальная длина вертикального участка стойки;  $L_{e\ min}$  – минимальная длина рабочей части электрода;  $L_{rol}$  – длина участка стойки между верхними и нижними опорными роликами.

Стойка электрододержателя относительно оси  $Z$  может иметь симметричную линейную (рис.3, б) или кусочно-линейную упругую характеристику (рис.3, в) в зависимости от упругой характеристики узла верхних опорных роликов.

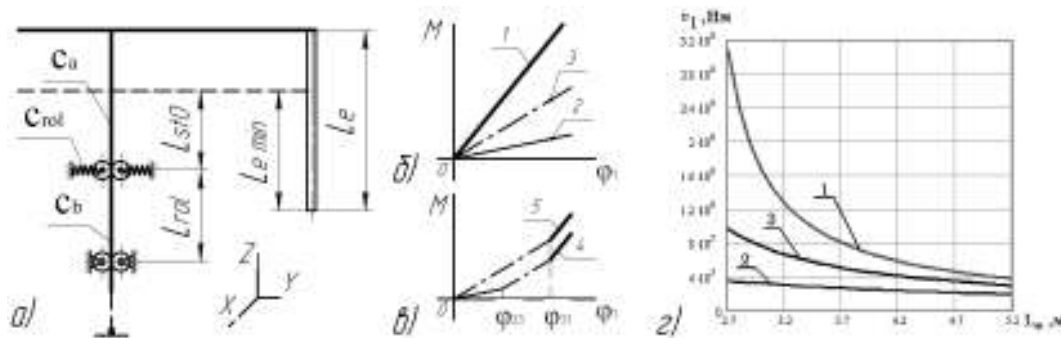


Рисунок 3 - Стойка электрододержателя (а), линейная (б) и кусочно-линейная (в) упругая характеристика при условном заземлении:

- 1 - в верхних опорных роликах; 2 - в нижних опорных роликах;
- 3 - с учетом линейной жесткости узла верхних опорных роликов;
- 4 - с зазором ( $\phi_{23}$ ) и 5 - с жестким упором ( $\phi_{31}$ ) в узле опорных роликов; крутильная жесткость ( $\gamma$ ) стойки электрододержателя ДСП-50Н2 в функции рабочей длины электрода

Масса электрода и момент инерции электрода относительно вертикальной центральной оси

$$m_e = 0,25 \cdot \rho \cdot \pi d_e^2 \cdot (L_e + \Delta L_e), \quad I_e = 0,125 \cdot m_e \cdot d^2 \quad (12)$$

где  $\rho$ ,  $d_e$ ,  $L_e$  и  $\Delta L_e$  соответственно плотность материала, диаметр, длина рабочей части и хвостовика электрода.

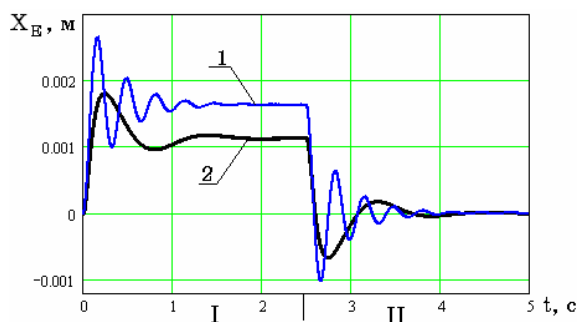
Для системы электрододержателей ДСП-50Н2 в работе [9] приведены расчетные данные по максимальным значениям сосредоточенной электродинамической нагрузки на электрод (в диапазоне изменения его рабочей длины) и рукав крайнего электрододержателя при различных вариантах КЗ для максимального тока КЗ (73 кА), зарегистрированного при экспериментальных исследованиях.

На основе систем уравнений (2) и (10) при нулевых начальных условиях выполнено моделирование колебаний электрода при приложении электродинамической нагрузки и после ее сброса в системе с жестким и шарнирным креплением рукава электрододержателя к

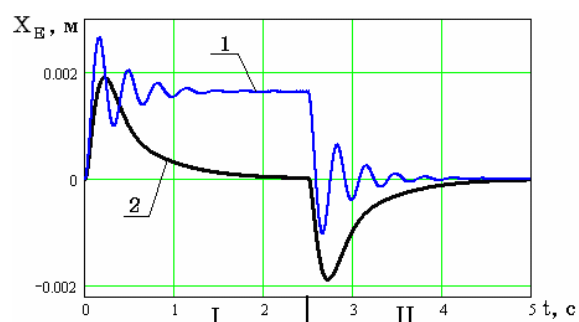
стойке. Координата положения электрода  $x_E$  (рис.4) при колебаниях системы: для исходной конструкции электрододержателя  $x_E = \varphi L_0$ ; для балансирующего электрододержателя  $x_E = \varphi_1 L_2 + \varphi_2 (L_0 - L_2)$ .

Для крайнего электрододержателя ДСП-50Н2 приняты для расчета геометрические размеры рукава и электрода:  $L_1 = 0,6$  м;  $L_2 = 2,85$  м;  $L_{p1} = 1,65$  м;  $L_{p2} = 4,045$  м;  $d_e = 0,5$  м;  $L_e = 2,7 \div 5,0$  м;  $\Delta L_e = 0,4$  м. Инерционные параметры колебательной системы:  $I_{1z} = 984$  кгм<sup>2</sup>;  $m_p = 5450$  кг;  $I_p = 14730$  кгм<sup>2</sup>;  $I_{2z} = 56469$  кгм<sup>2</sup>.

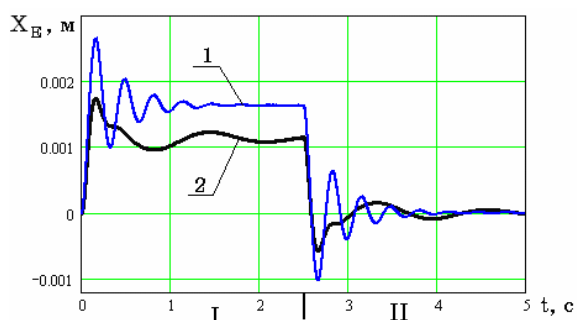
Моделирование колебаний электрода выполнялось при расчетных параметрах соответствующих средней рабочей длине электрода  $L_e = 3,85$  м, крутильной жесткости стойки  $c_1 = 22$  МНм и коэффициенте сопротивления  $\lambda_1 = 23 \cdot 10^3$  кг/с. Электродинамические силы, действующие на электрод и рукав электрододержателя, определялись при максимальном токе двухфазного КЗ (73 кА).



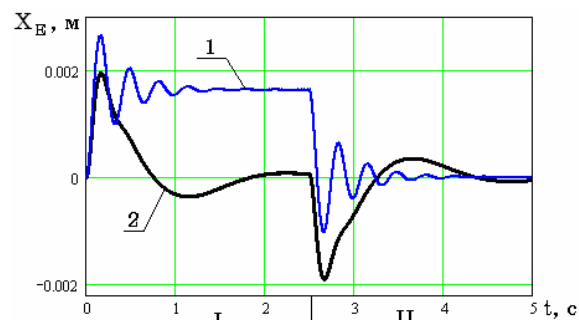
а)  $c_{gk} = 85,44$  кН/м;  $\lambda_2 = 18 \cdot 10^3$  кг/с



б)  $c_{gk} = 26,11$  кН/м;  $\lambda_2 = 18 \cdot 10^3$  кг/с



в)  $c_{gk} = 85,44$  кН/м;  $\lambda_2 = 8 \cdot 10^3$  кг/с



г)  $c_{gk} = 26,11$  кН/м;  $\lambda_2 = 8 \cdot 10^3$  кг/с

Рисунок 4 - Вынужденные колебания (участок I) электрода при действии электродинамического воздействия на систему «электрододержатель-электрод» и затухающие свободные колебания (участок II) электрода после сброса нагрузки при изменении параметров жесткости и диссипации гасителя колебаний: 1 - жесткая конструкция электрододержателя; 2 - балансирующий электрододержатель

Результаты моделирования (рис.4) вынужденных колебаний электрода при действии электродинамического воздействия с постоянной амплитудой на систему «электрододержатель-электрод» и затухающих свободных колебаний после сброса нагрузки указывают на возможность снижения максимальной амплитуды колебаний (рис.4, а, б) электрода при определенных значениях жесткости и коэффициента сопротивления гасителя колебаний.

### Выводы

Предложенная математическая модель динамической системы балансирного электрододержателя с упругодемпферными узлами позволяет исследовать колебания электрода в горизонтальной плоскости. Моделирование вынужденных и свободных колебаний электрода в системе балансирного электрододержателя ДСП-50Н2 показало возможность снижения максимальных амплитуд и изменения характера колебаний электрода при рациональном выборе значений жесткости и параметров диссипации гасителя колебаний, что может быть предметом дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваль М.В. Про підвищення надійності роботи електродів дугових сталеплавильних печей / М.В. Коваль, В.К. Тарасов, С.С. Пилипенко, Ю.П. Єгоров, А.О. Власов // *Металургія: Збірник наукових праць ЗДІА*. - Запоріжжя: ЗДІА, 2016. - Вип. 35. - С. 58-62.
2. Eugenio G.M. Brusa Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / Eugenio G.M. Brusa, Stefano Morsut // *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol.20, No 3, June 2015. - pp. 1099-1107.
3. Сапко А.И. Исполнительные механизмы регуляторов мощности дуговых электропечей.- М.: Энергия, 1980. - 136 с.
4. Патент на винахід №43610А Україна, МПК Н 05 В 7/10. Пристрій для кріплення електродотримача дугової сталеплавильної печі / Власов А.О., Коваль М.В., Жук А.Я., Лебедева І.В., Беляев С.Ю., Бейник В.В.; заявник і власник Запорізька державна інженерна академія. - № 2001042291; заявл. 06.04.2001; опубл. 17.12.2001, Бюл.№11.
5. Бухгольц Н.Н. Основной курс теоретической механики. Часть 2. Динамика системы материальных точек. - М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит., 1966. - 332 с.
6. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний: Учебное пособие для вузов.- М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит., 1991. - 256 с.
7. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. - М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 304 с.
8. Циглер Г. Основы теории устойчивости конструкций: Пер. с англ. - М.: Мир, 1971. - 191 с.
9. Власов О.А. Вибір жорсткості пружних елементів гасителя коливань балансирного електродотримача дугової сталеплавильної печі / О.А. Власов, С.В. Зданевич // *Теорія і практика металургії*, 2017. №1-2, С.77-81.



## КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ МАСОПЕРЕНОСУ В ГАЛЬВАНІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

*Анотація. Розроблено математичну модель та реалізовано відповідний комп'ютерний додаток для розрахунків характеристик масопереносу в гальванічних процесах. Модель враховує протікання певних хімічних процесів, міграційну, дифузійну та конвективну складову потоку маси. Адекватність моделі підтверджена розрахунками для реальних композицій з порівнянням результатів з експериментальними даними.*

*Ключові слова: масоперенос, кінетика, моделювання.*

### 1. Вступ

Гальванічні процеси відіграють важливу роль в сучасних технологіях. Саме тому розробники нових процесів мають враховувати широкий спектр вимог — економічних, екологічних, морфологічних і т.ін. Якість осаду залежить від поляризації електродів, концентрацій компонентів та їх співвідношень в електроліті, використання тих чи інших поверхнево-активних речовин, теплового та гідродинамічного режиму ванни та багатьох інших чинників, причому відповідні залежності майже завжди не є монотонними. На додачу, процеси електроосадження — досить повільні і тривають десятки хвилин. Отже, прискорення розробки нових гальванічних процесів — нагальна науково-технічна задача; комп'ютерне моделювання — один із підходів до її вирішення, який сьогодні потужно розвивається. Математична модель, яка закладена в основу програмного забезпечення, що розглядається в даній роботі, дозволяє дослідникові не тільки отримати кількісні характеристики процесу, але й зрозуміти їх залежності від вхідних величин. Це дає змогу не тільки ефективно планувати серії експериментів, але й інтерпретувати отримані результати.

### 2. Постановка задачі

Попередні розрахунки дозволили стверджувати, що перехідні процеси, які мають місце при вмиканні електричного струму у

гальванічній ванні не дають скільки-небудь значного вкладу в осад, що створюється. Отже, математична модель має описувати стаціонарний процес електроосадження. Масоперенос розглядається як сукупність трьох потоків: а) дифузійного, пов'язаного з тепловим рухом молекул; б) міграційного, який створюється за рахунок градієнту електричного потенціала і включає лише заряджені частинки; в) конвективного, джерелом якого є інтенсивне газовиділення на катоді. Вважається справедливим припущення, що суттєві зміни концентрацій компонентів електроліту відбуваються лише в шарі рідини, достатньо близькому до електрода (гіпотеза дифузійного шару),  $0 \leq x \leq \delta$ . Координата  $x$  відраховується у напрямку нормалі до поверхні електрода углиб розчину, на самій поверхні  $x=0$ . Якщо ввести нульовий верхній індекс для означення величин в об'ємі розчину, то граничну умову можна записати як

$$c_i(\delta) = c_{i0}. \quad (1)$$

Електричний потенціал, записаний в безрозмірному вигляді,  $\Phi = FU/RT$ , де  $F$  – стала Фарадея,  $U$  – потенціал,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – температура, вибрано таким чином, що

$$\Phi(\delta) = 0 \quad (2)$$

Товщина дифузійного шару залежить від густини катодного струму  $I$ , оскільки газовиділення викликає ефективне перемішування електроліту [1]. Ця залежність описується степенною функцією:

$$\delta = \delta_0 I_n. \quad (3)$$

Модель враховує хімічні реакції, які протікають як в об'ємі розчину, так і в дифузійному шарі. Система, в якій встановилася хімічна рівновага, складається з  $N$  компонентів, в тому числі продуктів дисоціації первинних речовин, комплексоутворення та інших хімічних процесів; вважається, що кількість реакцій, які треба урахувати, дорівнює  $r$ . Тоді об'ємні значення концентрацій  $c_{i0}$  будуть зв'язані  $r$  співвідношеннями рівноваги. Отже, з  $N$  величин  $c_{i0}$  можна вибрати  $N-r$  незалежних і решту виразити через них. Опис реакціїї потребує:

- складання кортежу назв або інших ідентифікаторів компонентів-учасників  $Idm$ , як тих, що вступають в хоча б в один процес, так і продуктів;

- формування цілочисельного масиву стехіометричних коефіцієнтів  $\alpha_{jm}$ , позитивних для вихідних учасників, негативних

для продуктів та нульових для компонентів, які в  $j$ -й реакції участі не приймають;

- визначення констант рівноваги  $K_j$  для кожної реакції.

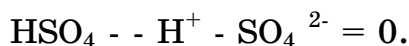
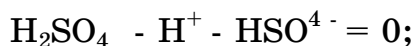
У такому формалізмі  $j$ -у реакцію символічно можна представити у вигляді

$$\alpha_{j1} I_{d1} + \alpha_{j2} I_{d2} + \dots + \alpha_{jN-1} I_{dN-1} + \alpha_{jN} I_{dN} = 0, \quad (4)$$

а рівняння рівноваги — як

$$K_j \prod_{m=1}^N (c_m^0)^{\alpha_{jm}} = 1. \quad (5)$$

Наведений вище опис не є однозначним: якщо  $\alpha_{jm}$  та  $\alpha_{im}$  відмінні від нуля для двох різних реакцій, можна замість відповідного запису типу (4) для однієї з реакцій записати об'єднання запису  $j$  та запису  $i$ . Можлива і протилежна операція: вилучення із одного із записів іншого. Це дозволяє використовувати певні правила для спрощення цих записів, а саме — представлення хімічних реакцій як процесів дисоціації одного компонента на два продукти, тобто у вигляді (4), де тільки три стехіометричних коефіцієнти відмінні від нуля, з яких один — позитивний, а два — негативні. Наприклад, для розчину сірчаної кислоти у воді можна записати (4) як пару записів



У такій реалізації формалізму дуже легко визначити  $N$ -г незалежних компонентів, а саме, вибрати ті компоненти, які не є вхідними ні в яких реакціях дисоціації (в наведеному вище прикладі це -  $H^+$  та  $SO_4^{2-}$ ), іншими словами, для яких у  $m$ -тому стовпчику матриці  $\alpha_{jm}$  немає позитивних елементів. Створюючи масив незалежних компонентів  $q_l$ ,  $l=1..N$ -г, ліву частину (5) можна представити як поліном  $q_l$ . Таким чином, рівняння матеріального балансу остаточно можна записати як

$$\sum_{m=1}^N \alpha_{jm} K_j \prod_{l=1}^{N-r} q_l^{\alpha_{jl}} = T_j, \quad (6)$$

де  $T_j$  – сумарна (молярна) концентрація  $j$ -го незалежного компоненту.

Представлена модель враховує також той факт, що по досягненні визначеного граничного значення концентрації, яке характеризується так званим добутком нерозчинності, деякі компоненти можуть утворювати продукт, який випадає в осад. Для цього

формується відповідний масив добутоків (для розчинних продуктів вводиться значення 104, яке перевищує будь-який добуток молярних концентрацій у водному розчині). Якщо відповідна концентрація продукту перевищує граничне значення, з матеріального балансу виводиться потрібна кількість речовини, щоб відновити порушене обмеження.

Пошук рішення в моделі кінетики хімічних реакцій зазвичай ускладнює чуттєвість таких систем до величини кислотності середовища, тобто концентрації іонів  $H^+$ . Справа в тому, що для реакції дисоціації води концентрація молекулярної води в рівнянні (5) не розглядається (середовище складається майже з води) і це призводить до того, що в рівняннях матеріального балансу виникають від'ємні степені  $H^+$ . Ця проблема була вирішена за рахунок вводу до розчину електрохімічно індиферентних компонентів, які призначені лише для корегування рН, як воно і відбувається в реальних електролітах. Таким чином, кислотність в цій моделі є заданою величиною, а розраховується концентрація корегуючих компонентів.

Рівняння переносу в даній моделі мають звичайний вигляд:

$$\sum_{m=1}^N \alpha_{jm} D_m (\nabla c_m + z_m \nabla \Phi) = \frac{I \eta_j}{n_j F}, \quad (7)$$

де  $D_m$ ,  $z_m$  – коефіцієнт дифузії та заряд  $m$ -го компонента відповідно;  $\eta_j$  – вихід за струмом по  $j$ -му незалежному компоненту;  $n_j$  – кількість електронів, що переносяться. Рівняння (7) відносяться до дифузійного шару; відповідні концентрації  $c_m$  є функціями координат, пов'язані між собою алгебраїчними співвідношеннями, подібними до (5) а також відповідають умові електронейтральності

$$\sum_{m=1}^N z_m c_m = 0. \quad (8)$$

Рішення диференціальних рівнянь (7) відбувається з використанням звичайних методів обчислення (в одновимірному випадку – методом Рунге-Кутта), починаючи з границі дифузійного шару  $x=\delta$  і до  $x=0$ . Граничні умови (1,2) наведені вище.

### 3. Результати

Перевірка адекватності моделі відбувалася шляхом порівняння реальних експериментальних даних із результатами комп'ютерних розрахунків. Розглянемо в якості прикладу лужний електроліт цинкування. Композиція досить проста – складається лише з 8

компонентів. Корегування кислотності відбувається додаванням потрібної кількості NaOH. Ця кількість з похибкою менше 1% співпадає теоретичною величиною для рН в діапазоні 14,0-14,5. В цьому відносно простому випадку вдалося отримати аналітичні співвідношення для щільності міграційного потоку електрохімічноактивних складових електроліту, наприклад, для іонів  $\text{Zn(OH)}_2$  воно виглядає так:

$$J_{\text{migr}} = 2D_3c_3(2c_8+6c_3)[(\eta+1)/D_8 - \eta/D_3]I/F, \quad (9)$$

де індекси 3 та 8 відповідають компонентам  $\text{Zn(OH)}_4^{2-}$  та  $\text{OH}^-$ . Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що при  $\eta = 6,7\%$  міграційні потоки змінюють знак. Отже, при  $I \leq 31 \text{ A/дм}^2$  міграція допомагає переносу цинка до електрода, а при більшій щільності струму – перешкоджає. Також можна констатувати, що граничний струм, пов'язаний з масо переносом, в цій системі є недосяжним. Розрахунок міграційної складової для  $\text{Zn(OH)}_4^{2-}$  показав, що вона практично не залежить від щільності струму, а визначається лише виходом за струмом.

На залежності поверхневої концентрації компонентів, які вміщують цинк, можна виділити два інтервали. На першому з них ( $I \leq 20 \text{ A/дм}^2$ ) з ростом щільності струму відбувається падіння поверхневої концентрації комплексів цинку, а при більших  $I$  спостерігається зворотній ефект. Вочевидь, в першому випадку, коли з ростом  $I$  зростає струм за металом і за воднем, зменшення  $\delta$  лише частково компенсує зниження поверхневої концентрації цинкатних іонів. В другому випадку міграційна складова потоку є сталою і зростання поверхневої концентрації компонентів, які містять цинк, відбувається головним чином за рахунок зменшення  $\delta$ .

Таким чином, аналіз даних розрахунків, виконаних згідно моделі, дозволяє не тільки отримати чисельні результати, що добре погоджуються із експериментальними даними, але й зробити висновки щодо можливості інтенсифікації процесу, що розглядається.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Janssen L.J.J., Hoogland J.G. The effect of electrolytically evolved gas bubbles on the thickness of the diffusion layer. //Electrochim Acta. – 1970.- v.15, N62.- p.1013-1023.

Е.О. Лапханов, О.С. Палій

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУННОЇ УСТАНОВКИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ НА НАВКОЛОЗЕМНІЙ ОРБІТІ

*Анотація. Стаття присвячена аналізу можливості застосування двигунної установки з постійними магнітами (ДУПМ) для космічних апаратів (КА) на навколоземних та навколомісячних орбітах, а також в міжпланетному просторі. Метою даної статті є дослідження можливості і ефективності застосування ДУПМ для керування орбітальним рухом КА на навколоземних та навколомісячних орбітах і траєкторією польоту при русі в міжпланетному просторі. Проведено аналіз використання електромагнітних двигунних систем для КА, виявлено переваги та недоліки. Проведено аналіз можливості і ефективності застосування ДУПМ на різних висотах навколоземних орбіт. Обрано необхідні параметри для магнітних матеріалів постійних магнітів і розроблено конструктивна схема ДУПМ. Проведено розрахунки сили тяги (гальмування), яку отримуємо при взаємодії створеної магнітосфери КА з потоком, що набігає на КА, заряджених часток іоносфери. Зроблено оцінку ефективності застосування ДУПМ і запропоновані її подальші шляхи розвитку.*

*Ключові слова: двигунна установка з постійними магнітами, орбітальний рух космічного апарату, траєкторія польоту, постійні магніти, конструктивна схем.*

### Вступ

Згідно теорії, основною задачею керування будь-яким об'єктом є пошук найбільш оптимальних систем та алгоритмів керування. Рішення такої задачі, як правило, зводиться до мінімізації або максимізації одного, чи декількох параметрів керування, в залежності від необхідних вимог. Наприклад, для досягнення максимальної стійкості, потрібно використовувати багато бортової енергії, а для мінімізації витрат бортової енергії проектувати нові енергозберігаючі системи і т.д., тощо. В аерокосмічній техніці досить важливим аспектом є оптимальне використання палива та бортової

енергії. У зв'язку з цим постало питання створення найменш енерговитратних систем керування орбітальним рухом та траєкторією польоту в міжпланетному просторі.

В системах керування орбітальним рухом основними керуючими величинами являються головний вектор руху КА та головний момент. Так в системах корегування траєкторії польоту КА по орбіті та в міжпланетному просторі головна увага приділяється керуванню головним вектором руху КА. Для рішення даної задачі використовують різного типу виконавчі органи, такі як реактивні паливні та електричні двигуни, магнітні та сонячні паруси, іонні двигуни та плазмові двигуни холлівського типу.

Концепція магнітних та сонячних парусів базується на взаємодії електромагнітного поля штучної магнітосфери, що створюється за допомогою електропровідних контурів, з потоком часток сонячного вітру. Головною метою даної концепції є генерація додаткової тяги, що отримуємо в результаті збільшення площі Міделя КА, за рахунок створення штучної магнітосфери навколо КА, на яку діє динамічний натиск заряджених часток сонячного вітру. Ідея магнітних та сонячних парусів була запропонована рядом вчених в минулому столітті, і вивчається багатьма міжнародними аерокосмічними агентствами в усьому світі в наші дні. Але найповнішого доопрацювання ця теорія набула завдяки дослідженням Японського аерокосмічного дослідницького агентства в Університеті Кіото. Найбільш вдале математичне обґрунтування цієї теорії приведено в працях японських вчених Іккоя Фунакі та Хіроші Ямакава [1], а також в дисертації японського кандидата Ясумаса Ашида на здобуття степені доктора філософії в Університеті Кіото [2]. Але, у зв'язку з складністю реалізації та досить великими витратами бортової енергії ця концепція не набула практичного широкого застосування в аерокосмічній техніці.

Іншою, досить інноваційною, концепцією стала програма «Космічного пастуха» Leosweep. За основу принципу дії даної концепції покладено застосування іонних двигунів, що базуються на передачі енергії силового імпульсу від одного КА «Пастуха» до іншого КА «Ціль» за рахунок потоку іонів, який створюється двигуною установкою КА «Пастуха». Системи даного класу є дуже ефективними при використанні їх для відведення відпрацьованих КА

(космічного сміття) з навколоземних орбіт. Але у зв'язку з великими витратами бортової енергії застосування іонних двигунів є досить не рентабельним при використанні їх для довгострокових місій та при міжпланетних перельотах.

Стосовно дії плазмових двигунів холлівського типу, в основі їх принципу дії закладено створення сильного електричного поля в плазмі. Вперше ідея про формування помітного перепаду потенціалу в плазмі була висловлена радянським фізиком А.В. Жариновим в ході досліджень розподілу потенціалу по радіусу в циліндричній магнітній пастці з магнітними «пробками» при магнетронним способом створення плазми, що містить швидкі іони. Пізніше на базі цієї ідеї були розроблені дві схеми холлівських двигунів – двигун з анодним шаром (запропонований А.В. Жариновим) і стаціонарний плазмовий двигун (запропонований А.І. Морозовим). Прийнято вважати, що розмір зони прискорення в осьовому напрямку в стаціонарному плазмовому двигуні більше, ніж в двигуні з анодним шаром. Більш детальний опис результатів сучасних досліджень проблем створення холлівських двигунів можна знайти в монографії [3]. Але, не зважаючи на досить значну потужність даних двигунів, вони використовують велику кількість бортової енергії та потребують потужних джерел енергії на КА, що призводить до додаткових конструктивних труднощів, особливо для малих космічних апаратів (МКА).

Враховуючи всі недоліки вище приведених систем було запропоноване використання постійних магнітів замість електромагнітних систем генерації штучної магнітосфери та розроблено конструктивну схему ДУПМ.

**Постанова задачі.** Головною метою даної статті є дослідження ефективності додаткової сили тяги, що отримуємо при взаємодії штучної магнітосфери, створеної за допомогою постійних магнітів, з динамічним натиском заряджених часток іоносфери. Для цього авторами статті пропонується конструктивна схема ДУПМ та проведення необхідних розрахунків для оцінки можливості застосування двигунів з постійними магнітами на низькій навколоземній орбіті, висотою 600 – 900 км.

Математична модель взаємодії штучної магнітосфери створеної постійним магнітом з натиском заряджених часток. Згідно дослідженням Японського Університету Кіото, в рамках концепції



магнітного парусу, сила, яку отримуємо при взаємодії штучної магнітосфери КА з натиском заряджених часток сонячного вітру дорівнює:

$$F_{\text{тяги}} = C_d \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \pi \cdot L^2, \quad (1)$$

де  $C_d$  – коефіцієнт опору,

$\rho = m_i \cdot n$  – густина заряджених часток сонячного вітру,

$m_i = 1.67 \cdot 10^{-27}$  кг – маса іона,  $n$  – концентрація заряджених часток сонячного вітру,

$v$  – швидкість заряджених часток сонячного вітру,

$L$  – радіус штучно створеної магнітосфери.

Так як, авторами пропонується застосовування ДУПМ не тільки у міжпланетному просторі, а також і на навколоземній орбіті в шарах іоносфери на висоті 600 – 900 км, то в такому випадку в формулі (1) густиною  $\rho = m_i \cdot n$  буде виступати густина заряджених часток іоносфери, оскільки рух КА проводиться в межах магнітосфери Землі. Оскільки заряджені частки іоносфери не мають постійного напрямку руху, а рухаються хаотично, то величиною  $v$  в формулі (1) буде виступати швидкість КА, а потік заряджених часток іоносфери буде виступати динамічним натиском, що набігає на КА.

Радіус штучної магнітосфери розраховується із формули балансу тиску на границі магнітосфери та динамічного натиску заряджених часток

$$P_{\text{дин.}} = P_{\text{магн.}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{дин.}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (3)$$

$$P_{\text{магн.}} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{дин.м}}$  – динамічний тиск, створений потоком заряджених часток іоносфери (потоком заряджених часток іоносфери, що набігає на КА),  $P_{\text{магн.}}$  – статичний магнітний тиск, що врівноважує динамічний натиск заряджених часток на границі магнітосфери.

Величина магнітної індукції на магнітопаузі  $B_m$  дорівнює:

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot L^3}, \quad (5)$$

де  $M$  – магнітний момент,

$\mu_0$  – магнітна стала.

Після стандартних математичних перетворень можна виразити  $L$ :

$$L = \sqrt[6]{\frac{\mu_0 \cdot M^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot v^2}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт опору  $C_d$  розраховується по наступним формулам:

$$C_d = \begin{cases} 3.6 \cdot e^{-0.28 \cdot \left(\frac{r_{Li}}{L}\right)^2}, & \frac{r_{Li}}{L} < 1 \\ \frac{3.4 \cdot e^{-0.22 \cdot \left(\frac{L}{r_{Li}}\right)^2}}{\left(\frac{r_{Li}}{L}\right)}, & \frac{r_{Li}}{L} \geq 1 \end{cases}, \quad (7)$$

де  $r_{Li}$  – Ларморовський радіус іона,

$$r_{Li} = \frac{m_i \cdot v}{B_m \cdot q_e}, \quad (8)$$

де  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона.

При застосуванні постійних магнітів треба врахувати всі їх властивості. Як відомо з курсу теорії електрики і магнетизму постійні магніти характеризуються величиною намагніченості та залишкової магнітної індукції. Залишкова магнітна індукція чисельно дорівнює:

$$B_r = \mu_0 \cdot M_r, \quad (9)$$

де  $M_r$  – залишкова намагніченість матеріалу.

Величина магнітного моменту  $P_m$ , для розрахунків радіусу штучної магнітосфери, як відомо з курсу магнетизму, залежить від об'єму самого магніту і розраховується по формулі:

$$P_m = M_r \int_V dV, \quad (10)$$

де  $V$  – об'єм постійного магніту

Тоді з урахуванням властивостей постійних магнітів, формула (6) після математичних перетворень запишеться наступним чином:

$$L = \sqrt[6]{\frac{\mu_0 \cdot \left( M_r \cdot \int_V dV \right)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot v^2}}. \quad (11)$$

Отже, таким чином складено математичну модель взаємодії постійних магнітів з динамічним натиском іоносферної плазми.

Розробка і принцип дії конструктивної схеми ДУПМ. Конструктивна схема ДУПМ складається з екранованого контейнеру 3 зі створами 4, 6, що кріпиться на КА 1; постійного магніту 2, що поміщується в екранований контейнер; шагового двигуна з кривошипно-повзуним механізмом 5, що слугує для відкривання та закривання створів екранованого контейнера. Конструктивна схема представлена на рис.1.

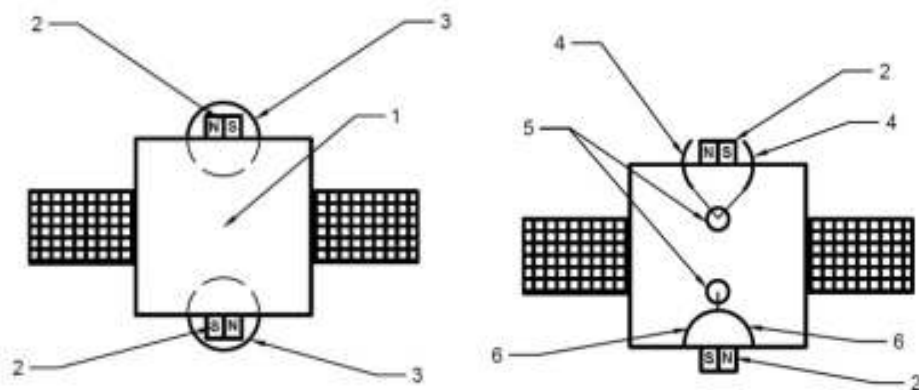


Рисунок 1 – Конструктивна схема ДУПМ

Принцип дії ДУПМ базується на генерації штучної магнітосфери за допомогою постійних магнітів після відкривання екранованих контейнерів. При русі по навколоземній орбіті в шарах іоносфери динамічний натиск іонів плазми  $P$ , що набігає на площу магнітосфери створює гальмівну силу  $F_{гал}$ . Вектор гальмівної сили направлений у протилежну сторону відносно вектора швидкості та головного вектора руху КА по орбіті, рис. 2. Екрановані контейнери забезпечують необхідний алгоритм створення штучної магнітосфери, а звідси і додаткової тяги, при відкриванні, в залежності від завдань керування.

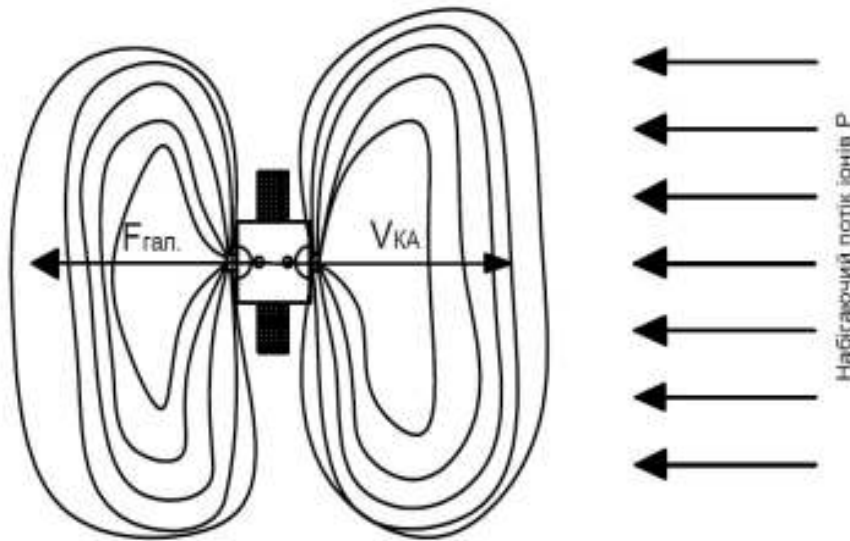


Рисунок 2 – Гальмівна сила при русі КА по навколоземній орбіті на висоті 600 – 900 км

Для розробки конструктивної схеми ДУПМ, по-перше, необхідно вибрати магнітний матеріал постійного магніту, який має оптимальні магнітні та теплофізичні характеристики, що відповідають вимогам при експлуатації на навколоземній орбіті в шарах іоносфери. Відомо, що згідно стандарту [4], температура на навколоземній орбіті в шарах іоносфери на висоті 600 – 900 км, в залежності від сонячної активності, коливається від 696 – 1310 К. Згідно даним температурним показникам, проаналізуємо теплофізичні характеристики постійних магнітів, що приведено в табл. 1 [5]. Виходячи з даних показників, постійним магнітом, що найбільш відповідає температурним вимогам експлуатації на навколоземній орбіті в шарах іоносфери та у відкритому космосі, є матеріал Alnico 5. Alnico 5 має максимальну температуру експлуатації  $T_{\max} = 771$  К та не потребує сильного термодинамічного захисту. Також Alnico 5 має оптимальні показники густини, що є досить важливим при розрахунках додаткової маси КА.

Аналізуючи дані магнітних характеристик, можна зробити висновок, що Alnico 5 має досить високі показники залишкової магнітної індукції  $B = 1,25$  Тл, а при повній магнітній поляризації може досягнути  $J = 1,4$  Тл., що є досить важливим при розрахунках характеристик штучної магнітосфери.

Таблиця 1

## Теплофізичні характеристики постійних магнітів

Магнітний матеріал	Густина $\rho \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Термічне розширення $\alpha \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Питомий електричний опір $\rho' \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$T_{\text{max}}$ К
$\text{SrFr}_{12}\text{O}_{19}$	4300	10	$10^8$	521
Alnico 5	7200	12	0,5	771
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	8400	10	0,9	621
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	7400	-2	1.5	431

Таблиця 2

## Магнітні характеристики постійних магнітів

Магнітний матеріал	Залишкова магнітна індукція $B_r = \mu_0 \cdot M_r \text{ (Тл)}$	Повна магнітна поляризація $J$ (Тл)	Внутрішня коерцитивність $H_c$ кА/м Виміряна на петлі М(Н)	Стандартна коерцитивність $H_c$ кА/м виміряна на петлі В(Н)
$\text{SrFr}_{12}\text{O}_{19}$	0,42	0,47	275	265
AlNiCo	1,25	1,4	54	52
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	1,08	1,15	1100	800
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1,28	1,54	1000	900

Отже, виходячи з усіх характеристик магнітних матеріалів, найбільш оптимальним постійним магнітом для ДУПМ є Alnico 5.

Наступним кроком, при розробці конструктивної схеми, є вибір екрануючого матеріалу для контейнерів. Найбільш економічно вигідним та надійним є багатошарові плівкові екранні матеріали, що виготовляються методом електролітичного нанесення на алюмінієвий каркас магнітних слоїв NiFe товщиною від 10 мкм до 150 мкм, та слоїв міді, товщиною 5-10 мкм [6].

Для розрахунків магнітного моменту по формулі (10) необхідно обрати форму об'єму постійного магніту  $V$ . В першому наближенні, для простоти розрахунків, оберемо форму постійного магніту в вигляді призми та циліндра, що поміщуються в екранований напівсферичний контейнер (див. рис. 1):

$$V_1 = a \cdot b \cdot l \quad (14)$$

$$V_2 = \pi \cdot R^2 \cdot l \quad (15)$$

магніту де  $a$  – довжина призмичного магніту,

$b$  – ширина призмичного магніту,

$R$  – радіус циліндричного магніту,

$l$  – товщина (циліндричного і призмичного).

Розрахунок сили тяги та гальмування, що дає постійний магніт Alnico 5 буде приведено у наступному розділі статті.

Розрахунок сили тяги (гальмування), що дає ДУПМ та оцінка її ефективності. При русі КА по навколоземній орбіті його орбітальна швидкість розраховується по формулі:

$$v_{орб.} = \sqrt{\frac{\mu}{H + R_{зем.}}}, \quad (16)$$

де  $\mu = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$  – гравітаційний параметр Землі,

$R_{зем.}$  – радіус Землі,

$H$  – висота від 600 до 900 км (візьмемо чотири проміжних положення 600 км, 700 км, 800 км, 900 км).

Густина заряджених часток  $\rho_{ион.} = m_i \cdot n$  в іоносфері на висотах 600 км, 700 км, 800 км і 900 км вдень розраховується із [4].

Представимо розрахунки швидкості і густини в табл. 3

Таблиця 3

Орбітальна швидкість і густина заряджених часток  
в іоносфері (600 – 900 км)

Висота $H$ км	600	700	800	900
Орбітальна швидкість КА $v_{орб.}$ м/с	7562	7508	7456	7404
Щільність заряджених часток вдень $\rho_{ион.дн.}$ кг / м <sup>3</sup>	$9,3 \cdot 10^{-16}$	$4,5 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$
Щільність заряджених часток вночі $\rho_{ион.ніч.}$ кг / м <sup>3</sup>	$4,2 \cdot 10^{-16}$	$2,3 \cdot 10^{-16}$	$1,4 \cdot 10^{-16}$	$9,6 \cdot 10^{-17}$

Маючи характеристики орбітальної швидкості, густини заряджених часток, а також характеристики постійного магніту, використовуючи алгоритм (1-13) можна розрахувати гальмівну силу для КА на навколоземній орбіті. Підставивши значення з формули (13) в (1), та з урахуванням (14) і (15), формула для обчислення гальмівної сили прийме вид:

$$F_{гальм.1} = C_d \cdot \frac{\rho_{ион.дн./ніч.} \cdot v_{орб.}^2}{2} \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{(B_r \cdot \pi \cdot R^2 \cdot l)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{ион.дн./ніч.} \cdot v_{орб.}^2 \cdot \mu_0}} \quad (17)$$

$$F_{\text{гальм.2}} = C_d \cdot \frac{\rho_{\text{іон.дн./ніч.}} \cdot v_{\text{орб.}}^2}{2} \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{(B_r \cdot a \cdot b \cdot l)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{\text{іон.дн./ніч.}} \cdot v_{\text{орб.}}^2 \cdot \mu_0}} \quad (18)$$

Використовуючи формули (17) і (18) розрахуємо гальмівну силу для двох видів об'ємів  $V_1$  та  $V_2$  магніту Alnico 5 з урахуванням густини заряджених часток вдень  $\rho_{\text{іон.дн.}}$  і вночі  $\rho_{\text{іон.ніч.}}$  та розрахунків  $C_d$  (з першого виразу, формули 7). Стосовно габаритних характеристик постійних магнітів виберемо три варіанти для призмичного магніту з  $a = b = 0,1; 0,3; 0,5\text{ м}$  та циліндричного з  $R = 0,1; 0,3; 0,5\text{ м}$  з постійною товщиною  $l = 0,01\text{ м}$  для кожного з них. Представимо розрахунки гальмівної сили для висоти 600 км в табл. 4.

Таблиця 4

Розрахунок гальмівної сили, що створює ДУПМ на висоті 600 км

Розмір магніту (a=b=R), м	0.1	0.3	0.5
$F_{\text{гальм.1ДЕНЬ}}, \text{ Н}$	$1,132 \cdot 10^{-3}$	$4,897 \cdot 10^{-3}$	$9,677 \cdot 10^{-3}$
$F_{\text{гальм.1НІЧ}}, \text{ Н}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$

По розрахунках гальмівної сили для висоти 600 км, можна зробити висновок, що максимальну силу отримуємо вдень, коли щільність заряджених часток іоносфери максимальна. Для оцінки ефективності дії гальмівної сили, розрахуємо збурення, що діють на КА на висоті 600 км. Головними збуреннями, що діють на КА, є гравітаційні збурення та аеродинамічний натиск (сила атмосферного гальмування). В даному випадку, для оцінки ефективності дії гальмівної сили її треба порівняти з силою аеродинамічного натиску, що дає збурення і гальмує КА. Сила аеродинамічного натиску розраховується по формулі:

$$F_{\text{аерд.гальм}} = C_x \cdot \frac{\rho_{\text{атм.}} \cdot v_{\text{орб.}}^2}{2} \cdot S_{\text{Мід.}} \quad (19)$$

де  $C_x = 2,2$  – коефіцієнт аеродинамічного гальмування,

$\rho_{\text{атм.}}$  – щільність атмосфери,

$S_{\text{Мід.}}$  – переріз Міделя КА.

Для першого наближення візьмемо форму КА у вигляді куба (кубсат), з ребром  $k$ , та проаналізуємо силу аеродинамічного гальму-

вання для КА на які можна було б встановити магніти ДУПМ із табл. 4. Візьмемо  $k = 0,2; 0,6; 1$ , та розрахуємо аеродинамічне гальмування, де переріз Міделя у випадку неорієнтованого руху розраховується по формулі:

$$S_{\text{Мид.}} = \frac{S_{\text{н.п.КА}}}{4}, \quad (20)$$

де  $S_{\text{н.п.КА}}$  – площа повної поверхні КА, що взаємодіє з набігаючим натиском атмосфери.

У випадку кубічної форми КА, формула (20), запишеться, як:

$$S_{\text{Мид.}} = 1,5 \cdot k^2 \quad (21)$$

Представимо розрахунки аеродинамічного збурення (гальмування) в табл.5.

Таблиця 5

Розрахунок аеродинамічного гальмування на висоті 600 км

Розмір КА (к),	0.2	0.6	1
$F_{\text{аерд.гальм}}, \text{ Н}$	$4,642 \cdot 10^{-8}$	$4,178 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$

Так, порівнюючи дані із таблиць 4 і 5, можна зробити висновок, що використання ДУПМ на висоті 600 км є доцільним, оскільки гальмівна сила, яку створює ДУПМ на декілька порядків більша, ніж сила аеродинамічного гальмування. Отже, при відкритті створів екранованих контейнерів загальна гальмівна сила, що дорівнює сумі аеродинамічного гальмування і гальмівної сили ДУПМ збільшується на декілька порядків. Використовуючи ДУПМ, можна при мінімальних витратах зменшувати висоту орбіти КА, та зводити з орбіти, після закінчення терміну експлуатації, рис. 3

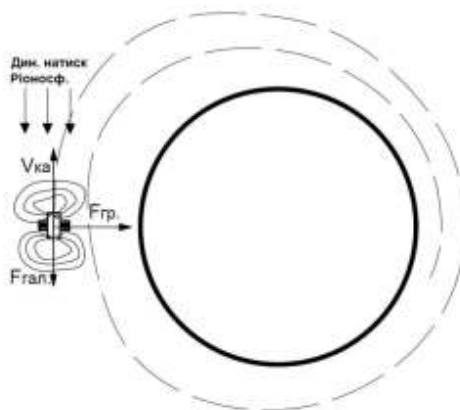


Рисунок 3 – Відведення КА з орбіти з використанням ДУПМ



Згідно отриманим розрахункам, на висотах 700 – 900 км, сила гальмування зменшується всього на декілька одиниць того ж порядку, що і на висоті 600 км, з чого можна зробити висновок, що значення сили гальмування є достатнім для застосування ДУПМ в даних умовах, як системи керування висотою польоту КА, та системи відведення його з орбіти по закінченню терміну активної експлуатації.

### Висновки

Результати розрахунків показали, що застосування ДУПМ на навколоземній орбіті, є досить ефективним, оскільки отримуємо тягу достатню для здійснення керування орбітальним рухом та траєкторією польоту КА. Використання ДУПМ на навколоземній орбіті є найбільш доцільним при рішенні задач зниження висоти орбіти КА та відведення з орбіти відпрацьованих КА. Також, виходячи з розрахунків, ДУПМ підходить для великого розмірного ряду КА. На навколоземній орбіті ДУПМ є досить вигідною системою відведення з орбіти відпрацьованих КА, оскільки не потребує додаткової бортової енергії та палива

### ЛІТЕРАТУРА

1. Ikkoh Funaki. Solar Wind Sails, Exploring the Solar Wind / Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa//InTech. –2012. - №65,  
URL: <http://www.intechopen.com/books/exploring-the-solar-wind/solar-wind-sails> (дата звертання 09.13.2018).
2. Yasumasa Ashida. Study on propulsive characteristics of magnetic sail and magneto plasma sail by plasma particle simulations: PhD dissertation. - Kyoto, 2014 – p. 7 –15.  
URL: [https://repository.kulib.kyotou.ac.jp/dspace/bitstream/2433/196686/1/rishsh%2001000\\_028.pdf](https://repository.kulib.kyotou.ac.jp/dspace/bitstream/2433/196686/1/rishsh%2001000_028.pdf) (дата звертання 09.13.2018).
3. Горшков О.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов/ О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда// -М. Машиностроение, 2008, 280с.
4. European cooperation for space standardization. Space engineering and space environment. ECSS-E-ST-10-04C, 2008.
5. Coey. J. Magnetism and magnetic materials / J. Coey// Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, –2010., P. 471.
6. Пат. РФ на винахід 2030139, МПК7 В 64 G 9/00. Магнитный экран / М. Ф. Остриков, В. С. Кирилкін. – 5021893/21; заявл. 25.12.91 ; опубл. 27.02.95.

К.І. Узлов, А.В. Дзюбіна, Н.С. Романова, О.В. Мовчан

**ОБЧИСЛЕННЯ ТОЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ТЕМПЕРАТУР  
ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ  
МАТЕМАТИЧНОЇ ОБРОБКИ В ПАКЕТІ MATHCAD  
ДАНИХ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ТЕРМІЧНОГО АНАЛІЗУ**

*Анотація. Обчисленням даних диференційного термічного аналізу дослідного сплаву системи Cu–Sn–Si за допомогою математичного процесора MathCAD 14 в інтервалі температур 20 ... 624°C визначене положення точок перегинів та екстремуму. Коректні значення температур низькотемпературного (перегин), середньотемпературного (перегин) та високотемпературного (екстремум) твердофазних структурних перетворень в дослідному сплаві встановлені як:  $T_X = 274.5^\circ\text{C}$ ,  $T_Y = 368.25^\circ\text{C}$  та  $T_Z = 507.5^\circ\text{C}$  з коефіцієнтами кореляції поліноміальної апроксимації:  $r = 0.995$ ,  $r = 0.995$  та  $r = 0.978$ , відповідно.*

*Ключові слова: апроксимація, екстремум, функція, перегин, кореляція, сплав системи Cu–Sn–Si.*

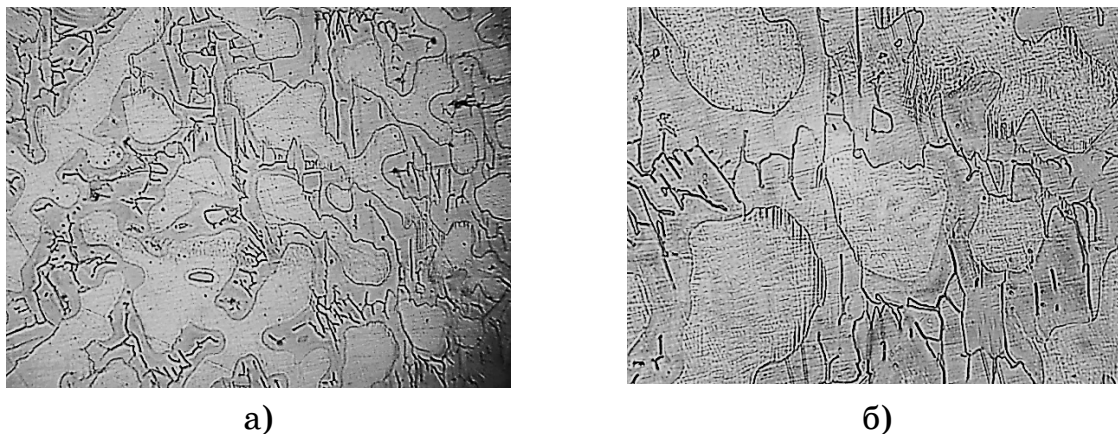
**Стан проблеми**

Об'єктом дослідження наявної роботи був сплав системи Cu–Sn–Si для виготовлення дзвонів та елементів музичних інструментів ударного типу.

Традиційна дзвонова бронза це сплав міді із 20,0 ... 22,5% Sn (за масою) [1]. Звучання дзвонової бронзи насамперед залежить від рівня напруженого стану сплаву, тобто від вмісту у ньому інтерметалідної фази. У дзвоновій олов'яній бронзі інтерметалідною фазою є сполука  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . Основним недоліком цієї бронзи є наявність у складі великої кількості коштовного олова.

Для зниження собівартості виробів автори [2, 3] запропонували бронзу складу (мас.%): мідь 78,00-80,00%, олово 8,00-10,00%, сурма 10,60-11,50%, свинець 0,08-0,16%. Такий сплав містить у два рази меншу кількість олова. Мікроструктура цієї бронзи є гетерогенною і, за даними [2], складається з  $\alpha$ -твердого розчину та евтектоїду ( $\alpha+\beta+\epsilon$ ).

За даними власних досліджень, був запропонований сплав для дзвонів, який не поступається за акустичними показниками вказаним бронзам. Цей сплав вміщує ще у два рази меншу кількість олова, проти сплаву [2, 3] наведеного вище, та додатково – легуючий компонент кремній. Мікроструктура матеріалу об'єкту дослідження представлена на рисунку 1.



а - Ч200, б - Ч500

Рисунок 1 – Мікроструктура дослідної дзвонової бронзи

З метою досконалої ідентифікації впливу структури на акустичні властивості нового сплаву необхідним є ретельне дослідження закономірностей фазових рівноваг в системі мідь-олово-кремній. Але аналіз відомих [4 – 9] діаграм фазових рівноваг мідних сплавів не виявив наявності діаграми такої трикомпонентної системи.

#### Завдання дослідження

Для вивчення закономірностей структуроутворення дослідного сплаву в роботі був проведений аналіз структурних та фазових перетворень в системі Cu-Sn-Si методом диференційного термографування [10]. Результати диференційного термічного аналізу (ДТА) наведені на рисунку 2.

Аналіз рисунку 2 свідчить про те, що фазові перетворення при охолодженні в інтервалі температур 880 – 644°C не викликають сумніву з точки зору їх ідентифікації. В характеристичних температурних інтервалах зафіксовані чіткі максимуми або сходінки.

Не зрозумілим є інтервал температур 644 – 125°C, який за характером кривої охолодження має перегини та екстремум. Високо- та низькотемпературні перегини за характером поведінки диференційної кривої зазвичай характеризують дифузійні процеси, пов'язані із гомогенізацією ліквацийних структурних зон сплавів та/або із розпа-

дом пересичених твердих розчинів [11]. Але візуально ідентифікувати коректні температурні позиції цих перетворень неможливо.

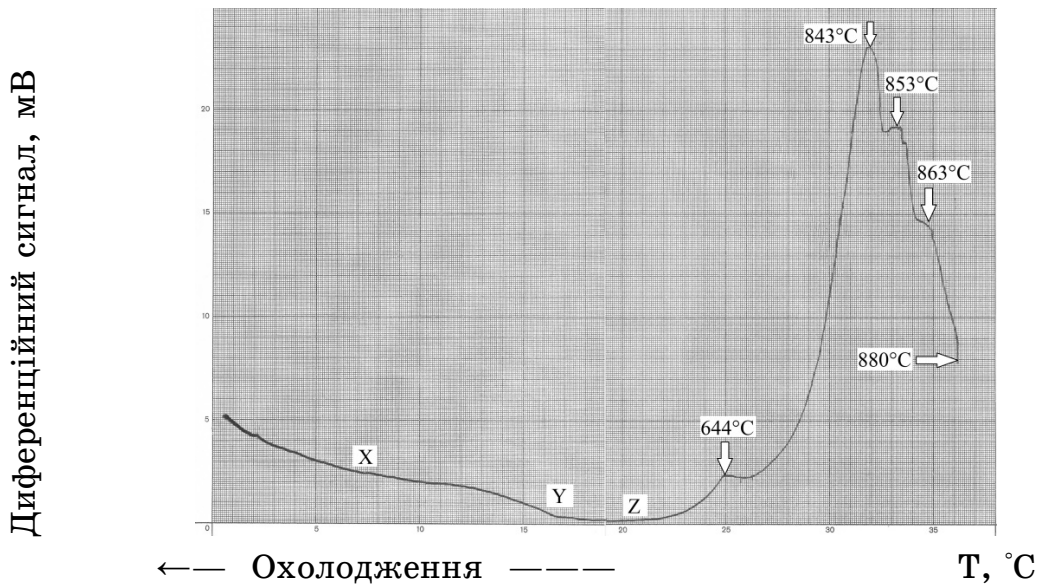


Рисунок 2 – Диференційна термограма процесу охолодження дослідного сплаву

### Основні результати досліджень

Результати обробки експериментальних даних у пакеті MathCAD 14.

В роботі було здійснено математичне обчислення даних диференційного термічного аналізу за допомогою математичного процесора MathCAD 14. Для визначення температур перетворень експериментальну криву апроксимували поліномами у низько- та високо-температурних інтервалах: 124 ... 325°C, 175 ... 445°C та 420 ... 624°C. Подальший аналіз кожної поліноміальної залежності з точки зору наявності точок перегину та локальних екстремумів здійснювали за допомогою стандартних методики математичного аналізу та функцій MathCAD14 `regress ()`, `interp ()` [12].

Графічна презентація експериментальних даних залежності диференційного сигналу від температури при охолодженні представлена на рисунку 3.

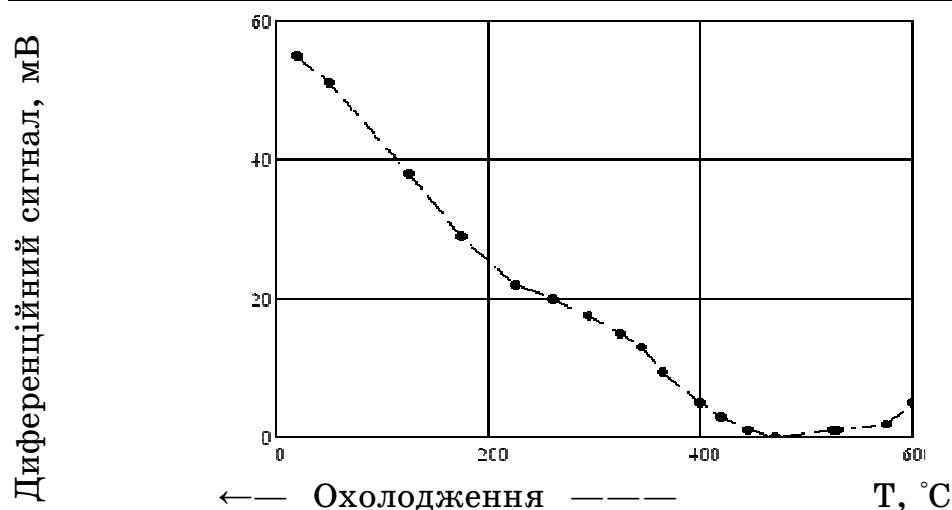


Рисунок 3 – Залежність експериментальних значень ДТА від температури охолодження в інтервалі 20...624<sup>0</sup>C

### Вихідні дані результатів ДТА

Вихідні дані результатів ДТА представлені в Таблиці 1 у вигляді масиву «X», де колонка X<0> - вектор значень температур (Т,°C), а колонка X<1> - вектор значень диференційного сигналу (Y,мВ).

Таблиця 1

Вихідні дані результатів диференційного термічного аналізу

№з/п	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
X<0>	20	50	125	175	225	260	295	325	345	365	400	420	445	470	524	529	574	600	624
X<1>	55	51	38	29	22	20	17.5	15	13	9.5	5	3	1	0	1	1	2	5	10

Поліноміальна апроксимація експериментальних даних ДТА в температурному інтервалі 50 ... 365°C.

Вихідні дані цього інтервалу представлені у вигляді масиву X1. З використанням стандартної функції regress(), побудована математична модель термограми в інтервалі 50...3650C у вигляді поліному третього ступеню:  $Y_{\text{розрах.}} = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3$ , де  $a_i$  – коефіцієнти поліноміальної моделі;  $Y_{\text{розрах.}}$  – вектор значень розрахованого диференційного сигналу на основі математичної моделі; X - вектор значень температур. Ступінь адекватності одержаної моделі оцінювалася за величиною коефіцієнту кореляції між експериментальними даними і даними, які одержані на основі побудованої моделі. Дані, які одержані на основі побудованої моделі розраховані з використанням функції interp(), а коефіцієнт кореляції – з використанням функції corr(). Результати розрахунків математичної моделі зведені у таблиці 2.

Як впливає зі значення коефіцієнту кореляції ( $\text{corr}(X1^{(1)}, X1^{(2)}) = 0.995$  – таблиця 2), відносна похибка між експериментальними даними та даними, які одержані на основі поліноміальної моделі третього ступеню не перевищує 0.005%. Це свідчить про високу ступінь адекватності запропонованої моделі для апроксимації експериментальних даних у вказаному інтервалі температур.

Подальший математичний аналіз одержаної поліноміальної залежності на наявність точок перегину пов'язаний з побудовою рівняння похідної другого порядку та його роздільною здатністю відносно температури термічного ефекту. Ці графічні побудови і розрахунки, що були проведені з використанням функції  $\text{root}()$ , представлені на рисунках 4 та 5, де  $f12(x)$  – друга похідна поліноміальної моделі по температурі.

Результат розрахунку:  $\text{root}(f12(x), x, 200, 300) = 274.518$ .

Таким чином, обчисленням даних диференційного термічного аналізу дослідного сплаву системи Cu–Sn–Si (Рисунок 3) за допомогою математичного процесора MathCAD 14 у низькотемпературному інтервалі 50...365°C визначене положення точки перегину, яке відповідає показнику 274.518. Тобто, значення температури низькотемпературного структурного перетворення (Рисунки 2, 5) в дослідному сплаві встановлене як:  $T_X = 274.5^\circ\text{C}$ .

Таблиця 2

Результати розрахунків математичної моделі термограми в інтервалі температур 50...365°C

$X1^{(0)}$ - вектор значень температур; $X1^{(1)}$ - вектор значень диференційного сигналу		
$X1 = \begin{pmatrix} 50 & 51 \\ 125 & 38 \\ 175 & 29 \\ 225 & 22 \\ 260 & 20 \\ 295 & 18 \\ 325 & 17 \\ 345 & 13 \\ 365 & 9 \end{pmatrix}$	$R := \text{regress}(X1^{(0)}, X1^{(1)}, 3)$ $R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 66.087 \\ -0.333 \\ 8.88 \times 10^{-4} \\ -1.078 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$	$a0=66.087$ $a1=-0.333$ $a2=8.88 \times 10^{-4}$ $a3=-1.078 \times 10^{-6}$ $f1(x) := \text{interp}(R, X1^{(0)}, X1^{(1)}, x)$ , де $f1(x)$ - вектор значень $Y$ розрах., $X1^{(2)} = f(x)$
$\text{corr}(X1^{(1)}, X1^{(2)}) = 0.995$		

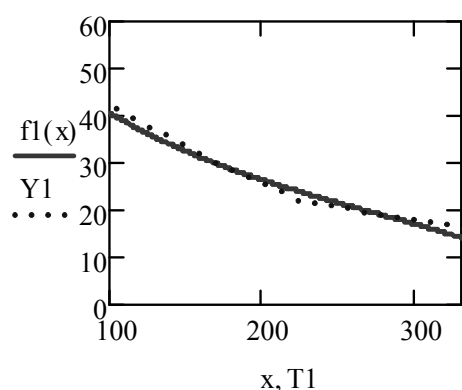


Рисунок 4 – Залежність експериментальних значень ДТА від температури охолодження в інтервалі 50...365<sup>0</sup>С

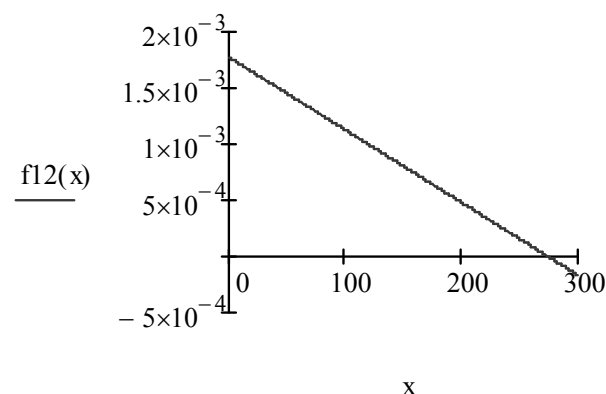


Рисунок 5 – Графік залежності другої похідної поліноміальної моделі від температури охолодження в інтервалі температур 50...365<sup>0</sup>С

Поліноміальна апроксимація експериментальних даних ДТА в температурному інтервалі 295 ... 470<sup>0</sup>С.

Вихідні дані цього інтервалу представлені у вигляді масиву X2. З використанням стандартної функції regress() побудована математична модель термограми в інтервалі 295 ... 470<sup>0</sup>С у вигляді поліному третього ступеню:  $Y_{\text{розрах.}} = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3$ . Результати розрахунків математичної моделі зведені у Таблиці 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків математичної моделі термограми в інтервалі температур 295 ... 470<sup>0</sup>С

$X2^{(0)}$ - вектор значень температур, $X2^{(1)}$ - вектор значень диференційного сигналу		
$X2 = \begin{pmatrix} 295 & 18 \\ 325 & 17 \\ 345 & 13 \\ 365 & 9 \\ 420 & 3 \\ 445 & 1 \\ 470 & 0 \end{pmatrix}$	$R := \text{regress}(X2^{(0)}, X2^{(1)}, 3)$ $R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ -213.492 \\ 2.118 \\ -6.16 \times 10^{-3} \\ 5.576 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$	$a_0 = -213.492$ $a_1 = 2.118$ $a_2 = -6.16 \times 10^{-3}$ $a_3 = 5.576 \times 10^{-6}$ $f_2(x) := \text{interp}(R, X2^{(0)}, X2^{(1)}, x)$ , де $f_2(x)$ - вектор значень $Y_{\text{розрах.}}$ , $X2^{(2)} = f(x)$
$\text{corr}(X2^{(1)}, X2^{(2)}) = 0.995$		

Як впливає зі значення коефіцієнту кореляції  $(\text{corr}(X_2^{(1)}, X_2^{(2)}) = 0.995$  – таблиця 3), відносна похибка між експериментальними даними та даними, які одержані на основі поліноміальної моделі третього ступеню не перевищує 0.005%. Це свідчить про високу ступінь адекватності запропонованої моделі для апроксимації експериментальних даних у вказаному інтервалі температур.

Результати математичного аналізу на наявність точки перегину представлені на рисунках 6 та 7, де  $f_{22}(x)$  – друга похідна поліноміальної моделі по температурі.

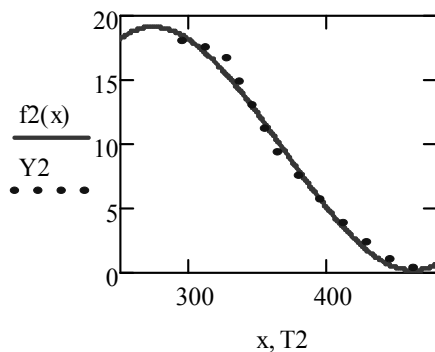


Рисунок 6 – Залежність експериментальних значень ДТА від температури охолодження в інтервалі 295...470°C

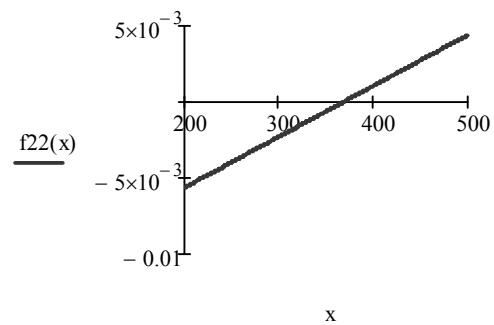


Рисунок 7 – Графік залежності другої похідної поліноміальної моделі від температури охолодження в інтервалі температур 295...470°C

Поліноміальна апроксимація експериментальних даних ДТА в температурному інтервалі 420 ... 624°C

Вихідні дані цього інтервалу представлені у вигляді масиву  $X_3$ . З використанням стандартної функції `regress()` побудована математична модель термограми в інтервалі 420 ... 624°C у вигляді поліному третього ступеню:  $Y_{\text{розрах.}} = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3$ . Результати розрахунків математичної моделі зведені у Таблиці 4.

Як впливає зі значення коефіцієнту кореляції  $(\text{corr}(X_3^{(1)}, X_3^{(2)}) = 0.978$  – таблиця 4), відносна похибка між експериментальними даними та даними, які одержані на основі поліноміальної моделі третього ступеню не перевищує 0.022%. Це свідчить про високу ступінь адекватності запропонованої моделі для апроксимації експериментальних даних у вказаному інтервалі температур.

Результати математичного аналізу на наявність екстремуму представлені на Рисунках 8 та 9, де  $f_{31}(x)$  – перша похідна поліноміальної моделі по температурі.



Результат розрахунку:  $\text{root}(f31(x), x, 500, 520) = 507.512$ .

Таким чином, обчисленням даних диференційного термічного аналізу дослідного сплаву системи Cu–Sn–Si (Рисунок 3) за допомогою математичного процесора MathCAD 14 у високотемпературному інтервалі 420 ... 6240С визначене положення точки екстремуму, яке відповідає показнику 507.512. Тобто, значення температури високотемпературного структурного перетворення (рисунки 2, 9) в дослідному сплаві встановлене як:  $TZ = 507.5^\circ\text{C}$ .

Таблиця 4

Результати розрахунків математичної моделі термограми  
в інтервалі температур 420 ... 624°С

$X3^{(0)}$ - вектор значень температур, $X3^{(1)}$ - вектор значень диференційного сигналу		
$X3 = \begin{pmatrix} 420 & 3 \\ 445 & 1 \\ 470 & 0 \\ 524 & 1 \\ 529 & 1 \\ 574 & 2 \\ 600 & 5 \\ 624 & 10 \end{pmatrix}$	$R := \text{regress}(X3^{(0)}, X3^{(1)}, 3)$ $R = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ -113.134 \\ 0.913 \\ -2.281 \times 10^{-3} \\ 1.814 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$	$a0 = -113.134$ $a1 = 0.913$ $a2 = -2.26 \times 10^{-3}$ $a3 = 1.814 \times 10^{-6}$ $f3(x) := \text{interp}(R, X3^{(0)}, X3^{(1)}, x)$ , де $f3(x)$ - вектор значень Урозрах., $X3^{(2)} = f(x)$
$\text{corr}(X3^{(1)}, X3^{(2)}) = 0.978$		

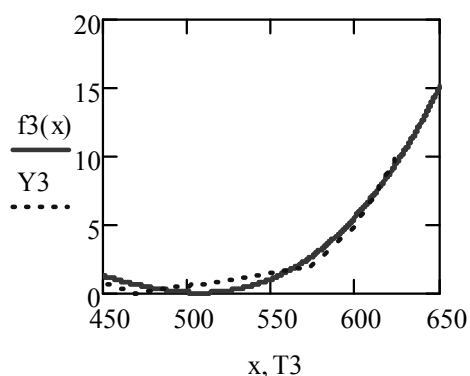


Рисунок 8 – Залежність експериментальних значень ДТА від температури охолодження в інтервалі 420...624°С

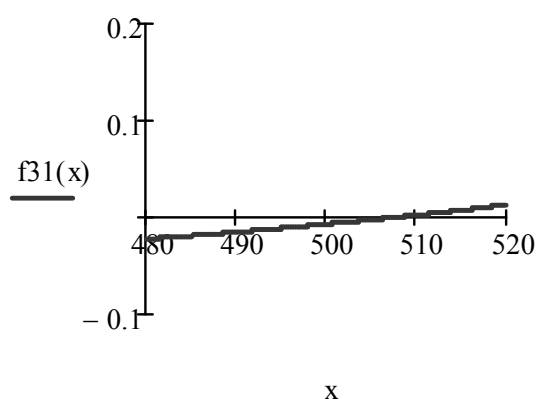


Рисунок 9 - Графік залежності першої похідної поліноміальної моделі від температури охолодження в інтервалі температур 420...624°С

## Висновки

1. Обчисленням даних диференційного термічного аналізу дослідного сплаву системи Cu–Sn–Si за допомогою математичного процесора MathCAD 14 в інтервалі температур 20 ... 624°C визначене положення точок перегинів та екстремуму на експериментальній кривій диференційного термічного аналізу в області твердофазних перетворень.

2. Коректне значення температури низькотемпературного структурного перетворення (перегин) в дослідному сплаві встановлене як  $T_X = 274.5^\circ\text{C}$  з коефіцієнтом кореляції поліноміальної апроксимації  $r = 0.995$ .

3. Коректне значення температури середньотемпературного структурного перетворення (перегин) в дослідному сплаві встановлене як  $T_Y = 368.25^\circ\text{C}$  з коефіцієнтом кореляції поліноміальної апроксимації  $r = 0.995$ .

4. Коректне значення температури високотемпературного структурного перетворення (екстремум) в дослідному сплаві встановлене як  $T_Z = 507.5^\circ\text{C}$  з коефіцієнтом кореляції поліноміальної апроксимації  $r = 0.978$ .

## ЛІТЕРАТУРА

1. Богуслаєв В.О. Ливарні властивості металів і сплавів для прецизійного литва / В.О. Богуслаєв, С.І. Реп'ях, В.Г. Могилащенко та ін. – Запоріжжя: АТ «МОТОР СІЧ», 2016. – 474 с.
2. Лисовский В.А. Экономнолегированные колокольные бронзы с повышенными характеристиками механических свойств / В.А. Лисовский, О.Б. Лисовская, Л.П. Кочеткова, Ю.К. Фастов // Металловедение и термическая обработка металлов, 2007. - №5 (623). - С. 23 - 25.
3. Пат. 2265894 РФ, МПК7 G10K, 1/00. Патентообладатель - Вятский государственный университет (ВятГУ) (RU). Материал для изготовления колоколов и звучащих элементов ударных музыкальных инструментов / О.Б. Лисовская, В.А. Лисовский, заявл. 07.07.04; опубл. 10.12.05 // Бюл.2005. №34. С.4.
4. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди /Под ред. С.В. Шухардина. – М.: Наука, 1979. – 249 с.
5. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник в 3-х томах / Н.П. Лякишев. – М.: Машиностроение, 1996..
6. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник / Под ред. М. Е. Дрица. - М.: Наука. - 1979. - 246 с.
7. Хансен М. Структура двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. - М.: Металлургиздат. - 1962. - Т. 1 - 608 с.
8. Хансен М. Структура двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. - М.: Металлургиздат. - 1962. - Т. 2 - С. 613 - 1488.
9. ASM Metals Handbook. Volume 03: Alloy Phase Diagrams / ASM International. Режим доступа:  
[http://www.asminternational.org/search/-/journal\\_content/56/10192/25871543/PUBLICATION](http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION)
10. Приборы и методы физического металловедения В двух томах/ под ред. Ф. Вейнберга. – М.: Мир. – 1973.
11. Древинг В.П. Правило фаз / В.П. Древинг. – М.: Издательство МГУ, 1954. – 173 с.
12. Очков В. Ф. MathCAD 14 для студентов, инженеров и конструкторов / В. Ф. Очков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2007. — 368 с.

A.A. Nadtochij, N.M. Velikonskaya

## ANALYSIS OF THE EQUILIBRIUM DISTRIBUTION OF PHASES OF THE SYSTEM Fe-P-C IN THE PREPARATION OF PHOSPHORIC FERROALLOYS

*Abstract: A theoretical analysis of the possibility of using phosphorites of domestic deposits as a raw material for the production of ferrophosphorus has been carried out. The equilibrium phase distribution under basicity and temperature variables is considered. The behavior of compounds under reducing conditions is substantiated using programs for thermodynamic modeling.*

*Keywords: phosphorites, ferroalloys, tricalcium phosphate, reduction processes, basicity, equilibrium composition*

### **Problem formulation.**

An increase in the nomenclature and volume of smelting of phosphorus-doped steels increases the requirements for the quality of phosphorous alloying ferroalloys. In Ukraine, ferrophosphorus is not produced, and the demand for it is realized through imports. A study of the mineralogical composition of the phosphorite of Ukraine deposits, carried out after a preliminary analysis of the reduction electrofusion of phosphorite ore and concentrates of its enrichment, showed the possibility of their application to the production of ferrophosphorus. The most promising resource for electrothermal production of phosphorus was considered [1] phosphorites of the Malokamyshevatsky deposit of the Kharkov region (Peremoga site).

### **The purpose of the article.**

Phosphorous ferroalloys are alloys based on iron with a phosphorus content of 15 to 25% [2, 3]. In foundry pig iron, phosphorus improves fluidity. The content of phosphorus from 0.08 to 0.15% enhances the special characteristics of the automatic steel grade A12, corrosion-resistant construction steel 10XHДП, steel grade 08YuP for automotive sheet and others.

The gross composition (% mass) of phosphorite ore from the ore deposit of the "Peremoga" site is shown in Table 1.

It is established [2] that the phosphorus-containing substance in samples of phosphorite ore is represented by a mass of cementing non-metallic minerals (mainly quartz, glauconite, calcite and plagioclase). Energy-dispersive and X-ray phase analyzes made [4] it possible to identify and classify the phosphate material of cement to the francolite mineral.

Table 1

## Mineralogical composition of phosphorite ore

P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 17,0	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5,05	FeO 0,65	SiO <sub>2</sub> 31,30	CaO 30,91	MgO 2,45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,72	MnO 0,30	Na <sub>2</sub> O 0,42	K <sub>2</sub> O 0,69	п.п.п. 6,80	F 1,50

Crystallochemical structure of Francolite [5]: Mohs hardness is 5, brittle, density is 3.18 g / cm<sup>3</sup>. In sedimentary rocks occurs in pelletized grains.

**Main material.**

In the first approximation, the chemical composition of phosphorite ore can be considered as a ternary system of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>, since the content of a mixture of these oxides is more than 80%.

Calculation of the equilibrium in the heterogeneous system P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – CaO – SiO<sub>2</sub>, carried out using the thermodynamic database "HSC Chemistry 6", without taking into account the formation of solutions and the imperfect behavior of the components, showed the formation of stable high-temperature compounds SiO<sub>2</sub>, CaO·SiO<sub>2</sub>, 2CaO·SiO<sub>2</sub>, 3CaO·2SiO<sub>2</sub>, 3CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. In the calculations of the equilibria of the P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – CaO – SiO<sub>2</sub> system, the influence of temperature and basicity on the phase distribution was investigated. Initial calculations in the temperature range 1000 - 1800 °C with a 20% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content and basicity equal to 1 are shown in Fig. 1.

Analysis of the data showed that the most stable phosphorus compound is 3CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, but at a temperature of ≈ 1400 °C its content decreases with a simultaneous increase in the calcium phosphate content of 2CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Calcium oxide with silicon oxide forms three kinds of double compounds. As the temperature rises, the CaO·SiO<sub>2</sub> content decreases, and the content of 2CaO·SiO<sub>2</sub>, 3CaO·2SiO<sub>2</sub> increases.

For a more detailed analysis of the effect of the amount of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the system on the equilibrium composition of the phases, calculations

were carried out (Fig. 2) at a constant temperature and basicity ( $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $B = 1$ ).

It was found that an increase in the  $\text{P}_2\text{O}_5$  content by more than 25% leads to a redistribution of the equilibrium phases: the amount of stable  $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  decreases and the amount of  $2\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  increases, which has a positive effect on the process of recovery.

Investigation of the influence of basicity ( $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) on the equilibrium composition of the phases (Fig. 3) made it possible to determine the optimum values of  $B = 0,6 - 0,7$ .

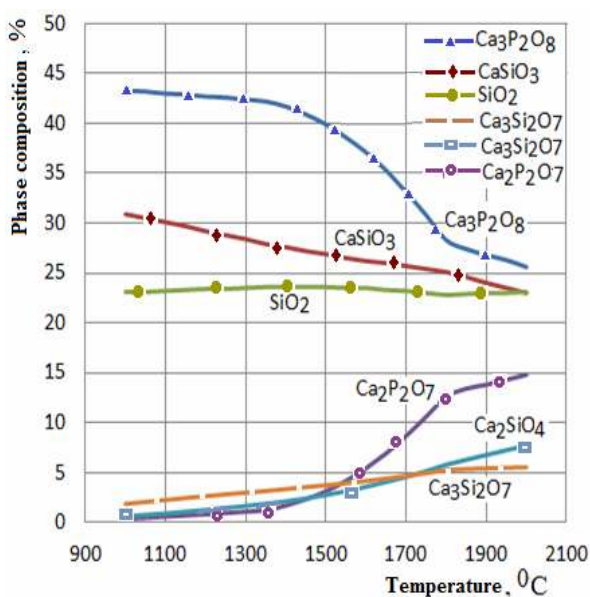


Figure 1 – Equilibrium phase composition of the  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  system in the temperature range  $1000 - 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\text{P}_2\text{O}_5 - 20\%$ ,  $B = 1$ )

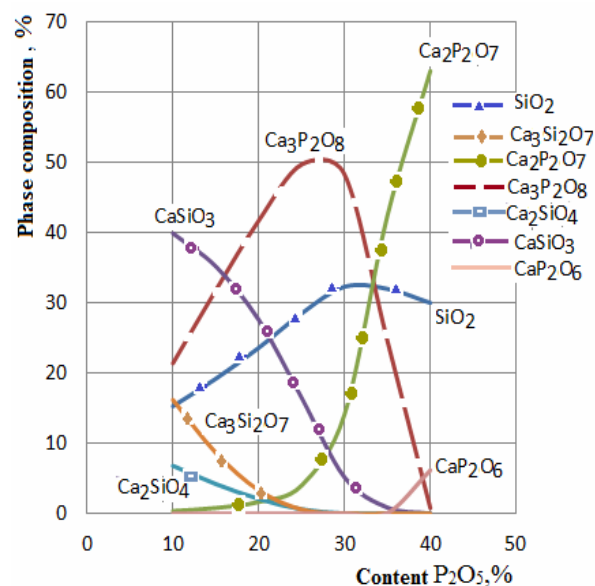


Figure 2 – Equilibrium phase composition of the  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  system as a function of the  $\text{P}_2\text{O}_5$  content ( $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $B = 1$ )

The amount of  $2\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  decreases, and the amount of tricalcium phosphate, which complicates the recovery process, increases. This is explained by a decrease in the amount of free  $\text{SiO}_2$ , which passes into  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$ .

The composition of phosphorites, except  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , includes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgO}$ . To determine the effect of each component, the  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  systems were studied for basicity of 0.7 and 25%  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

When the fourth component of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is added to the ternary system  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ , a complex compound of the composition  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$  is formed (Fig. 4). When 4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  is added, signifi-

cant amounts of a low durable  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  compound form in the system, and the addition of 8%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  results in the formation of a significant amount of free  $\text{P}_2\text{O}_5$  oxide. Thus, the introduction of  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 8\%$  in the system has a positive effect on the recovery of phosphorus.

Addition of up to 3%  $\text{MgO}$  to the system does not significantly affect the distribution of phases. An insignificant amount of  $\text{SiO}_2$  binds to the compound  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ .

A theoretical variant for the reduction of oxides of a composition similar to that of a charge during the production of ferrophosphorus is considered. The following quantities of charge materials were chosen as the starting materials: 85 kg of phosphorite ( $\approx 20\% \text{P}_2\text{O}_5$ ), 15 kg of quartzite, 10 kg of coke and 39 kg of iron shavings. Thermodynamic calculations were performed in the temperature range 500 – 1500 °C, the data are presented in Fig. 5, 6.

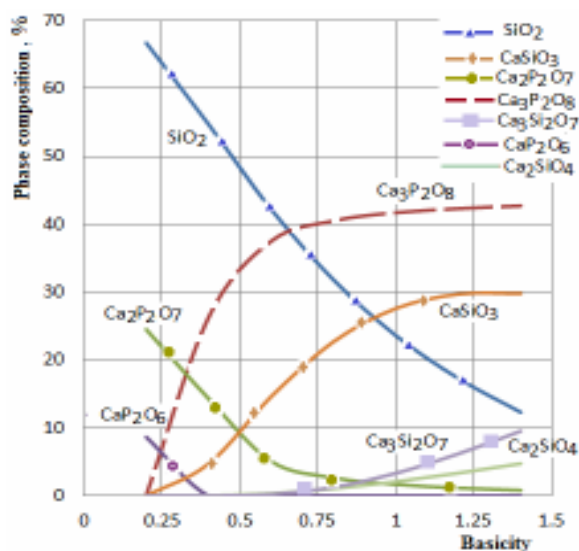


Figure 3 - Equilibrium phase composition of the  $\text{P}_2\text{O}_5$ -CaO- $\text{SiO}_2$  system, depending on the basicity of the charge ( $T = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ -20%)

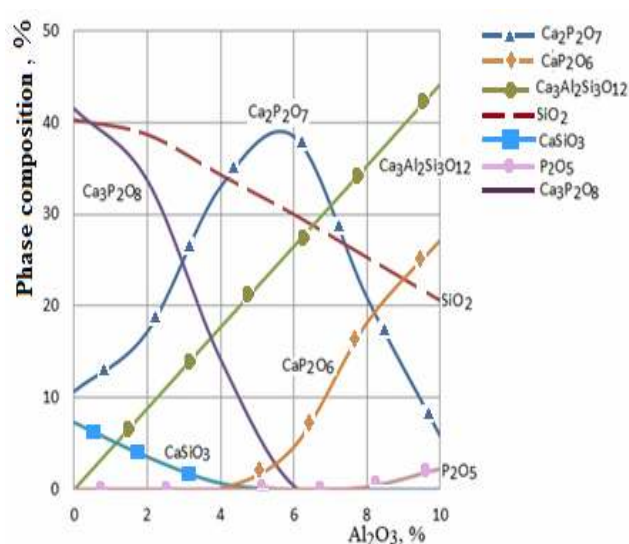


Figure 4 - Equilibrium phase composition of the  $\text{P}_2\text{O}_5$ -CaO- $\text{SiO}_2$  system as a function of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content of the charge ( $T = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  - 25%,  $B = 0.7$ )

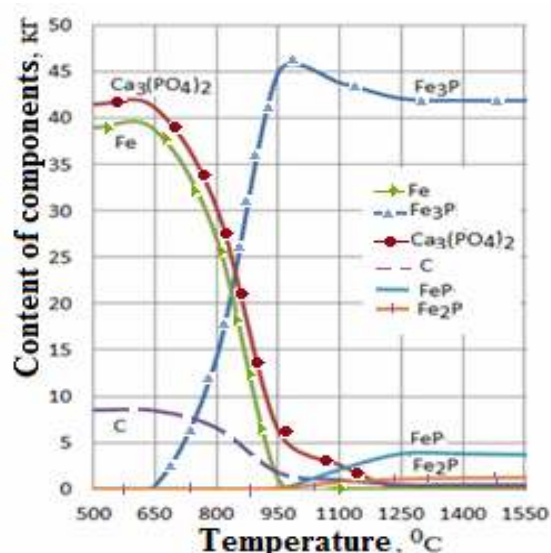


Figure 5 - Equilibrium content of metals components and  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  in the process production of ferro-phosphorus

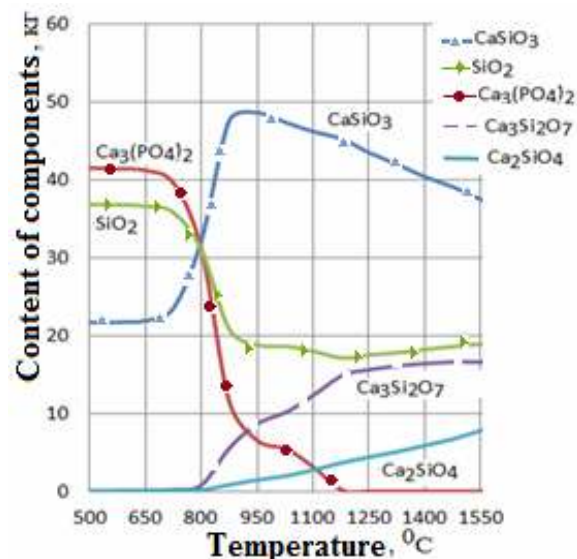


Figure 6 - The equilibrium content of components in the slag system in the production of ferro-phosphorus

Analysis of the calculation shows that all of the phosphorus passes into a durable tricalcium phosphate compound. The carbon reduction of coke begins at 650 °C and ends up to 1250 °C. All the recovered phosphorus dissolves in iron in the form of Fe<sub>3</sub>P. At a temperature above 950 °C, the formation of iron phosphides of the composition FeP and Fe<sub>2</sub>P is thermodynamically possible. The change in the composition of the gas phase of the ferro-phosphorus smelting process has been studied (Table 2).

Table 2  
Theoretical calculation of the change in the composition of the gas phase with an increase in the temperature of the production of ferro phosphorus

Compound	Temperature, °C					
	500	800	1100	1400	1700	2000
CO	0,03	800	1100	1400	1700	2000
CO <sub>2</sub>	0,01	50,37	85,77	86,84	86,69	86,31
P <sub>2</sub>	5,2·10-30	11,00	0,27	0,02	0,01	0,02
P	4,11·10-28	4,72·10-18	5,14·10-04	0,1388	0,7187	1,4254
PO	2,39·10-22	1,72·10-17	7,78·10-08	0,0001	0,0021	0,0224
N <sub>2</sub>	99,96	5,82·10-13	7,78·10-06	0,0002	0,0008	0,0174

In the gas phase, formation of CO, CO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub> (gas), P (gas), and PO (gas) is possible. At relatively low temperatures, the reduction of tricalcium phosphate can proceed both with the formation of CO, and with

the formation of  $\text{CO}_2$ . But at a temperature of  $700 - 750^\circ\text{C}$ , the entire  $\text{CO}_2$  formed is consumed by the gasification reaction of carbon by the reaction  $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$ .

Significant quantities of phosphorus in the gas phase in the form of  $\text{P}_2$  are formed at a temperature of  $\sim 1400^\circ\text{C}$  and the content of  $\text{P}_2$  increases with increasing temperature. To prevent the fly away of phosphorus to the gas phase, it is necessary to maintain the process temperature no higher than  $1300 - 1400^\circ\text{C}$ .

As a result of the calculation at  $1250^\circ\text{C}$ , the products of reduction melting were installed: 47.8 kg of ferrophosphorus, 81 kg of slag and 18.7 kg of gas. The composition of ferrophosphorus: 17% P, 81.7% Fe, 0.97% C. Thus, theoretical analysis has shown the possibility of using Ukrainian phosphorite as a raw material for obtaining ferrophosphorus with a content of 16 – 17% P according to the accepted in this study the charge.

The results characterize the thermodynamic possibility of reactions between the components of the system, assuming that the system is isolated. In real melting conditions the system is far from equilibrium and the process is carried out in an open system, the interaction proceeds with the losses of matter and energy. Therefore, the obtained indicators are the result of only a thermodynamic calculation, which does not take into account the fly away of the reaction products from the furnace zone, the temperature gradient, the activity of the components, and the kinetics of the process. Thus, the obtained regularities should be considered rather as theoretical boundaries, rather than real quantity.

### Conclusions

1. Calculation of the equilibrium in the heterogeneous  $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  system showed that an increase in the  $\text{P}_2\text{O}_5$  content in the system above 25-30% with constant basicity 1 leads to a decrease in the more thermodynamically durable tricalcium phosphate compound and an increase in  $2\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ .

2. An increase in basicity with a constant amount of phosphorus oxide in the system leads to a decrease in the amount of compounds  $2\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$  and  $\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ , and an increase in the quantity of tricalcium phosphate. It is advisable to restore phosphorus from phosphorite at basicity values not exceeding 0,6 – 0,7.



3. Addition to the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  system leads to the appearance of a complex compound  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$ . With the addition of 4%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , significant amounts of unstable calcium phosphate  $\text{CaP}_2\text{O}_6$  appear in the system. The addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  above 8% leads to the formation of an appreciable amount of free oxide  $\text{P}_2\text{O}_5$ . This has a positive effect on the recovery of phosphorus.

4. As a result of the theoretical calculation of the equilibrium for the charge materials: 85 kg phosphorite, 15 kg quartzite, 10 kg coke and 39 kg iron shavings at a temperature of 1250 °C. Obtained: 47.8 kg of ferrophosphorus, 81 kg of slag and 18.7 kg of gas, and the composition of ferrophosphorus, (mass%): 17 P; 81,7 Fe and 0,97 C. Thus, the theoretical analysis showed the possibility of using the Ukrainian phosphorite as a raw material for the production of ferrophosphorus with a phosphorus content of 16 – 17%.

#### REFERENCES

1. Proydak A.Yu. Investigation of the mineralogical composition of the phosphorous ore of the Malokamyshevsk deposit for the smelting of ferrophosphorus / A.Yu. Proydak // Theory and practice of metallurgy. - 2013. - № 5.6. - P. 27-29. (in russian).
2. Girshovich N.G. Handbook of cast iron / N.G. Girshovich. 3rd ed. - L.: Mechanical Engineering, 1978. - 758 p. (in russian)
3. Ershov V.A. Electrothermy of phosphorus / V.A. Ershov, S.D. Pimenov. - St. Petersburg: Chemistry, 1996. – 248 p. (in russian).
4. Gasik M.I. The nature of the chemical bond of phosphorus in monomineralogic differences and concentrates of manganese ores / NP, V.A. Gladkikh, M.I. Gasik // Metals. - 1994. - No. 6.- P. 3-11. (in russian).
5. Proydak A.Yu. Experimental study of the process of smelting of ferrophosphorus with the use of phosphorite of the site "Peremoga" / A.Yu. Proydak // Metallurgist, and ore mining. prom-st. - 2012. - №1. - P. 27-29. (in russian).

УДК 669.02:669.15-194.018.26

В.П. Піптюк, Д.М. Тогобицька, І.М. Логозинський, Б.А. Левін,

О.П. Петров, С.В. Греков, І.Р. Снігура

**ПЕРСПЕКТИВИ ГЕНЕРАЦІЇ ФЕРОСПЛАВІВ  
НОВОГО ПОКОЛІННЯ  
ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ ТА МІКРОЛЕГУВАННЯ СТАЛІ**

*Анотація. Викладено основні положення розроблених в ІЧМ НАНУ методичних підходів в прогнозуванні комплексу властивостей нових складів нестандартних феросплавів з поліпшеними технологічними властивостями для легування і мікролегування електросталі, які засновані на використанні параметрів міжатомної взаємодії, що дозволяє врахувати роль кожного елементу у складі сплаву у формуванні його структури та властивостей. Теоретично обґрунтована можливість підвищення ефективності застосування нових феросплавів.*

*Ключові слова: нестандартний склад, феросплав, властивості, прогноз ефективності.*

**Введення.** У статтях [1,2] представлені результати використання методики «згортки» хімічного складу металевого сплаву, яка дозволяє враховувати, як властивості окремих елементів, так і їх взаємодії, та обґрунтовано оптимізований склад сталі мартенситно - феритного класу марки 14X17H2 з рекомендацією її додаткового мікролегування бором (до 0,005%) для забезпечення необхідного рівня механічних властивостей і підвищення якості виробляємої металопродукції в умовах ПрАТ «ДСС». Аналізом дослідно-промислових плавок сталі зазначеної марки в період 2015-2016рр. встановлено зменшення браку, який пов'язано з утворенням основного дефекту – тріщин на пруги у переробній заготовці.

На етапі позапічної обробки сталі на УКП для мікролегування використовували кусковий феробор марок ФБ20 або ФБ17 (ГОСТ14848-89). При цьому відзначено порівняно низьке та нестабільне засвоєння бору металом (в межах 40-60%).

---

© Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Левін Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р., 2018

З урахуванням збільшеного, останнім часом, інтересу до використання феробору при виробництві якісної електросталі та розширення марочного сортаменту сталі різного структурного стану та призначення з його застосуванням, а також недостатньо сприятливого поєднання властивостей стандартного феробору актуальним є створення нових більш технологічних бормістких композицій феросплавів.

**Стан питання і мета досліджень.** Здійснений у другій половині ХХ століття перехід від введення феросплавів в плавильний агрегат та на випуску плавки в ківш до їх введення, головним чином, в ківш в різні періоди позапічної обробки сталі, зумовив формування нових вимог до характеристик останніх. Регламентація періодів випуску плавки, обробки металу на УДМ або УКП, вакуумування і розливання в виливниці або на МБЛЗ та скорочення, в цілому, тривалості технологічного циклу отримання сталі, а також знижена температура розплаву при обробці металу в ковші істотно змінили умови розплавлення (розчинення) і гомогенізації добавок. Тому в останні роки ініціюють роботи у напрямку розвитку способів ковшової обробки металу і процесів, що при цьому протікають, проводяться дослідження щодо підвищення ефективності використання феросплавів та інших дорогих витратних матеріалів, розробляються енергозберігаючі рішення і т.п. з метою зниження собівартості виробництва чавуну і сталі, підвищення конкурентоспроможності та якості металопродукції, що випускається. Серед затребуваних, в даний час, вишукувань в науково-практичному сенсі важливе місце відводиться, зокрема, розробкам зі створення нестандартних і більш технологічних при використанні композицій комплексних феросплавів та лігатур для легування та мікролегування металу. Так, наприклад, у низці попередніх [3-5], а потім і сучасних досліджень [6-8] автори відзначають і доводять доцільність застосування нових комплексних феросплавів Mn, Si, Nb, V, B та ін. елементів замість їх стандартних композицій, що використовуються.

У числі основних причин таких змін називають низький та нестабільний рівень засвоєння провідних елементів при використанні стандартних феросплавів, підвищену або знижену в порівнянні з розплавом їх густину, високу температуру плавлення останніх, несприятливе поєднання в них теплофізичних характеристик – теплоємності,

теплопровідності та ін. Це, у свою чергу, забезпечує нераціональні умови застосування (плавлення, розчинення та гомогенізація) феросплаву при введенні в розплав і, як наслідок, підвищені витрати не тільки цінних легуючих або мікролегуєчих елементів, що входять до його складу, але й супутніх домішкових, що сприяє забрудненню металу неметалевими включеннями, знижує його якість та, у кінцевому рахунку, якість металопродукції.

На підтвердження доцільності розробки нових комплексних феросплавів автори [3,8,9] приводять в порівнянні результати дослідження фізичних і теплофізичних властивостей стандартних і нових (синтетичних) композицій феросплавів, дані про тривалість їх плавлення і рівні засвоєння провідних елементів при перевірці ефективності їх застосування в лабораторних і дослідно-промислових умовах. Повідомляється, наприклад, що мікролегування трубних марок електросталі Д, 24ХМФР, 26ХГМРА та 32ХГМРА феросілікоборм з вмістом Si і В на рівні 45 і 1% відповідно забезпечило стабільний і високий (понад 80%) рівень засвоєння бору на відміну від стандартного феробору ФБ17, що раніше застосовувався, з нестабільним і зниженим (40-60% і менше) його засвоєнням. Розглядаючи можливості підвищення ефективності застосування інших композицій складів феросплавів для мікролегування сталі автори відзначають більш низьку температуру плавлення, густину, що забезпечує сприятливі умови плавлення і ряд інших характеристик властивостей у нестандартних складів з Nb (системи Fe-Nb-Si-Al або Fe-Nb-Si-Al-Mn замість стандартної Fe-Nb), з V (феросілікованадій ФС40Вд замість стандартного ферованадію марки ФВд35) та з В (системи Fe-B-Si-Al-Ti замість стандартної Fe-B), які не тільки дозволяють знизити їх витрату, але й покращать якість виробленої металопродукції за рахунок зниження вмісту неметалевих включень і підвищення хімічної і структурної однорідності металу.

Наведені та інші наявні дані свідчать про попереднє визначення властивостей стандартних феросплавів перед оцінкою його нестандартного складу. Так, в статтях [10-12] повідомляються результати експериментального дослідження температури плавлення, густини, теплоємності та ін. характеристик феросплавів стандартних та нестандартних систем з Ni, Si, Al, що розроблюються, а в роботах [13,14] наводяться дані про порівняльну оцінку тривалості плавлення стан-

дартних і нових нестандартних композицій Ni- і Al - містких феросплавів у залізвуглецевому розплаві. Автори [15] наводять дані про методи визначення, які використовуються, та експериментальне обладнання, що дозволяє проводити відповідні дослідження. У статті [16] повідомляється про запропонований для оцінки ефективності засвоєння феросплавів при виробництві сталі параметр - коефіцієнт ефективності  $K_{ef}$ , який враховує, в переліку інших характеристик, тривалість плавлення феросплаву.

Аналіз представлених публікацій свідчить про необхідність знань та врахування комплексу фізико-хімічних та теплофізичних властивостей феросплавної системи для науково обґрунтованого вибору оптимальної за складом і властивостями композиції, що забезпечує умови порівняно короткої тривалості її плавлення (розчинення) в глибині рідкої металевої ванни, що володіє підвищеною стійкістю до окислення в твердому і рідкому стані, крім того не сприяє зниженню температури розплаву в процесі плавлення (розчинення) та враховує особливості хімічного складу сталі, що обробляється. Таким вимогам повинні відповідати нові комплексні феросплави, що містять поряд з основними провідними елементами раніше не використовувані та забезпечують найбільш прийнятні (технологічні) характеристики їх застосування. Фізико-хімічні властивості нових феросплавів повинні надавати необхідний вплив на розплав при меншій витраті в порівнянні зі стандартним феросплавом або більший ефект при однаковій витраті.

Розробка комплексних феросплавів пов'язана з використанням нових видів сировини і з максимальним використанням в них всіх корисних елементів. Сукупний рівень властивостей компонентів складу багато в чому визначає швидкість плавлення (розчинення) феросплаву, яка є найважливішим параметром його технологічності для ефективного легування або мікрولةгування сталі. Це зумовило мету роботи, яка визначається необхідністю вивчення властивостей нестандартних комплексних феросплавів, на основі яких будуть сконструйовані їх раціональні склади.

**Основні результати роботи.** На підставі концепції спрямованого хімічного зв'язку, розробленої в ІЧМ НАНУ під керівництвом проф. Приходько Е.В., із застосуванням методики «згортки» хімічного складу та критеріїв мікронеоднорідності і використанням парамет-

рів міжатомної взаємодії [17,18] автори цієї роботи здійснили теоретичну оцінку комплексу фізико-хімічних та теплофізичних властивостей низки нестандартних феросплавних систем Fe-Mn-Si-V-Ti, Fe-Mn-Si-Nb-Al, Fe-Mn-Si-V, Fe-Mn-Nb. Для прогнозової оцінки властивостей зазначених систем використовували залежність (1).

$$D, T_{пл}, C_{тв}, C_{ж}, Q_{пл}, \lambda, \tau = f(d, \Delta d, Z^y, \Delta Z^y) \quad r=0,94/0,99, \quad (1)$$

де:  $D$  – густина феросплаву ( $\text{кг/м}^3$ );  $T_{пл}$  – температура плавлення феросплаву ( $^{\circ}\text{C}$ );  $C_{тв}, C_{ж}$  – теплоємність твердого та рідкого феросплаву ( $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$ ) відповідно;  $Q_{пл}$  – теплота плавлення феросплаву ( $\text{кДж/кг}$ );  $\lambda$  – теплопровідність феросплаву ( $\text{Вт/(м} \cdot \text{K)}$ );  $\tau$  – тривалість плавлення феросплаву, с;  $d$  – структурний параметр, що характеризує середньостатистичну відстань між атомами сплаву ( $10^{-10}\text{м}$ ) у квазіхімічному наближенні;  $Z^y$  – електро-хімічний еквівалент (е), який визначається як число електронів, які беруть участь в утворенні середньостатистичного зв'язку між двома атомами сплаву заданого складу;  $\Delta d$  і  $\Delta Z^y$  – надлишкові параметри структурного та зарядового стану розплаву, які характеризують мікронеоднорідність складу.

Хімічний склад нестандартних феросплавів, за якими здійснювалося прогнозування властивостей, наведено в табл.1.

Таблица 1

Хімічний склад дослідних феросплавів

№	Феросплави	Хімічний склад, % ваг.					
		Mn	V	Si	Nb	Al	Ti
1	ФМн20Нб	20,0	–	–	20,0	–	–
2	ФМн30Нб	30,0	–	–	17,5	–	–
3	ФНбСАМн5	5,0	–	11,4	17,1	16,6	–
4	ФНбСАМн15	15,0	–	10,2	14,9	15,3	–
5	ФНбСАМн30	30,0	–	8,4	12,3	12,6	–
6	ФС26Вд9Мн5	5,0	9,5	26,5	–	–	–
7	ФС25Вд9Мн10	10,0	9,0	25,0	–	–	–
8	ФС26Вд9МнТи3	4,8	9,2	26,0	–	–	3
9	ФС25Вд9МнТи6	4,9	8,9	25,2	–	–	6
10	ФМн50Вд10	50,0	10,0	3,0	–	–	–

У табл.2 в порівнянні з експериментально дослідженими параметрами цих феросплавів авторами [3] представлені результати прогнозової (теоретичної) оцінки їх властивостей теперішніх досліджень.

Експериментальні (чисельник) і прогнозні (знаменник) характеристики властивостей феросплавів нестандартних складів

№	Феросплави	$T_{пл}$ °C	$D \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_{ТВ}$ Дж/кгК	$C_{ж}$ Дж/кгК	$\lambda$ Вт/ м·К	$Q$ кДж/кг	$\tau, **$ с
1	ФМн20Нб	$\frac{1420}{1389}$	$\frac{7,80}{7,79}$	$\frac{402}{403}$	$\frac{638}{621}$	$\frac{34,3}{34,2}$	$\frac{272,0}{315,8}$	$\frac{22,4}{22,4}$
2	ФМн30Нб	$\frac{1330}{1352}$	$\frac{7,60}{7,43}$	$\frac{412}{416}$	$\frac{662}{693}$	$\frac{38,8}{39,0}$	$\frac{264,0}{256,0}$	$\frac{19,6}{19,8}$
3	ФНбСАМн5	$\frac{1436}{1476}$	$\frac{6,59}{6,79}$	$\frac{452}{467}$	$\frac{669}{675}$	$\frac{39,1}{38,7}$	$\frac{783,0}{723,0}$	$\frac{38,7}{39,5}$
4	ФНбСАМн15	$\frac{1460}{1437}$	$\frac{6,57}{6,56}$	$\frac{479}{472}$	$\frac{697}{677}$	$\frac{38,3}{38,5}$	$\frac{589,0}{630,6}$	$\frac{37,3}{36,2}$
5	ФНбСАМн30	$\frac{1427}{1397}$	$\frac{6,55}{6,43}$	$\frac{459}{473}$	$\frac{713}{732}$	$\frac{41,9}{42,2}$	$\frac{558,0}{526,2}$	$\frac{31,1}{31,8}$
6	ФС26Вд9Мн5	$\frac{1295}{1287}$	$\frac{6,65}{6,63}$	$\frac{495}{499}$	$\frac{782}{802}$	$\frac{29,7}{30,7}$	$\frac{914,0}{964,8}$	$\frac{28,8}{28,8}$
7	ФС25Вд9Мн10	$\frac{1270}{1267}$	$\frac{6,70}{6,47}$	$\frac{495}{503}$	$\frac{787}{800}$	$\frac{31,9}{31,0}$	$\frac{891,0}{894,0}$	$\frac{28,2}{27,0}$
8	ФС26Вд9МнТи3	$\frac{1275}{1276}$	$\frac{6,45}{6,53}$	$\frac{497}{500}$	$\frac{781}{773}$	$\frac{29,0}{29,0}$	$\frac{904,0}{908,8}$	$\frac{27,3}{27,7}$
9	ФС25Вд9МнТи6	$\frac{1260}{1267}$	$\frac{6,35}{6,44}$	$\frac{523}{501}$	$\frac{780}{756}$	$\frac{28,5}{28,4}$	$\frac{889,0}{852,2}$	$\frac{26,7}{26,7}$
10	ФМн50Вд10	$\frac{1300}{1325}$	$\frac{6,80}{6,99}$	$\frac{464}{443}$	$\frac{895}{876}$	$\frac{50,1}{50,0}$	$\frac{369,0}{361,3}$	$\frac{20,0}{20,3}$
	$\epsilon, \% *$	0,516	0,639	0,807	0,833	0,465	2,15	0,645

\* - похибка прогнозу

\*\* - визначали з використанням програмного продукту [19]

На рисунку наведені отримані залежності характеристик густини ( $D$ ) і тривалості плавлення ( $\tau$ ) досліджених феросплавів від модельних параметрів  $d$  та  $\Delta d$ .

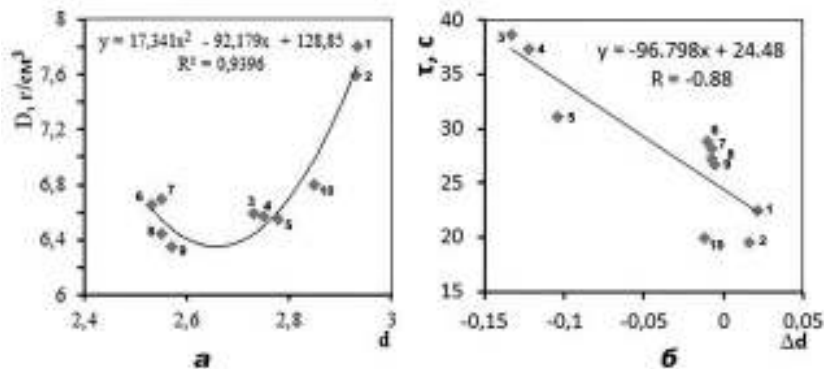


Рисунок 1 - Залежність густини (а) і тривалості плавлення (б) досліджених феросплавів від їх модельних параметрів. Цифрами позначений умовний номер феросплаву (в таблицях)

Аналіз взаємозв'язку графічних залежностей характеристик досліджених нестандартних феросплавів з параметрами міжатомної взаємодії дозволяє ставити задачу про вибір оптимального складу феросплаву з комплексом властивостей, що забезпечують технологічність його застосування при виробництві сталі на основі обчислювального експерименту.

За наявними літературними даними раціональна густина феросплаву, що забезпечує витання його шматка в обсязі ванни ковша при позапічному легуванні або мікролегуванні, повинна знаходитися в межах 5800-6800  $\text{кг/м}^3$ . З певним наближенням можна констатувати, що феросплави №№3-10 (рисунок а) з вказаним рівнем густини будуть відповідати цим умовам при  $2,5 < d < 2,84$ .

Описаний підхід показує можливість визначати граничні умови для вирішення завдань вибору оптимального хімічного складу феросплаву на підставі параметрів міжатомної взаємодії та графічних залежностей властивість-параметр.

У розвиток теперішньої роботи передбачається отримання пробної партії нового комплексного феросплаву з експериментальною перевіркою ефективності його використання в лабораторних, а потім і в промислових умовах ПрАТ «ДСС».

#### Висновки:

1. Показана можливість вирішення завдань вибору оптимального хімічного складу комплексного феросплаву з поліпшеними технологічними властивостями, що дозволяє цілеспрямовано керувати фізико - хімічним станом металевого розплаву і відповідно впливати на властивості металу та металопродукції.



2. Представлені залежності важливих характеристик досліджених комплексних феросплавів на основі параметрів міжатомної взаємодії. Запропонована методика продемонстрована на прикладі нестандартних феросплавних систем Fe-Mn-Nb, Fe-Nb-Si-Mn, Fe-Si-V-Mn і Fe = Si-V-Mn-Ti. Розроблені аналітичні вирази для оцінки фізико-хімічних і теплофізичних властивостей комплексних феросплавів нового покоління, які більш ефективні в порівнянні зі стандартними феросплавами аналогічних провідних елементів, краще засвоюються сталлю, швидше розплавляються і менше забруднюють метал неметалевими включеннями.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Системный подход к выбору оптимального элементного состава стали, обеспечивающей требуемый уровень механических свойств / Д.Н.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, И.Н.Логозинский и др. // Системные технологии. Регион. сб. науч. тр.- Днепропетровск.- 2015.-Вып.2(97).-С.91-97
2. Оптимизация химического состава стали 14X17H2 на основе концепции направленной химической связи / Д.Н.Тогобицкая, В.П.Пиптюк, И.Н.Логозинский и др. // Сб. науч. тр. ИЧМ НАНУ «Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии».-2015.- Вып.30.- С.312-323
3. Растворение ферросплавов в жидком металле / В.И. Жучков, А.С. Носков, А.Л. Завьялов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1990. – 134 с.
4. Борсодержащие стали и сплавы / Н.П. Лякишев, Ю.Л. Плинер. – М.: Металлургия. 1981. -192 с.
5. Физико-химические характеристики новых комплексных ферросплавов./ В.И.Жучков, Ю.Б.Мальцев // Физическая химия и технология в металлургии. Екатеринбург: УрО РАН, 1996.- С. 131-144.
6. Применение борсодержащих материалов в металлургии / В.И.Жучков, А.А.Акбердин, Н.А.Ватолин и др. // Электрометаллургия.- 2011. - №3.- С.25-28.
7. Получение и применение новых комплексных борсодержащих ферросплавов /А.С.Ким, О.В.Заякин, А.А.Акбердин и др. // Электрометаллургия.- 2009.- №12.- С.21-24.
8. Отработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора / А.И.Степанов, А.А.Бабенко, А.В.Сычѳв и др. // Металлург.- 2014.- №7.- С.50-52.
9. Физико-химические характеристики, получение и применение комплексных борсодержащих ферросплавов / В.И.Жучков, О.В.Заякин, Л.И.Леонтьев и др. // Известия ВУЗов. Чѳрная металлургия .- 2017.- Т.60.- №5.- С. 348-353.

10. Изучение температур плавления и плотности никельсодержащих ферросплавов / В.И.Жучков, О.В.Заякин, Ю.Б.Мальцев //Расплавы.- 2001.- №1.- С.7-9.
11. Определение теплоёмкости кремнийсодержащих ферросплавов / О.Ю.Шешуков, В.И.Жучков, Ю.Г.Ярошенко и др. //Электromеталлургия.- 2002.- №10.- С.20-25.
12. Физико-химические характеристики ферросплавов системы Fe-Al /О.Ю.Шешуков, В.И.Жучков, Ю.Г.Ярошенко и др. // Электromеталлургия.- 2005.- №9.- С.16-20.
13. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали /О.В.Заякин, В.И.Жучков, Е.Ю.Лозовая // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. - 2007.- №5.- С.13-16.
14. Определение продолжительности плавления ферросплавов системы Fe-Al в железоуглеродистом расплаве / Е.Ю.Лозовая, В.И.Жучков, О.Ю.Шешуков // Электromеталлургия.- 2007.- №1.- С.13-15.
15. Методы и результаты исследований физико-химических и теплофизических характеристик ферросплавов / В.И. Жучков, О.Ю. Шешуков, П.П. Орлов и др. // Сб. науч. тр. международной конф. «Сучасні проблеми металургії сталі».- Днепропетровск, 2001.- С. 211– 216.
16. Сравнительная оценка эффективности усвоения ферросплавов при выплавке стали / В.И.Жучков, О.Ю.Шешуков, Е.Ю.Лозовая // Электromеталлургия.- 2004.- №5.- С.9-11.
17. Приходько Э.В., Петров А.Ф. Роль направленного межатомного взаимодействия в формировании микронеоднородного строения металлических расплавов // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. - 1995. - №12.- С.5-12.
18. Приходько Э.В., Петров А.Ф. Физико-химические критерии для оценки степени микронеоднородности металлических расплавов // Металлофизика и новейшие технологии.- 1998.- Т.29.- №7.- С.64-74.
19. К.С.Красніков, С.Є Самохвалов, В.П.Піптюк. Математичне моделювання ковшового доведення розплаву дробом і кусковими матеріалами. Кам'янське: ДДТУ, монографія, 2017.- 120с.

Д.А. Редчиц, Т.П. Белоусова, И.В. Выгоднер,  
Т.П. Ляхович, С.В. Моисеенко

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРЕПРОЦЕССОР ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ**

*Аннотация. На базе многоблочных пересекающихся структурированных сеток разработан автоматизированный препроцессор для решения задач вычислительной гидродинамики. Многоблочные вычислительные технологии позволяют проводить численное моделирование стационарных и нестационарных, ламинарных и турбулентных течений несжимаемой жидкости вокруг подвижных и неподвижных тел сложной геометрии. Разработанный алгоритм обладает возможностью легкого распараллеливания на многоядерных системах.*

*Ключевые слова: препроцессор, вычислительная аэродинамика, структурированные сетки.*

### **Введение**

Современный этап развития вычислительной аэродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) характеризуется разработкой коммерческих программных продуктов, реализованных в виде пакетов прикладных программ. Модельное и методологическое наполнение программ непрерывно улучшается. Развитие вычислительной аэродинамики сохраняет высокие темпы благодаря непрерывному совершенствованию элементной базы вычислительной техники, расширению парка доступных для аэродинамиков-вычислителей высокопроизводительных компьютеров.

### **Методы создания дискретного пространства**

Основная задача препроцессора – создание вблизи обтекаемого тела дискретного пространства, логически взаимосвязанного с используемым численным алгоритмом. Создание многоблочного дискретного пространства включает в себя решение следующих задач: интерполяцию обтекаемой поверхности, задание (односвязной или многосвязной) расчетной области, разбиение расчетной области на по-

---

© Редчиц Д.А., Белоусова Т.П., Выгоднер И.В., Ляхович Т.П.,  
Моисеенко С.В., 2018

добласти, построение расчетных сеток в каждой подобласти, определение параметров контрольных объемов для каждой расчетной сетки, установление топологической взаимосвязи между подобластями, определение процедур пересчета геометрических параметров подобластей и взаимосвязей между ними при движении отдельных блоков, размещение искомых гидродинамических величин в каждой подобласти, включая ячейки (контрольные объемы), необходимые для задания граничных условий на внешних границах расчетной области, выбор (разработку) алгоритмов расчета (интерполяции) искомых величин на внутренних границах между подобластями.

Широкое применение получили три основных типа расчетных сеток: неструктурированные, многоблочные структурированные и многоблочные пересекающиеся структурированные (типа Chimera).

Каждая из этих сеток обладает своими преимуществами и недостатками. Так, основное преимущество неструктурированной сетки – это возможность ее генерации вокруг тел произвольной формы включая многосвязные области, а также адаптация к областям больших градиентов. К недостаткам можно отнести сложный численный алгоритм реализации солвера, а также его низкую разрешающую способность в вязких слоях. К тому же требования, предъявляемые к объему оперативной памяти при использовании данного вида сетки, в несколько раз выше, чем для структурированных.

Основное преимущество структурированной сетки без пересечений – возможность создания на их основе простого алгоритма для солвера, а также высокая разрешающая способность в погранслоях. Главным недостатком является жесткая связанность количества узлов соседних блоков по смежным направлениям.

Многоблочные пересекающиеся (с нахлестом) структурированные сетки, известные также как Chimera, возникли в начале 80-х [1, 2] и получили широкое распространение в 90-х годах прошлого века. Она объединяет в себе преимущества неструктурированной и структурированной многоблочной сетки и, к тому же, лишена главного недостатка структурированной многоблочной сетки – равного количества узлов соседних блоков по смежным направлениям. Отдельной проблемой стоит движение сеток относительно друг друга при решении задач динамики элементов профиля. Для многоблочной пересекаю-

щейся структурированной сетки возможность движения блоков заложена изначально.

Стратегия данного подхода заключается в разбиении сложной вычислительной области на более мелкие, которые можно представить относительно простыми расчетными сетками. Основной задачей является обеспечение передачи структуры данных между вычислительными сетками. Каждая сетка вычислительной области входит в препроцессор для определения взаимосвязи между сетками и расчета интерполяционных данных.

Интерполяционные данные, которые передаются в вычислительное ядро, включают в себя список интерполяционных точек, интерполяционные коэффициенты, донорные ячейки для каждой интерполируемой точки. В интерполяционные данные также включается (входит или должен входить) список точек, которые изымаются из вычислительной области, если те попадают во внутрь твердого тела.

На сегодняшний день наиболее универсальным является препроцессор PEGASUS [3], который разрабатывается в NASA в течении трех десятилетий. Существуют и другие препроцессоры (DCF3D [4], Beggar [5], FASTRAN [6], Overture [7]) для многоблочных пересекающихся структурированных сеток, которые обладают различным уровнем автоматизации. Каждый из этих препроцессоров выдает список интерполяционных данных, которые необходимы для вычислительного ядра. Так, автоматизированный препроцессор PEGASUS успешно применяется со следующими CFD-кодами: OVERflow, NXAIR, INS3D.

### **Обзор Chimera подхода**

Идея, лежащая в основе многоблочных пересекающихся структурированных сеток, представлена на рис. 1, где показано две независимо сгенерированные сетки вокруг двух твердых тел. Сетка В, вокруг меньшего тела 2, «вложена» в сетку А, вокруг большего тела 1. Внешняя граница сетки, вокруг меньшего тела 2, получает информацию о поле течения путем интерполяции от соответствующих ячеек сетки (интерполяционный шаблон) вокруг большего тела 1. В тоже время должен происходить и обратный процесс обмена информацией. Так, сетка А должна получать информацию о поле течения от сетки В. Для сетки А необходимо определить искусственную границу, так как некоторые точки этой сетки попадают внутрь меньшего тела 2, и

таким образом лежат вне области поля течения. Все точки искусственной границы сетки А, которые попали внутрь сетки В, могут получать информацию о поле течения путем интерполяции от ячеек сетки В. В общем случае, любая сетка может обмениваться данными с другой через внешнюю границу области и точки искусственной границы.

Процесс интерполяции показан на рис. 2, где рассмотрена часть области пересечения между двумя сетками. Точки расчетной сетки А, которые лежат внутри тела, изымаются из расчетной области. В Chimera технологии эти точки называются удаленными точками. Точки сетки А вокруг удаленных называются краевыми точками. Они получают информацию о поле течения путем интерполяции от ячеек сетки В. Краевые точки обозначены квадратными символами (рис. 2) Соответственно, точки на внешней границе сетки В получают информацию о поле течения от ячеек сетки А. Эти точки обозначены кружками (рис. 2).

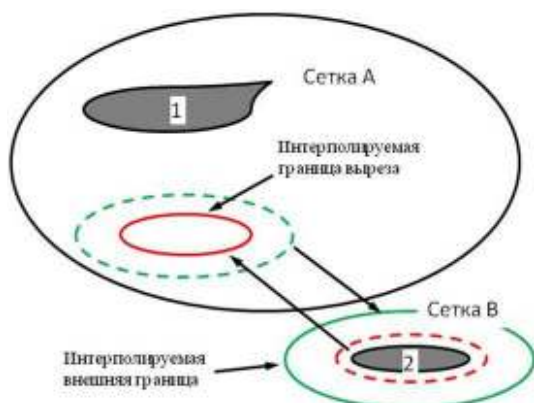


Рисунок 1 – Концепция пересекающихся сеток

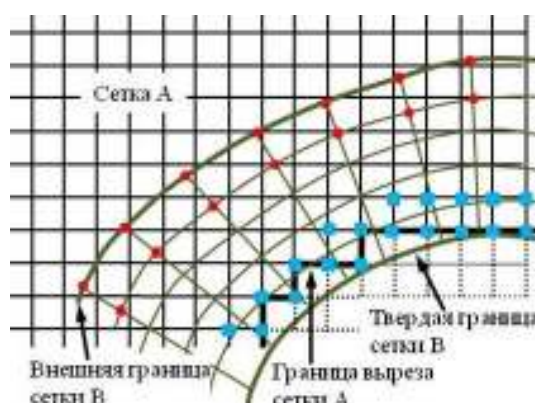


Рисунок 2 – Область пересечения [3]

### Автоматизированный препроцессор

На основании анализа преимуществ и недостатков различных типов сеток в настоящей работе был сделан выбор в пользу структурированных пересекающиеся многоблочных сеток.

Работа автоматизированного препроцессора состоит из 4 основных элементов: генерация пересекающихся сеток (I) (рис. 3), согласование расчетных областей (II) (рис. 4), оптимизация многоблочной сетки (III) (рис. 5) и движение отдельных блоков (IV) (рис. 6).



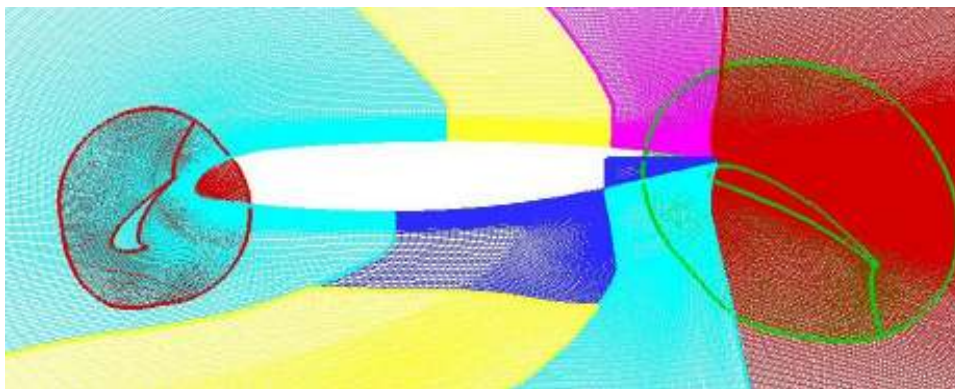


Рисунок 3– Генерация пересекающихся сеток

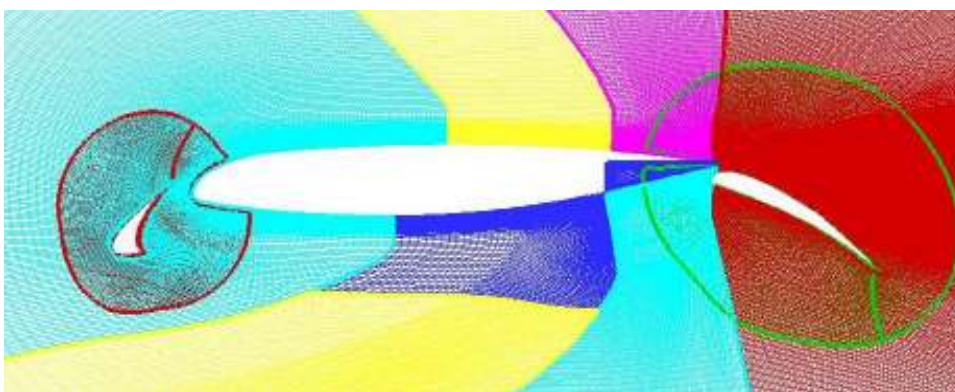


Рисунок 4 – Согласование расчетных областей

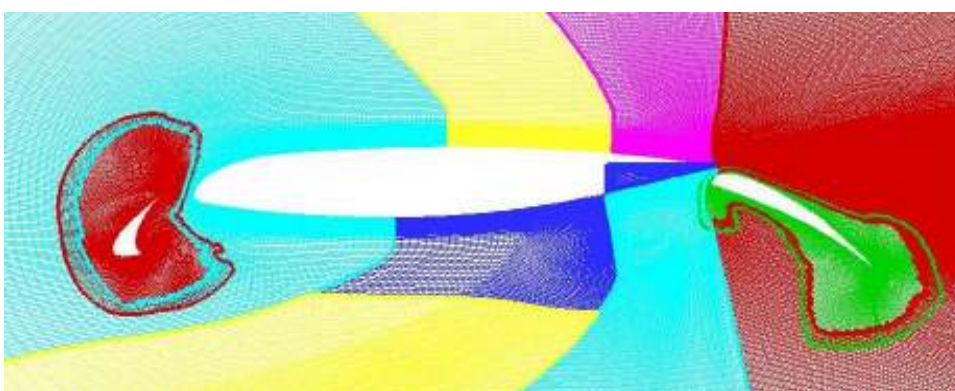


Рисунок 5 – Оптимизация многоблочной сетки

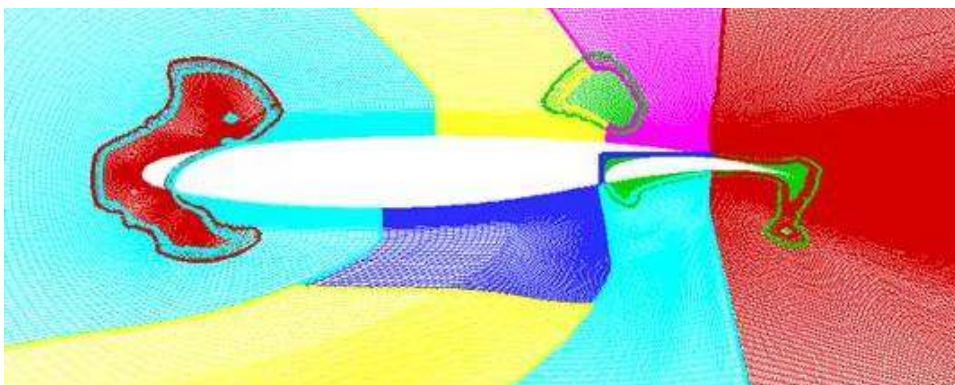


Рисунок 6 – Движение отдельных блоков

I. Генерация пересекающихся сеток. Расчетные сетки типа O, H и C строятся вокруг обтекаемого тела методом многих поверхностей или могут быть импортированы из любого генератора структурированных сеток.

II. Согласование расчетных областей. Для получения интерполяционных данных, требуемых для вычислительного ядра (солвера), автоматизированному препроцессору необходимо выполнить три основных операции.

Шаг 1. Вырез отверстий в сетках. Узлы расчетных сеток, попавшие внутрь тела, изымаются из вычислительной области. Для определения краевых точек и точек внешней границы необходимо иметь два слоя интерполяционных точек. Количество слоев интерполяционных точек называется периферийным уровнем. Например, на рис. 2 приведено два периферийных уровня. Двойной периферийный уровень обладает определенными преимуществами для вычислительного ядра и обеспечивает более высокую точность решения.

Шаг 2. Идентификация интерполяционных точек. Различают два типа интерполяционных точек: краевые точки, соседние с удаленными, и точки внешней границы (рис. 2). Нахождение краевых точек не представляет особых сложностей, так как они являются соседними с удаленными точками. Точки внешней границы – это точки, которые лежат на границе вычислительной сетки и для которых не ставятся граничные условия солвера.

Процесс оптимизации многоблочных пересекающихся структурированных сеток в автоматизированном препроцессоре начинается с идентификации точек, которые попали внутрь обтекаемого тела и точек внешней границы. При оптимизации области пересечения большое количество внутренних точек могут быть идентифицированы как интерполяционные граничные точки. Таким образом, процесс интерполяции в препроцессоре начинается с поиска всех возможных донорных ячеек расчетных сеток для каждой точки сетки. Данный процесс распадается на подпроцессы, в каждом из которых участвует пара сеток, одна – как донорная, другая – как принимающая. Заметим, что для любых двух сеток A и B возникает два подпроцесса: первый с сеткой A в качестве донорной и B как принимающей; и второй, когда B – донорная, а сетка A – принимающая. Таким образом, возникает  $N(N-1)$  возможных пар донорно-принимающих сеток, где N



– число вычислительных сеток. Число пар сеток растет пропорционально  $N^2$ , поэтому для увеличения вычислительной эффективности интерполяционного процесса в автоматизированном препроцессоре реализован следующий алгоритм поиска.

Интерполяционный подпроцесс для пары сеток начинается с определения возможного пересечения двух сеток. Для этого вокруг каждой сетки строится прямоугольник таким образом, чтобы все узлы расчетной сетки находились внутри данной области. Если прямоугольники, описанные вокруг двух различных сеток, не пересекаются, значит и узлы расчетных сеток не участвуют в интерполяции. Если прямоугольники пересекаются, то выполняется следующий цикл подпроцесса для каждого узла принимающей сетки. Внутри этого цикла проверяется, находится ли узел данной сетки внутри прямоугольника донорной сетки, и в заключение выполняется поиск ячейки донорной сетки, необходимой для интерполяции. После того как для каждого узла принимающей сетки найдена донорная ячейка, происходит расчет интерполяционных коэффициентов.

Шаг 3. Определение донорных ячеек, которые используются для расчета значений параметров поля течения в краевых и граничных точках области, найденных в шаге 2. Если для интерполируемой точки не найдена подходящая донорная ячейка, то такая точка называется изолированной.

Для выполнения первых двух шагов необходима полная информация по граничным условиям для каждой сетки. В качестве входных параметров автоматизированный препроцессор использует дискретную геометрию обтекаемого тела, расчетные сетки, а также граничные условия.

III. Оптимизация многоблочной сетки. Заключительным шагом в получении качественного решения для пересекающихся областей должна быть оптимизация многоблочных структурированных сеток. В областях пересечений отдельных блоков остаются лишь ячейки с минимальной площадью.

Разработанный в автоматизированном препроцессоре алгоритм оптимизации пересекающихся областей обладает высокой надежностью и не требует человеческого участия. Эта процедура выполняется после автоматического выреза отверстий в сетках, и когда становятся известны все донорные/принимающие узлы расчетных сеток. Метод

оптимизации пересекающихся областей основан на том, что узлы подробной сетки остаются как часть вычислительной области, в то время как для узлов грубой сетки применяется интерполяция с узлов подробной сетки.

В качестве примера рассмотрим оптимизацию зоны пересечения двух одномерных сеток А и В. Сгущение узлов сетки А выполнено к левому краю, а сетки В – к правому.

Первым шагом является интерполяция всех точек сетки А на сетку В и наоборот (рис. 7 а). Затем в области пересечения двух сеток выделяются ячейки с большей площадью (рис. 7 б). Стрелками показано направление передачи данных параметров течения от ячеек с меньшей площадью к ячейкам с большей. Направление стрелки указывает на интерполируемый узел, а ее конец на донорную ячейку.

На третьем шаге происходит проверка, являются ли интерполируемые узлы, идентифицированные на первом шаге, частью донорных ячеек. Если являются, то данный узел изымается из списка интерполируемых узлов. Результат данного процесса для сеток А и В показан на рис. 7 в.

Для завершения процесса оптимизации пересекающихся сеток необходимо определить какая из донорных ячеек (в случае сложного пересечения – трех и более сеток) будет передавать информацию на интерполируемый узел. Критерием выбора служит минимальная площадь ячейки. Используя данную процедуру, определяем интерполируемые узлы и узлы поля течения (рис. 7 г).

IV. Движение отдельных блоков. При решении задачи с подвижными поверхностями происходит смещение отдельных блоков сетки, а затем выполняется шаг 2 и шаг 3 работы препроцессора. В качестве примера рассмотрена задача о раскрытии многоэлементного профиля.

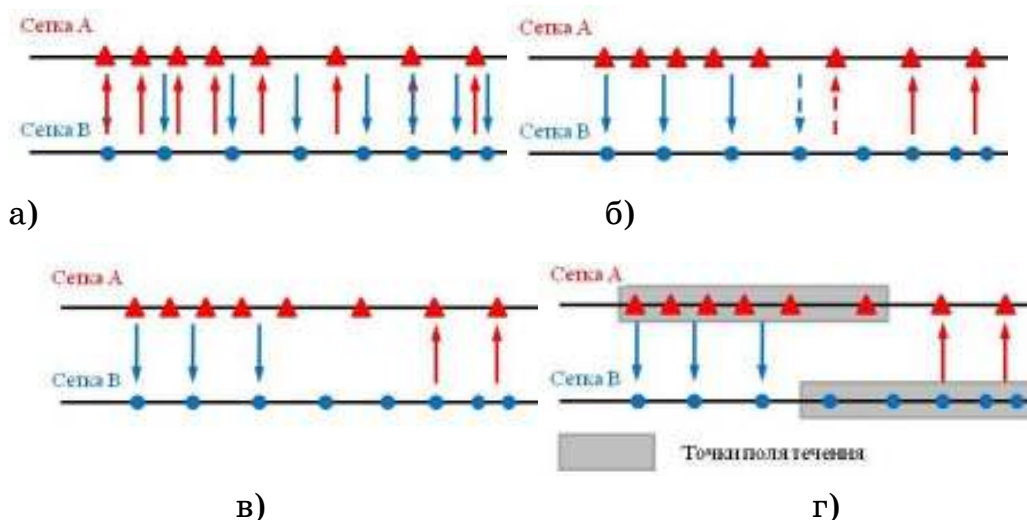


Рисунок 7 – Оптимизация многоблочных структурированных сеток [3]:  
а) интерполяция всех точек сеток А и В;  
б) выделение ячеек с большей площадью;  
в) удаление интерполируемых точек, которые являются частью донорных ячеек; г) выделение узлов поля течения

### Результаты вычислительных экспериментов

Представлены результаты вычислительных экспериментов по генерации многоблочных пересекающихся структурированных сеток вокруг трехэлементного профиля (рис. 5), J-профиля (рис. 8), а также вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 9).

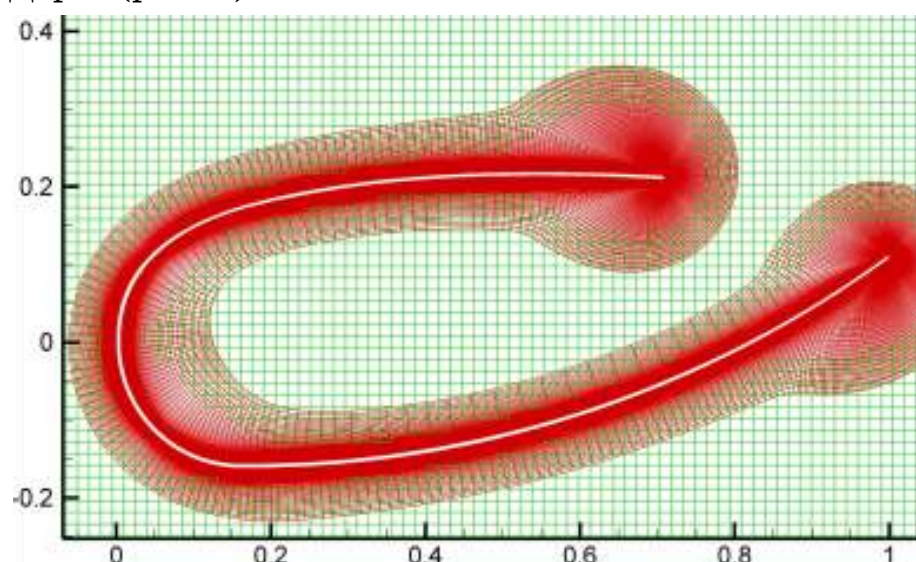


Рисунок 8 – Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка вокруг J-профиля

Примеры двух пересекающихся сеток и результат оптимизации области пересечения вокруг предкрылка и закрылка трехэлементного



профиля 30P30N, а также вблизи J-профиля и лопасти ротора Дарье приведены на рис. 5, 8, 9 в, соответственно. Как видно, область пересечения находится вдали от области существенного сгущения узлов в районе пограничных слоев.

Результат оптимизации области пересечения для случая трех сеток представлен на рис. 9 б. В этом случае оптимизация в «ручном» режиме будет чрезвычайно сложной и практически невозможной в трехмерном случае.

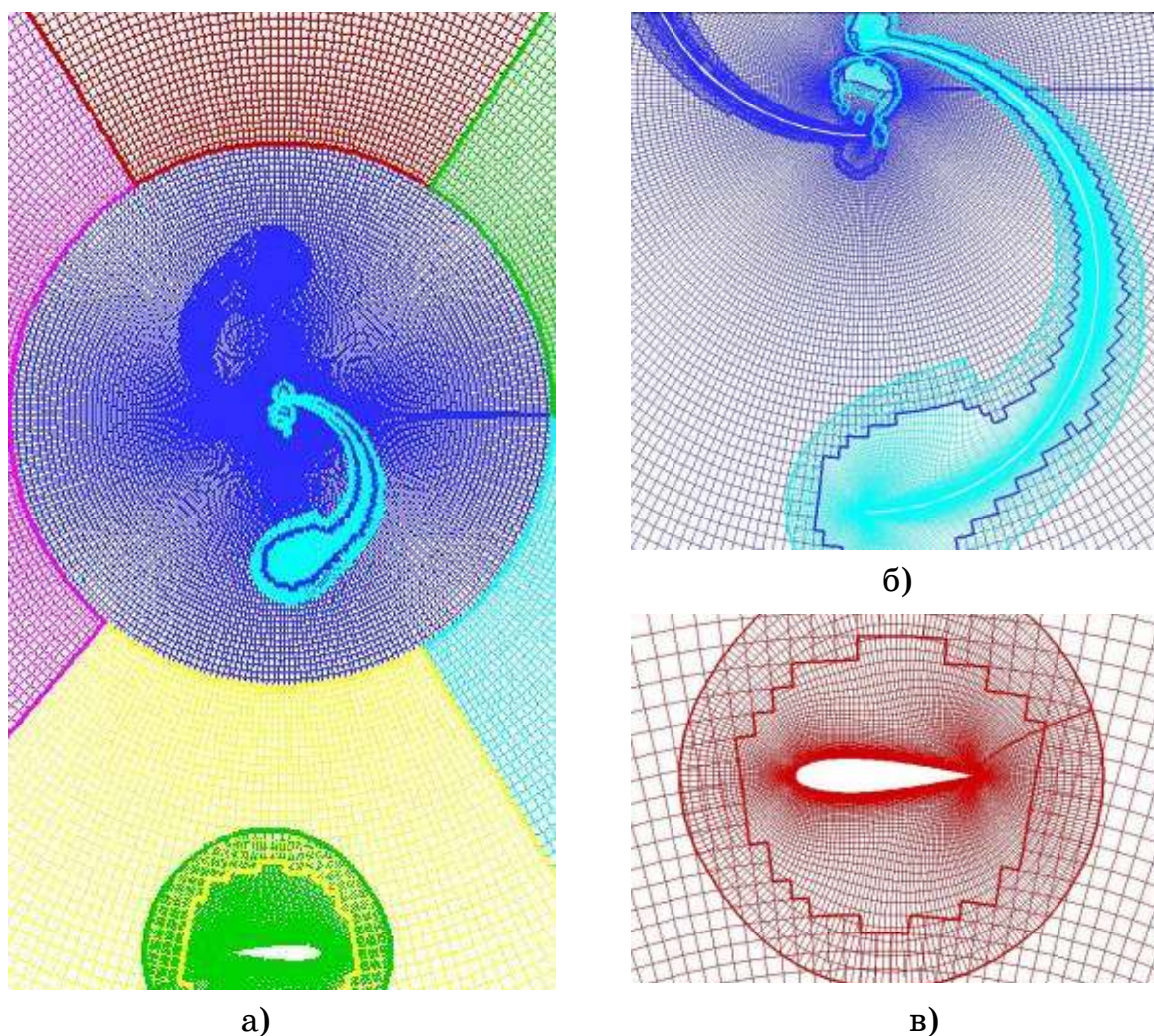


Рисунок 9 – Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка вокруг вертикально-осевой ветроэнергетической установки

На базе сгенерированных многоблочных пересекающихся структурированных сеток проведено численное моделирование турбулентного обтекания вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Савониуса и Дарье (рис. 10 а), а также трехэлементного профиля 30P30N во взлетно-посадочной конфигурации (рис. 10 б).

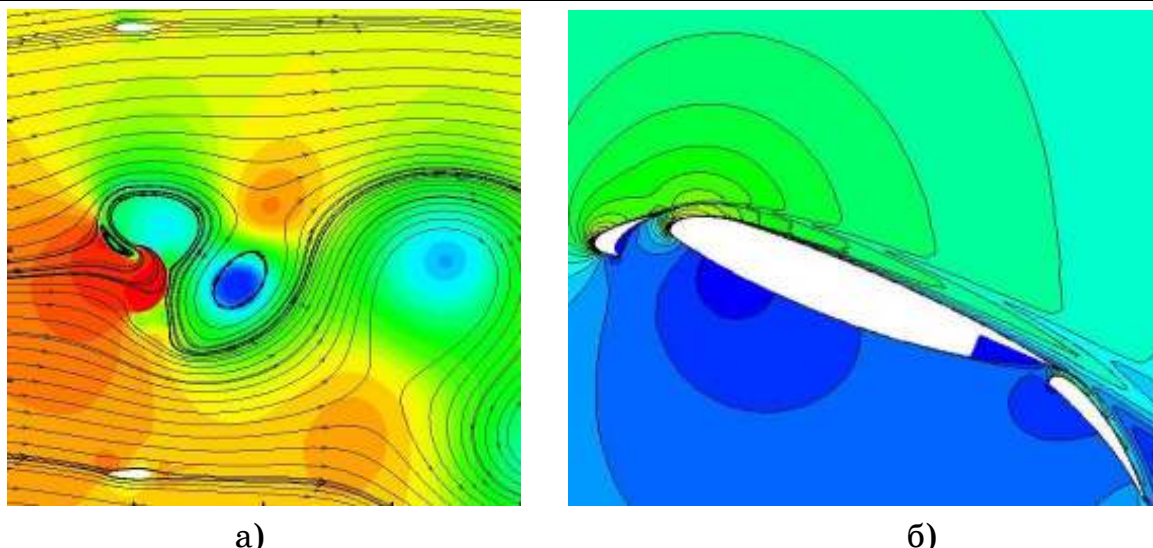


Рисунок 10 – Турбулентное обтекание ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки (а) и трехэлементного профиля (б)

### Заключение

На базе многоблочных пересекающихся структурированных сеток разработан автоматизированный препроцессор для решения задач вычислительной гидродинамики. Многоблочные вычислительные технологии позволяют проводить численное моделирование стационарных и нестационарных, ламинарных и турбулентных течений несжимаемой жидкости вокруг подвижных и неподвижных тел сложной геометрии. Разработанный алгоритм обладает возможностью легкого распараллеливания на многоядерных системах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Benek, J.A. A flexible grid embedding technique with application to the Euler equations [Text] / J.A. Benek, J.L. Steger, F.C. Dougherty // AIAA Paper 1983-1944.
2. Benek, J.A. A 3-D grid embedding technique [Text] / J.A. Benek, P.G. Buning, J.L. Steger // AIAA Paper 1985-1523.
3. Rogers, S.E. PEGASUS 5: An automated preprocessor for overset-grid computational fluid dynamics [Text] / S.E. Rogers, N.E. Suhs, W.E. Dietz // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 41, № 6. – P.1037-1045.
4. Meakin, R. L. Object X-rays for cutting holes in composite overset structured grids [Text] / R.L. Meakin // AIAA Paper 2001-2537
5. Johnson, R.A. Multigrid approach to overset grid communication [Text] / R.A. Johnson, D.M. Belk // AIAA Journal. – 1995. – Vol. 33, № 12. – P. 2305-2308.
6. Wang, Z.J. A fully automated Chimera methodology for multiple moving body problems [Text] / Z. J. Wang // AIAA Paper 1998-217.
7. Brown, D.L. Overture – Object-oriented tools for overset grid applications [Text] / D. Brown, D. William // AIAA Paper 1999-3130.

І.В. Баклан, Л.М. Баришич, Б.О. Дідик

**ПОБУДОВА ТЕПЛОВОЇ КАРТИ ПЕРЕМІЩЕНЬ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТУ В СЕРЕДОВИЩІ**

*Анотація. У статті розглядається метод побудови теплової карти на основі зібраних даних по переміщенню агента. Дані зібрані у вигляді точок у декартовому просторі, які відслідковують положення агента з постійною кількістю разів на секунду.*

*Ключові слова: heatmap, data scrapping, golang, game analysis.*

**Постановка проблеми**

В останні роки значно зростає популярність кіберспорту -- набору дисциплін, що використовує складні інформаційні системи як середовища взаємодії гравців. Як правило, учасникам доступний обмежений масив інформації, що надає великий простір для аналізу за допомогою методологій теорії ігор. На основі таких середовищ досліджується та моделюється чимало патернів поведінки.

Наприклад, на основі повного списку дій гравця системи стохастичного аналізу патернів будують портрети гравців для порівняльного аналізу. Проте, через обмеженість функціоналу існуючих програмних продуктів, багато функцій доводиться виконувати вручну або не включати до остаточного аналізу. Таким чином існує нагальна потреба в потужному інструменті аналізу та візуалізації даних.

Існуючі системи надають можливість відслідковувати переміщення гравця (інтелектуального агента для даної системи), проте не надають доступу до зібраної інформації та не обробляють її самостійно. Наш метод дозволяє будувати мапи на більшій вибірці даних та незалежно від сторонніх ресурсів, що може значно покращити кінцеві методи аналізу для кінцевого користувача.

**Аналіз публікацій по темі дослідження**

Існує декілька готових рішень, що частково покривають ідею відслідковування переміщень:

1) StatsHelix - застосунок для аналізу тактики та позиціонування. Дозволяє отримувати дані лише у реальному часі.

2) ShadowGG - аналітичний застосунок для менеджерів команд, що дозволяє зручно переглядати старі ігри з точки зору тактики та командної гри. Будує недетальні звіти за діями агентів.

### Мета дослідження

Ціллю дослідження була побудова життєздатної системи по генерації теплових мап, що використовує дані у DEM-форматі. Мапа має відповідати таким критеріям: точність, наочність,

В той час система має відповідати таким критеріям: гнучкість, швидкість побудови та функціональна прозорість.

### Основна частина

Для початку роботи потрібно отримати чітке розуміння формату даних .DEM файлу. .DEM файли це записи ігор у бінарному вигляді, де зберігається повний стан системи.

Кожен файл має заголовок, у якому міститься інформація про гру. Відношення координат запису до координат мапи та її розмір ми отримуємо за запитом у сам клієнт гри. Відповідь сформована наступним чином:

```
"de_train"
{
    "material"      "overviews/de_train" // texture file
    "pos_x"         "-2477"             // upper left world coordinate
    "pos_y"         "2392"
    "scale"         "4.7"
    // loading screen icons and positions
    "CTSpawn_x"    "0.86"
    "CTSpawn_y"    "0.77"
    "TSpawn_x"     "0.12"
    "TSpawn_y"     "0.25"
    "bombA_x"      "0.63"
    "bombA_y"      "0.49"
    "bombB_x"      "0.52"
    "bombB_y"      "0.76"
}
```

Pos\_x та pos\_y передають розмір мапи відносно початку координат, інші параметри - ключові точки на мапі. Ці дані використовуються для співвідношення теплової та топологічної мапи. Наприклад, топологічна мапа має наступний вигляд:





Рисунок 1 - Ігрова топологічна мапа de\_train

Зеленим відмічені початкові точки гравця в залежності від команди, червоним - ціль. Без накладання шарів теплова мапа має наступний вигляд:

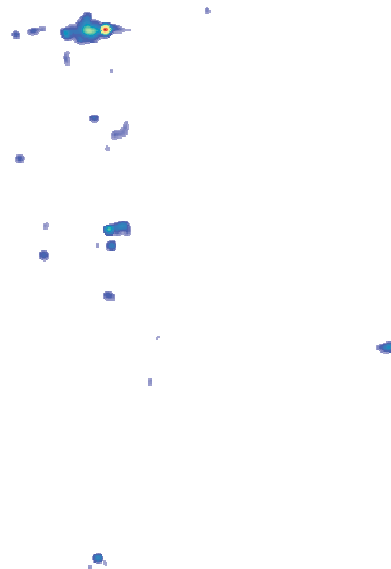


Рисунок 2 - Теплова мапа до нормалізації та налагодження на топологічну



Отримана мапа побудована за координатами, отриманими з файлу. Темніший колір мають місця, де було зроблено більше переміщень.

Теплову карту також доречно використовувати для дискретних подій, наприклад “вбивство” гравця:

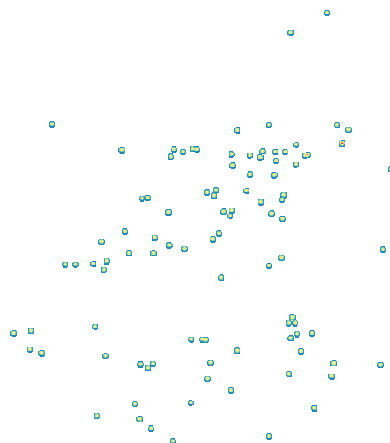


Рисунок 3 - Початкова теплова мапа “вбивств” гравців

Після нормалізації та накладання на топографічну мапу можна проводити базовий аналіз:



Рисунок 4 - Нормалізована теплова мапа переміщень одного гравця



Рисунок 5 - Нормалізована теплова мапа “вбивств” гравців

Спираючись на дані мап, наприклад, можна виділити типові місця знаходження агента та найбільш “небезпечні” райони. Надалі такий аналіз можна використовувати для побудови стратегій протидії або для симуляції поведінки гравця для штучного інтелекту.

### Висновки

Навіть на примітивному рівні така система дозволяє відмічати ключові точку інтересу агентів та типові маршрути переміщення. Це дозволяє виділяти поведінкові патерни та створювати корпуси для машинного навчання. В планах отримати детальніші карти с відмітками дій агентів для кластеризації та класифікації гравців за ролями та діями.

### ЛІТЕРАТУРА

1. [https://developer.valvesoftware.com/wiki/DEM\\_Format](https://developer.valvesoftware.com/wiki/DEM_Format)
2. [github.com/markus-wa/demoinfocs-golang](https://github.com/markus-wa/demoinfocs-golang)
3. [github.com/golang/geo/r2](https://github.com/golang/geo/r2)
4. <https://statshelix.com/>
5. <http://shadow.gg/>

К.Ю. Островська, О.І. Михальов, А.І. Черевко

## **АЛГОРИТМИ НЕЧІТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ МЕТАЛОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Анотація. В роботі було реалізовано два алгоритми нечіткої кластеризації: с-середніх та субтрактивний метод нечіткої кластеризації для зразка мікроструктури металографічного зображення  $\times 100$ , зразок № 12 (плавка № 22325), полоса мартенсіта.*

*Ключові слова: кластерний аналіз, кластер, нечітка кластеризація, алгоритм fст, субтрактивна кластеризація, центр кластеру, металографічні зображення.*

Термін “кластерний аналіз” насправді включає в себе набір різних алгоритмів класифікації. Загальне питання, що ставиться дослідниками у багатьох галузях, полягає в тому, як організувати спостережувані дані в наочні структури.

Концептуальний взаємозв'язок між кластерним аналізом і теорією нечітких множин ґрунтується на тій обставині, що при розв'язанні завдань структуризації складних систем більшість формованих класів об'єктів розмиті за своєю природою. Ця розмитість полягає в тому, що перехід від належності до неналежності елементів до даних класів скоріше поступовий, ніж стрибковий.

У загальному випадку завданням нечіткої кластеризації є знаходження нечіткого розподілу або нечіткого покриття множини елементів досліджуваної сукупності, які утворюють структуру нечітких кластерів, присутніх у розглянутих даних. Ця задача зводиться до знаходження ступенів належності елементів універсуму потрібним нечітким кластерам, які в сукупності і визначають нечіткий розподіл або нечітке покриття вихідної безлічі розглянутих елементів.

Об'єктами дослідження є зразки металографічних зображень колісних сталей - колісних пар, які відносяться до ходових частин і є одним із відповідальних елементів вагона. Вони призначені для спрямування руху вагона по рейковій колії і сприйняття всіх наван-

тажень, що передаються від вагона на рейки при обертанні цих колісних пар. Працюючи в складних умовах завантаження, колісні пари повинні забезпечувати високу надійність, бо від них багато в чому залежить безпека руху поїздів. Конструкція і технічний стан колісних пар впливають на плавність ходу, величину сил, що виникають при взаємодії вагона і колії, і опір руху.

Аналіз одержаних з ВАТ «НТЗ» зразків колісного металу показав наявність у них великих екзогенних включень, здебільшого таких, що являють собою продукти руйнування футеровки сталевоплавильних агрегатів і сталеворозливних пристроїв, а також шихти і шлаків.

У багатьох випадках забрудненість стали неметалевими включеннями комплексна, тому цікаво вивчити сумарну забрудненість колісної сталі неметалевими включеннями, з метою врахування цього фактора у майбутньому при розробці математичних моделей.

Для аналізу металографічних зображень було обрано зразок зображення колісної сталі:

- ліквацийна неоднорідність мікроструктури x100, зразок № 12 (плавка № 22325), полоса мартенсіта/

У системі MATLAB для розв'язання задачі нечіткої кластеризації реалізовані два алгоритми:

- алгоритм FCM;
- алгоритм субтрактивної нечіткої кластеризації.

За допомогою алгоритмів нечіткої кластеризації (алгоритм FCM; алгоритм субтрактивної нечіткої кластеризації) у пакеті прикладних програм MATLAB буде проведений аналіз над обраним металографічним зображенням. На рисунку 1 представлено зразок мікроструктури колісної сталі - x100, зразок № 12 (плавка № 22325), полоса мартенсіта.

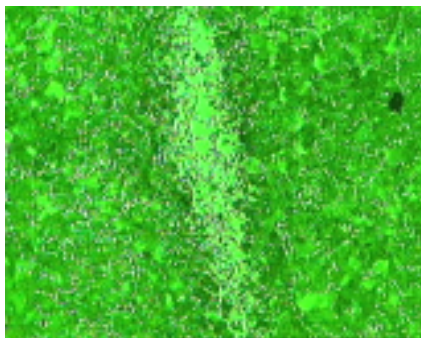


Рисунок 1 – Зразок № 12 (плавка № 22325), полоса мартенсіта

Після отримання другого зображення ми створюємо цикл за допомогою якого отримуємо зображення з поданням про значення кожного пікселя. Отриманий в результаті файл lom.dat будемо використовувати для подальшого дослідження, тому що дані для кластеризації повинні бути представлені в вигляді матриці чисел.

```
>> i3=I;
>> fid=fopen('lom.dat', 'w');
>> for i=1:480; fprintf(fid, '%d ',i3(i,:)); fprintf(fid, '\n'); end;
>> fclose(fid);
```

Функція fcm виконується ітераційно до тих пір, поки зміни цільової функції перевищують деякий заданий поріг. На кожному кроці в командному вікні Matlab виводяться порядковий номер ітерації і відповідне поточне значення цільової функції. Якщо після запису функції fcm у другому рядку не ставити крапку з комою (;), то у вікні команд будуть показані значення координат центрів нечітких кластерів, значення функцій приналежності об'єктів нечітким кластерам і значення цільової функції на кожній з ітерацій роботи алгоритму FCM.

```
// завантаження даних, що підлягають кластеризації з файлу lom.dat
>> load lom.dat
// визначення центру кластеризації (4 кластери)
>> [center,U,obj_fcn]=fcm(lom,4);
Iteration count = 1, obj. fcn = 506505969.155656
Iteration count = 2, obj. fcn = 391847719.089683
Iteration count = 3, obj. fcn = 391811913.210103
Iteration count = 4, obj. fcn = 391811481.300471
Iteration count = 5, obj. fcn = 391811467.524598
Iteration count = 6, obj. fcn = 391811466.982057
Iteration count = 7, obj. fcn = 391811466.959814
Iteration count = 8, obj. fcn = 391811466.958894
Iteration count = 9, obj. fcn = 391811466.958856
Iteration count = 10, obj. fcn = 391811466.958854
>> plot(obj_fcn);
```

Для оцінки динаміки зміни значень цільової функції використовується команда побудови графіка plot(obj\_fcn). Результати показані на рисунку 2, з рисунку видно, що чим вище значення цільової функції fcn тим краще кількість ітерацій нечіткої кластеризації.

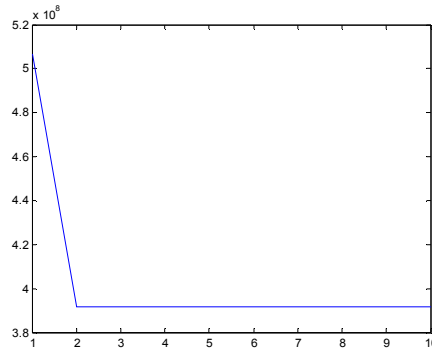


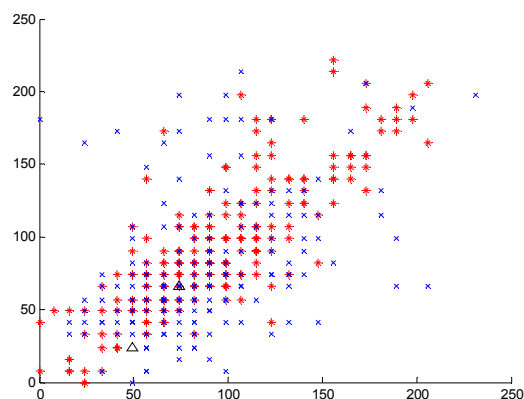
Рисунок 2 – Графік зміни значень цільової функції

Далі визначаємо максимальну степінь приналежності окремого елемента даних кластеру.

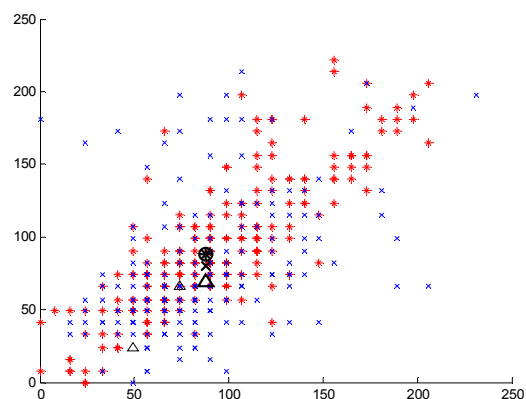
*// визначення максимальної степені приналежності окремого елемента даних кластеру*

```
>> maxU=max(U);
// розподіл рядків матриці даних між відповідними кластерами
>> index1=find(U(1,:)==maxU);
>> index2=find(U(2,:)==maxU);
>> index3=find(U(3,:)==maxU);
>> index4=find(U(4,:)==maxU);
// побудова даних, що відповідають першому кластеру
>> line(lom(index1,1),lom(index1,2),'linestyle','none','marker','*','color','red');
// побудова даних, що відповідають другому кластеру
>> line(lom(index2,1),lom(index2,2),'linestyle','none','marker','o','color','green');
// побудова даних, що відповідають третьому кластеру
>> line(lom(index3,1),lom(index3,3),'linestyle','none','marker','x','color','blue');
// побудова даних, що відповідають четвертому кластеру
>> line(lom(index4,1),lom(index4,4),'linestyle','none','marker','^','color','black');
>> hold on
// побудова кластерних центрів
>> plot(center(1,1),center(1,2),'k*','markersize',10,'LineWidth',2);
// побудова кластерних центрів
>> plot(center(2,1),center(2,2),'ko','markersize',10,'LineWidth',2);
// побудова кластерних центрів
>> plot(center(3,1),center(3,3),'kx','markersize',10,'LineWidth',2);
// побудова кластерних центрів
>> plot(center(4,1),center(4,4),'k^','markersize',10,'LineWidth',2);
```

Результат розв'язання задачі нечіткої кластеризації для 4-х нечітких кластерів із використанням зазначеної послідовності команд може бути візуалізовано на рисунку 3, де представлено множини даних, що підлягають кластеризації з знайденими центрами кластерів.



a)



6)

а) множина аналізованих даних

б) множина аналізованих даних та центри кластерів

Рисунок 3 – Результати роботи алгоритму нечіткої кластеризації fsm

На рисунку 4 відображені результати роботи нечіткої кластеризації з розбивкою на нечіткі кластера (функція приналежності – розбивка по яскравості, вид - трапецевидний). Візуалізація спрощує задачу експерта з аналізу зображень та зменшує ймовірність помилки.

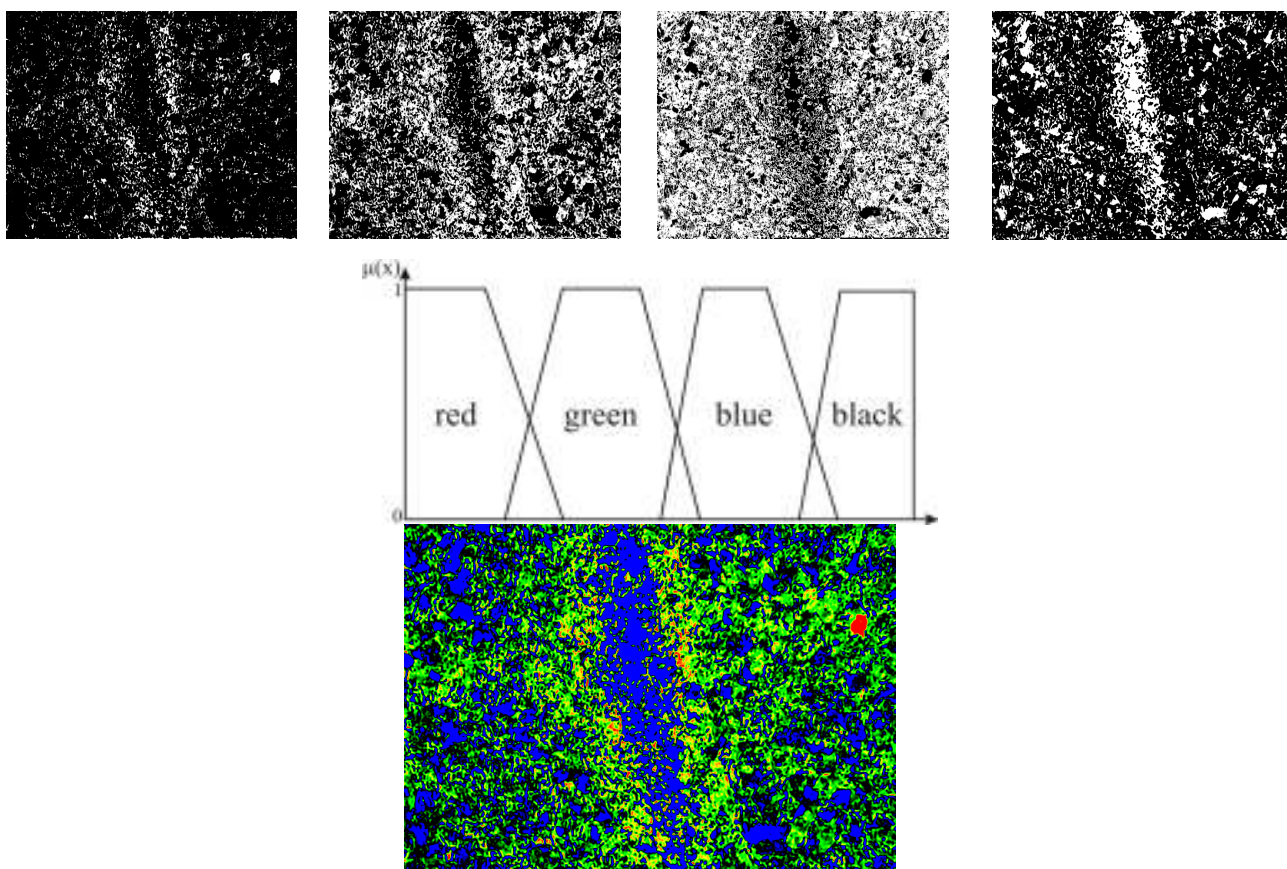


Рисунок 4 - Результати роботи нечіткої кластеризації



Проведемо дослідження алгоритму fcm для аналізу чорно – білого зображення зразка №12 (пл. №22325), смуга мартенсіта.

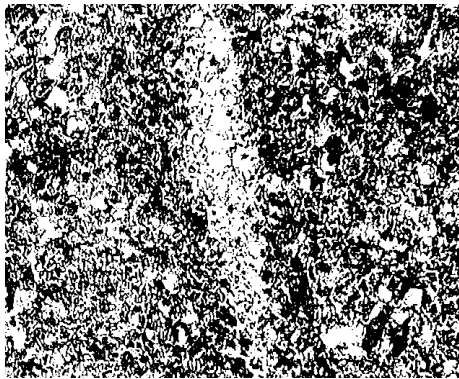


Рисунок 5 – Чорно-біле зображення зразка №12 (пл. №22325), смуга мартенсіта

Після отримання чорно-білого зображення ми створюємо цикл за допомогою якого отримуємо зображення з поданням про значення кожного пікселя. Отриманий в результаті файл fdv.dat будемо використовувати для подальшого дослідження, тому що дані для кластеризації повинні бути представлені в вигляді матриці чисел.

```
>> i4=I;
>> fid=fopen('fdv.dat', 'w');
>> for i=1:480; fprintf(fid, '%d ',i4(i,:)); fprintf(fid, '\n'); end;
>> fclose(fid);
```

Наступним кроком дослідження є визначення центрів кластеризації, для цього в Matlab застосовується функція fcm, яка виконується ітераційно до тих пір, поки зміни цільової функції перевищують деякий заданий поріг. На кожному кроці в командному вікні Matlab виводяться порядковий номер ітерації і відповідне поточне значення цільової функції. Якщо після запису функції fcm у другому рядку не ставити крапку з комою (;), то у вікні команд будуть показані значення координат центрів нечітких кластерів, значення функцій приналежності об'єктів нечітким кластерам і значення цільової функції на кожній з ітерацій роботи алгоритму FCM. У цьому прикладі використовується перший формат запису функції fcm.

```
// завантаження даних, що підлягають кластеризації з файлу fdv.dat
>> load fdv.dat
// визначення центру кластеризації (2 кластери)
>> [center,U,obj_fcn]=fcm(fdv,2);
Iteration count = 1, obj. fcn = 44787.959585
```



```
Iteration count = 2, obj. fcn = 37126.147586
```

```
Iteration count = 3, obj. fcn = 37123.721925
```

```
Iteration count = 4, obj. fcn = 37123.704452
```

```
Iteration count = 5, obj. fcn = 37123.704172
```

```
Iteration count = 6, obj. fcn = 37123.704167
```

```
>> plot(obj_fcn);
```

Для оцінки динаміки зміни значень цільової функції використовується команда побудови графіка `plot(obj_fcn)`. Результати показані на рисунку 6, з рисунку видно, що чим вище значення цільової функції `fcn` тим краще кількість ітерацій нечіткої кластеризації.

Далі визначаємо максимальну степінь приналежності окремого елемента даних кластеру.

```
// визначення максимальної степені приналежності окремого елемента даних
кластеру
```

```
>> maxU=max(U);
```

```
// розподіл рядків матриці даних між відповідними кластерами
```

```
>> index1=find(U(1,:)==maxU);
```

```
>> index2=find(U(2,:)==maxU);
```

```
// побудова даних, що відповідають першому кластеру
```

```
>>line(fdv(index1,1),fdv(index1,2),'linestyle','none','marker','*','color','black');
```

```
// побудова даних, що відповідають другому кластеру
```

```
>>line(fdv(index2,1),fdv(index2,2),'linestyle','none','marker','o','color','red');
```

```
>> hold on
```

```
// побудова кластерних центрів
```

```
>> plot(center(1,1),center(1,2),'k*','markersize',10,'LineWidth',2);
```

```
// побудова кластерних центрів
```

```
>> plot(center(2,1),center(2,2),'ko','markersize',10,'LineWidth',2);
```

Результат розв'язання задачі нечіткої кластеризації для 2-х нечітких кластерів із використанням зазначеної послідовності команд може бути візуалізовано на рисунку 7, де представлено множини даних, що підлягають кластеризації з знайденими центрами кластерів.

В процесі виконання дослідження було виявлено, що для аналізу кольорових зображень неможливо застосувати алгоритм субтрактивної кластеризації, тому що вхідна матриця даних повинна мати розмір  $n \times 2$ , далі дослідження проводились вже для чорно-білого зображення.

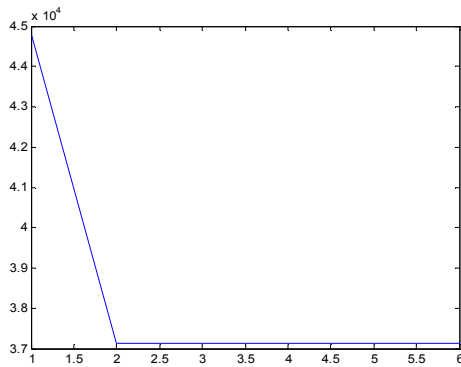


Рисунок 6 – Графік зміни значень цільової функції

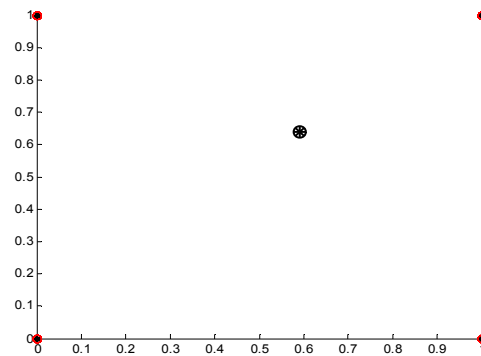


Рисунок 7 – Результат розв'язання задачі нечіткої кластеризації для 2-х нечітких кластерів

Для того, щоб зображення представити в потрібному форматі для подальшого дослідження, використовуючи алгоритм субтрактивної кластеризації було написано М-файл `convert.m`, який присвоює чорному кольору – нуль, а білому – одиницю:

```
function im1 = convert(img1)
img1 = 1 - img1;
row = numel(find(img1));
[x y] = size(img1);
im1 = zeros( row, 2);
i_row = 1;
for i = 1:x
    for j = 1:y
        if (img1(i,j) == 1)
            im1(i_row, 1) = i;
            im1(i_row, 2) = j;
            i_row = i_row + 1;
        end
    end
end
end
>> im1=convert(F);
```

У разі відсутності будь-яких апіорних припущень щодо кількості нечітких кластерів у системі MATLAB можна використовувати функцію командного рядка `subclust`: В результаті виконання цього фрагмента команд будуть одержані значення матриці центрів кластерів і вектора  $\sigma$  - значень.

```
>> [c,s]=subclust(im1,[0.5 0.5],[],[1.25 0.5 0.15 1])
Normalizing data...
```

*Computing potential for each data point...*

*Found cluster 1, potential = 1*

*Found cluster 2, potential = 0.784906*

*Found cluster 3, potential = 0.616624*

*Found cluster 4, potential = 0.577341*

*Found cluster 5, potential = 0.289288*

*c =*

*186 453*

*343 193*

*115 138*

*398 503*

*31 547*

*s = 84.6760 112.9603*

Як можна помітити, для наведених значень аргументів розглянута функція `subcluster` знаходить п'ять нечітких кластерів та відображає координати їхніх центрів у командному вікні системи MATLAB.

Алгоритми нечіткої кластеризації дозволяють розбити досліджувані об'єкти на нечіткі кластери, а нечіткі кластери в свою чергу можуть бути візуалізовані шляхом управління рівнем яскравості відповідних кольорів, аналогічним функції приналежності. Візуалізація спрощує завдання експерта з аналізу зображень і зменшує ймовірність помилки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Классификация и кластер/Под ред. Дж.Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980. – 392 с.
2. Мандель Н.Д. Кластерный анализ. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
3. Bezdek J.C. Some recent applications of fuzzy c-means in pattern recognition and image processing. – IEEE Workshop Lang. Autom, 1983, pp. 247 – 252.
4. Windham M.P. Cluster validity for the fuzzy c-means clustering algorithm. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 4, no. 4, 1982, pp. 357 – 363.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.: ил.

V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.V. Ivaschenko, V.V. Busygin  
**EFFECTIVE ALGORITHMS FOR SOLVING COEFFICIENT  
PROBLEMS OF HIGH ACCURACY ORDER**

*Annotation. In order to research the materials thermophysical properties by the inverse methods, a corresponding class of mathematical models is derived. The processing procedure for simulation models is reduced to extreme formulation, that allowed to develop effective algorithms for solving coefficient problems of arbitrary accuracy order. The package of applied programs for solving coefficient problems of thermal conductivity by simulation modeling methods is developed. The package is made on the bases of the object-oriented programming requirements. The simulation procedure was based on a multiprocessor computing system application. The test problems solution results are presented on the basis of the proposed approach.*

*Key words: coefficient problems, extreme formulation, simulation models, heat conduction, heat transfer.*

### **Introduction**

When analyzing heat transfer through heat conduction, the solution results accuracy of a given problem can greatly be affected due to a lack of information on thermophysical characteristics of a system. For this reason, it is important to clearly visualize the physical meaning and the course of changes in these characteristics due to the temperature change, the methods which they are experimentally determined by, and the limitations to which these changes are subject to [1-3]. The main thermophysical characteristics of materials that determine conditions for the heat treatment include enthalpy, heat capacity and coefficients of heat and temperature conductivity. Those parameters enter the thermal equation and determine the temperature field inside the substance. The thermophysical properties of the substance depend on a large number of factors, therefore the experiment is the only source for obtaining those characteristics [3]. However, the advent and development of a new direction, called the inverse heat conduction (IHC) problem, it became possible not only to research the form and content of simulation models

(SM) that reflect the phenomenological description of processes, but also a significant increase in the thermal experiment informativeness.

### **Analysis of recent research and publications**

The problem relevance of developing numerical methods for solution of multidimensional systems of parabolic quasilinear equations describing the processes of heat and mass transfer can be considered as undeniable. One of the most interesting examples of such systems can be the equations of hydrodynamics and metallurgical thermophysics [4, 5]. Apparently, the mass solution of non-stationary problems of high accuracy order at the current level of technical capability and on the basis of traditional methods developed up to now seems to be possible only in the following circumstances.

First, the advent of new and inexpensive communication means of the computing technology stimulated development of new information technologies: structural programming, network operating systems, object-oriented programming, parallel information processing systems, etc. The parallel processing organization of information flows, the connection of parallelization problems with architecture of a PC, parallel programming systems, methods and algorithms of parallel computing are the key themes of the computer technology development at this stage [1, 6, 7].

Secondly, by now, certain trends have been emerged for development of computational methods with complex logical structure, which have a higher accuracy order comparing to the traditional finite difference methods [8 - 10]. Considerable progress in the solution of multidimensional spatial problems can be considered as a series of proposals that are not entirely equivalent to each other, yet which pursue one stereotypical goal to reduce the three-dimensional distribution problem of the variables change area to a sequence of schemes involving unknown quantities in only one direction, alternately in longitudinal, transverse, and vertical. A sufficiently detailed bibliography of these papers is presented in [8, 9]. It should be noted that the use of implicit schemes in this case leads to systems of linear algebraic equations (SLAEs) with a three-diagonal structure [9]. Thus, the adoption, as a methodological basis, of difference schemes of splitting, firstly, ensures an economical and stable implementation of numerical models by scalar sweep method. And, secondly, it is known that the greatest effect of a

parallel processor can be achieved when it is applied to perform matrix calculations of a linear algebra.

In this paper, the identification of heat conduction processes is considered on the equations solution example of the heat conductivity in the Cartesian coordinate system for the area of  $y \in [y_o, yL], t \in [0, \infty)$ . Obviously, for given input data, this problem solution is simply realized by finite difference methods. Using the implicit timing schemes and the central differences in the spatial variable, we obtain a system of linear algebraic equations (SLAE) of a three-diagonal structure. Using the sweep method, we construct an economical difference scheme for solving a direct problem. From this algebraic SM analysis, it follows that for the grid area of the sought-for function definition  $y_p, p = 1, 2, 3, \dots, 2m, m \in Z$  in each  $y_p$ -th grid node, the coefficients of SLAE include discrete values  $\lambda_{p,1}, C\nu_{p,1}$ . As can be seen, the number of unknowns  $\lambda_{p,1}, C\nu_{p,1}$  is twice the number of grid equations. Such an unlocked SLAE, with known temperature values in the mesh nodes along a spatial variable, can have an infinite set of solutions with respect to unknowns  $\lambda_{p,1}, C\nu_{p,1}$ . Hence, a purely formal approach does not allow us to formulate a solution of IHC coefficient in the considered formulation.

### **Statement of the Problem Research.**

The research purpose is to derive the corresponding class of temperature and gradient simulation models for research of the materials' thermophysical properties by reverse methods. The main research purpose is that the SM processing procedure as those that are controlled by input parameters, reduce, on the residual principle basis, to an extreme formulation. This approach allows to develop effective algorithms for solving quotient problems on SM of arbitrary accuracy order with adaptation of time modes of a thermophysical experiment.

Hereafter, we shall assume that the one-dimensional formulation of the thermal conductivity problems is the basic of a computational SM where there should be constructed the effective IHC solutions and algorithms for experimental data processing for the material thermophysical characteristics determination.

### Formation and analysis of simulations models of materials thermo-physical properties definition

The problem solution could be obtained if the desired temperature dependences  $\lambda(T)$ ,  $C_v(T)$  are localized in the quadrants in the form of piecewise constant dependencies on temperature, both on the spatial variable and on time, and as a SM, construct the temperature and gradient dependence. We show that for each such spatiotemporal quadrant, the closed solutions of the original differential problem are effectively constructed by the Cauchy problem solutions:

$$T_{p+\varepsilon_{X,1}}(\varepsilon_t, \varepsilon_y) = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{\varepsilon_y^{2n}}{(2n)! a_p^n} \frac{1}{d\varepsilon_t^n} \frac{d^n T_{p,1}(\varepsilon_t)}{d\varepsilon_t^n} - \left( \frac{1}{\lambda_p} \right) \frac{\varepsilon_y^{2n+1}}{(2n+1)! a_p^n} \frac{1}{d\varepsilon_t^n} \frac{d^n T_{p,2}(\varepsilon_t)}{d\varepsilon_t^n} \right\}, \quad (1)$$

where  $p = \overline{1, 2m-1}$  are the numbers of grid nodes in the spatial area  $y \in [y_0, y_L]$ ;  $T_{p,1}(\varepsilon_t)$ ,  $T_{p,2}(\varepsilon_t)$  are the Cauchy data (temperature and flow) given at the nodes of the grid area with  $\varepsilon_y = 0$ ;  $a_p$  is an unmatched grid

coefficient of the temperature conductivity ( $a_p = \frac{\lambda_{p,1}}{CV_{p,1}} \frac{Dt1}{Dy1^2}$ ). The spa-

tial and temporal variables in (1) are normalized by the dependences:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{y - y_p}{y_{p+1} - y_p} \in [-1, 1] \\ \varepsilon_t &= \frac{t - t_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \in [0, 1] \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

For the p-th grid nodes distributed uniformly, the Cauchy problem solution allows constructing the closed simulation models of unknown Cauchy data in the form of a system of ordinary differential equations (SODE). Putting in (1)  $\varepsilon_y = \pm 1$  we obtain the SODE of the N-th order:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=0}^N \frac{1/a_p^n}{(2n)!} T_{p,1}^{(n)}(\varepsilon_t) &= \frac{1}{2} (T_{p+1,1}(\varepsilon_t) + T_{p-1,1}(\varepsilon_t)) \\ - \frac{1}{\lambda_p} \sum_{n=0}^N \frac{1/a_p^n}{(2n+1)!} T_{p,2}^{(n)}(\varepsilon_t) &= \frac{1}{2} (T_{p+1,1}(\varepsilon_t) - T_{p-1,1}(\varepsilon_t)) \end{aligned} \right\}, \quad N \in Z, \quad (3)$$

continuous in the time area. For instance, with  $N = 1$  we obtain a first-order SODE in the Cauchy form, where the right-hand sides are assumed

to be known functions of time. In this case, it is expedient to construct a solution in a piecewise analytical form:

$$\left. \begin{aligned} T_{p,1}(\varepsilon_t) &= T_{p,1}^*(\varepsilon_t) + (T_{p,1}(0) - T_{p,1}^*(0))\ell^{-2a_p\varepsilon_t} \\ T_{p,2}(\varepsilon_t) &= T_{p,2}^*(\varepsilon_t) + (T_{p,2}(0) - T_{p,2}^*(0))\ell^{-6a_p\varepsilon_t} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

where  $\{T_{p,1}^*(\varepsilon_t), T_{p,2}^*(\varepsilon_t)\}$  are particular solutions of inhomogeneous equations,  $\{T_{p,1}(\theta), T_{p,2}(\theta)\}$  are known initial data. In the more general case, for an arbitrary value of the integer parameter of N arrangement, it is expedient to proceed from the differential equations (3) to a normal first-order SODE with a Cauchy form. Thus, the partial differential equation integration is reduced to the first-order SODE integration in Cauchy form, which can be used to solve the coefficient problems as those that are controlled by the SM in relation to the coefficients of heat and temperature conductivity. It should also be emphasized that the inclusion of the integer N parameter in the SM as an input value allows constructing the SM with an arbitrary accuracy order and an approximate order adoption.

#### **The reduction of determination problem of materials' thermal-physical properties to extreme formulation**

One of the promising directions for processing heat transfer problems by reverse methods is to bring them to extreme formulations by numerical methods of optimization theory. In the exact extreme formulation, the definition of parameters  $\lambda_{p,1}$  and  $C\nu_{p,1}$  on SM (3) or (4) will

correspond to minimization of discrepancies in the form of functionals:

$$\left. \begin{aligned} J_{p,1}(R) &= (T_{p,1}(\varepsilon_t, R) - f(\varepsilon_t, R))^2 \\ J_{p,2}(R) &= (T_{p,2}(\varepsilon_t, R) - Q(\varepsilon_t, R))^2 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

where R are the sought-for control parameters.

The  $J_{p,1}, J_{p,2}$  values in space  $L_2$  in such a formulation can be considered as functions of the variables R. Their numerical value determines the distance in the functional space  $L_2$  between the given  $f(\varepsilon_t, R), Q(\varepsilon_t, R)$  quantities known from the experiment and that are being modeled by  $T_{p,1}(\varepsilon_t, R), T_{p,2}(\varepsilon_t, R)$  on the controlled SM (3,4).

In each concrete case, on the basis of a priori information, it is possible to describe with some certainty, a certain admissible set of in-



put parameters  $R$ . Then, if we regard the SM as controllable, then the control parameters should be selected so determine its minimum. In the vicinity of the minimum, the value of the functional can be represented by a Taylor series expansion:

$$J_{v+\varepsilon_9 1}(q) = J_{v,1} + \varepsilon_R J_{v,2} + \varepsilon_R^2 J_{v,3} + \dots, \quad (6)$$

where  $\varepsilon_q = \frac{R - R_v}{R_{v+1} - R_v}$  is the normalized argument of the function;

$J_{v,2}, J_{v,3} \dots$  – are the Taylor's components of the first and second order.

Retaining in the expansion (6) three summands and using the central differences for the Taylor components  $J_{v,2}, J_{v,3}$

$$\left. \begin{aligned} J_{v,2} &= \frac{1}{2}(J_{v+1,1} - J_{v-1,1}) \\ J_{v,3} &= \frac{1}{2}(J_{v+1,1} + J_{v-1,1} - 2J_{v,1}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

after taking the derivative and after equating its value to zero, it becomes possible to construct an interpolation formula:

$$R = R_v - \left(\frac{1}{2}\right)(R_{v+1} - R_v) \frac{J_{v+1} - J_{v-1}}{J_{v+1} + J_{v-1} - 2J_v}, \quad (8)$$

which allows arranging an iteration cycle. From this algorithm it follows that once the separation segment of the sought-for control parameter  $\{R_{p+1}, R_{p-1}\}$ , is set, where the disparity in the functional (5) changes sign, further refinement of the control parameter in solving IHC can be refined recursively by formula (8) with any preassigned accuracy.

### Experimental data and the processing

An important stage of the research was to develop a package of applied programs (PAP) for the coefficient problems solution of heat conduction by methods of simulation modeling [10]. The package was created taking into account the requirements of object-oriented programming. The simulation procedure was based on application of a multiprocessor computing system [11]. The PAP is designed for processing thermophysical experiments by inverse methods. Its creation main purpose was to provide practical assistance to the researcher at all stages of experimental data processing.

In this section of the research, additional conditions are considered allowing to divide the researched problem into two: the tempera-

ture and flow. The first one allows solving the coefficient problems in the whole given range of temperature variation with the control parameter in the form of the thermal diffusivity coefficient (model 1), the other is in the form of thermal conductivity or heat capacity (model 2). This approach corresponds to the classical methods of technical thermophysics. The SM 1 and 2 research is carried out by the method of straight lines. Moreover, model 1 (for example, algebraic or functional) and model 2 (gradient) allow solving the coefficient problem in an extreme formulation. As a test problem, it was proposed to determine the thermophysical properties of a particular industrial material [3]. The properties of coke made from gas coal were researched. For this, the temperature field of a sample with the shape of a cylinder was simulated. When solving such a coefficient problem, the following initial data were used: the thermal diffusivity coefficient  $a_0 = a$ ,  $N = 5$ . The results of simulation performed by means of a multiprocessor computing system are shown in Fig. 1. The solution of the coefficient problem was carried out with control over the dimensionless coefficient of thermal diffusivity with  $R = a / a_0$ . From the simulation results analysis (Fig. 1) it follows that the disparity minimum corresponds to the value of the parameter  $R \approx 1$ . The exact value of the control parameter  $R = 1$ . For the heat conduction problem from tabular data  $\lambda = 0.16$ . Such a parameter identification is shown in Fig. 2.

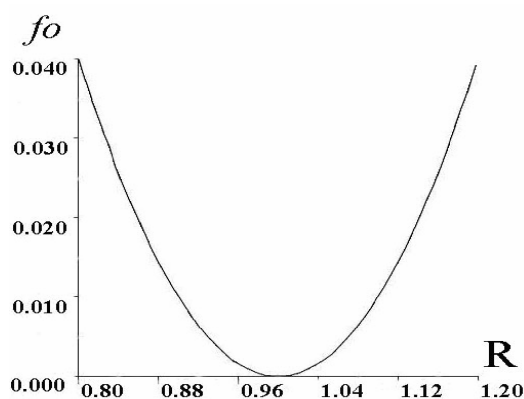


Fig. 1 - The computation results graph of the coefficient problem with  $R = a / a_0$  the control parameter relative to the thermal diffusivity coefficient

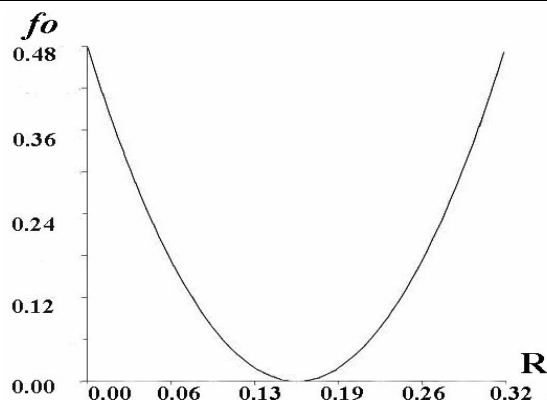


Fig. 2 - The computation results graph of the coefficient problem with  $R = \lambda$  the control parameter relative to the thermal conductivity coefficient

The developed algorithm for solving the coefficient problem can be considered satisfactory, since its version using exact input data absolutely coincides with the exact result of the analytical solution, and the errors in the computational results of the recovered causal characteristics, wherein included the input data error, approximately equal the output data error.

### Conclusions

The solution of the inverse coefficient problem in the proposed formulation is reduced to a direct determination of the functionals values sequences (5) in simulation models (3) and the computation of the minimal carriers in them  $J_{\min}$ . The determination procedure of  $J_{\min}$  can be implemented by simple sorting or by changing the sign  $J^*(a) \cdot J^*(b)$  on the segment of  $R=a, R=b$ , where for the linear functional value (5) ( $a < b$ ). It is clear that  $J^*(R) = 0$  a separated segment  $R \in [a, b]$  has a root. The values refinement of this root can be realized with any preassigned accuracy in dependence (8) or, for example, by the chords or tangents method.

It should be noted that the partition of the total time interval into independent intervals with the solution of inverse problems in each of them according to the scheme indicated above allows determining the unknown parameters value as temperature functions  $T_{p,1}(T)$ . Therefore, the subsequent stage of processing experimental data is to construct the temperature dependences  $\lambda_{p,1}(T), C\nu(T)$  in the form of certain polynomial expansions of one degree or another by the method of mathematical planning and regression analysis. At this stage, to verify and establish

the adequacy, it is advisable to use a discrete nonlinear SM within a full space-time interval.

### REFERENCES

1. Informationsnaya sistema intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy dlya protsessa prokatki [Tekst] / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, A.V. Sobolenko, D.V. Protopopov // Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. – 2003. – № 3. – S. 4 – 9.
2. Kozdoba, L. A. Vychislitel'naya teplofizika [Tekst] / L.A. Kozdoba. – Kiev: Nauk. Dumka, 1992. – 224s.
3. Teplofizicheskiye svoystva promyshlennykh materialov: [Spravochnik] / [K. D. Il'chenko, V. A. Chechenev, V. P. Ivaschenko, V. S. Tereshchenko]. – Dnepropetrovsk: Sŭch, 1999. – 152 s.
4. Rouch, P. Vychislitel'naya gidromekhanika [Tekst] / P. Rouch; per. s angl. – M.: Mir, 1980. – 616 s.
5. N. T. Vychislitel'nyye metody resheniya prikladnykh granichnykh zadach [Tekst] / TS. Na; per. s angl. – M.: Mir, 1982. – 296 s.
6. Voyevodin, V.V. Matematicheskiye modeli i metody v parallel'nykh protsessakh [Tekst] / V.V. Voyevodin. – M.: Nauka, 1986. – 296 s.
7. Sistemy parallel'noy obrabotki: Per. s angl. [Tekst] / Pod redaktsiyey D. Ivensa. – M.: Mir, 1985. – 416 s.
8. Yanenko, N.N. Metod drobnykh shagov resheniya mnogomernykh zadach matematicheskoy fiziki [Tekst] / N.N. Yanenko. – Novosibirsk: Nauka, 1967. – 196 s.
9. Kovenya, V. M. Metod rasshchepleniya v zadachakh gazovoy dinamiki [Tekst] / V. M. Kovenya, N. N. Yanenko. – Novosibirsk: Nauka, 1981. – 304 s.
10. Shvachych, G.G. Matematicheskoye modelirovaniye odnogo klassa zadach metallurgicheskoy teplofiziki na osnove mnogoprotsessornykh parallel'nykh vychislitel'nykh sistem [Tekst] / G.G. Shvachych // Matematichne modelyuvannya. – 2008. – № 1 (18). – S. 60 – 65.
11. Shvachych, G.G. PPP issledovaniya resheniy nekotorykh klassa zadach nestatsionarnoy teploprovodnosti [Tekst] / G.G. Shvachich, A.A. Shmukin, D.V. Protopopov // Metallurgicheskaya teplotekhnika: Sb. nauch. trudov NMetAU v 2-kh kn. – Kn. 2. – Dnepropetrovsk: Porogi, 2005. – S. 448 – 453.
12. Bashkov, E.O. Visokoproduktivna bagatoprotsesnaya sistema na bazh personal'nogo obchislyuval'nogo klastera [Tekst] / E.O. Bashkov, V.P. Hvaschenko, G.G. Shvachych // Nauk. pr. Donets'kogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu. Seriya "Problemi modelyuvannya ta avtomatizatsii proyektuvannya". – Vip. 9 (179). – Donets'k : DonNTU, 2011. – S. 312 – 324.

A.S. Tonkoshkur, L.V. Nakashidze, S.F. Lyagushyn

## **SCHEMOTECHNICAL TECHNOLOGIES FOR RELIABILITY OF SOLAR ARRAYS**

*Abstract. Regime factors leading to the failures of photovoltaic units of solar arrays and their components, as well as circuitry methods and means that allow solving the problems of ensuring their reliability are analyzed.*

*Prospects for improving the efficiency of circuit methods of protection against electrical thermal overloads are pointed out, in particular, based on the use of new elements of protection against current overloads on the basis of carbon-polymer self-resetting fuses.*

*Keywords: solar arrays, photovoltaic cell*

### **1. Introduction**

Solar arrays (SA's) are one of the most promising renewable sources of electricity.

As a rule, SA's are forced to operate in modes with varying inhomogeneous illumination and temperature, with the presence of partial shading effects on the output characteristics of SA and changes in power due to the action of high-energy particles (when used in outer space) and other negative factors [1-4]. This puts forward a number of specific requirements for ensuring high stability and reliability of SA components.

The sources of unreliability of the second group are factors directly related to the features of the regime of the inhomogeneity of illumination and local overheating in photocells due to the so-called non-conformity effects.

In this paper, the regime factors that lead to failures of photodiode components of SA and circuitry methods and means that allow solving to some extent the problems of ensuring the reliability of SA are analyzed.

## 2. Generalized structure of a solar array and the main sources of its unreliability

As is known, the basis of a solar array is a photovoltaic (solar) cell (PVC), which is a semiconductor p-n-junction, intended for converting electromagnetic solar radiation into electrical energy [5]. When sunlight hits the boundary zone between the n- and p-type layers, an electromotive force arises that creates an electric current in the closed external circuit connected to the PVC contacts. Charge carriers appearing in the cell create a so-called photocurrent, which is determined by the solar radiation level.

Silicon (monocrystalline, polycrystalline, amorphous), cadmium tellurides and (di) selenide of copper (indium) gallium, gallium arsenide, polymers and organics based on carbon fullerenes, copper phthalocyanine, polyphenylene, and others are used to fabricate PVC's [6, 7] .

Structurally, PVC is a plate whose dimensions can not exceed a certain value due to technological features of production.

When connecting such cells to each other in a series, parallel, or combined way, photovoltaic (solar) modules (PVM) are composed, and from them, respectively, a photoelectric system called a solar array. [5, 7, 8].

Modules of the most common crystalline solar cells (Fig. 1) consist of a transparent face surface layer (1), an encapsulator (2), between two layers of which solar cells, electrically interconnected by metal busbars (3), are placed, and a lower (rear) layer (4), which are enclosed in a frame of an aluminum profile (Fig. 1).

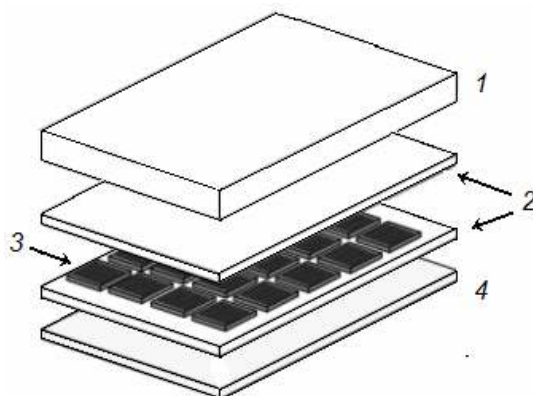


Fig. 1 - Photovoltaic module structure

In most modules, the top layer is made of glass with low iron content. This material has high strength, stability, impermeability to water and gases, good self-cleaning properties, and low cost. The encap-

insulator is needed to create an intermediate layer between solar cells, the front surface and the rear one of the photoelectric module. It is made from ethyl vinyl acetate (EVA), which is optically transparent and has low thermal resistance. The back layer is made of polyvinyl fluoride (PVF or Tedlar). The main requirement for it is low thermal resistance, water resistance, and transparency (in double-sided modules). The aluminum frame must not protrude beyond the surface of the module so that water, dust and dirt do not accumulate on it.

The module protects the PVC from weather conditions, and users - from electric shock.

In accordance with the ideas about reliability of electronic and microelectronic devices, to the first group of sources of unreliability of components we must attribute [9-11]:

- PVC degradation (reduction in output power or failure) due to deterioration of contacts or corrosion, metal migration through the p-n junction, deterioration of the antireflection coating;

- short circuits between connecting contacts and PVC, if they are damaged by corrosion, and in the module ("hidden" manufacturing defects or the result of insulation degradation caused by the environment leading to delamination, cracking, and electrochemical corrosion);

- breakage of the electrical circuit of the PVC due to its cracking caused by thermal stress, hail, or manufacturing damage creating "hidden cracks" that can not be revealed during the inspection at the enterprise, but which manifest themselves later;

- breaks in the connecting circuit or in modules (in the bus or junction box) due to fatigue as a result of cyclic thermal stresses and wind action;

- mechanical damage to the glass and encapsulator due to leaching and diffusion (slow exhaustion occurs, and when the concentration falls below the critical level, the encapsulator material rapidly degrades).

Elimination or minimization of the influence of these factors on the operation of solar arrays can be provided by the improvement of their design and manufacturing technology, as well as the use of structural (hardware) backup methods in especially important cases [12-13].

The sources of the second group's unreliability are factors directly related to the features of the regime of changing non-uniform il-

lumination and local overheating in photocells due to the so-called coupling effects. Current circuitry techniques and means of minimizing the influence of these factors and improving the reliability of components and solar cells themselves are discussed below [9].

### 3. Connection effects

The term “connection effect” defines the mismatches (inconsistency) of electrical circuits in a module, caused by the use of elements with different properties or operating under different conditions. The inconsistency is a serious problem in photovoltaic modules and arrays under certain conditions, since the output parameters of the module in poor conditions are determined by the characteristics of the solar cell with the lowest output. For example, when a shadow falls on one of the module's elements, the power generated by the other elements can be scattered on the “bad” element and does not reach the payload. This can lead to the scattering of a large amount of electrical power in a small area, as a result of which its temperature and the probability of irreversible damage will increase significantly [9].

#### 3.1. Inconsistency of series-connected elements

Series connection of PVC's (or PVM's) with differing parameters may lead to inconsistencies in short-circuit current and idling voltage, which significantly affect the efficiency of such electrical circuits. The currents flowing through two series-connected elements are equal ( $I_1 = I_2 = I_s$ ). The resulting voltage is equal to the sum of the voltages on each element ( $U_1 + U_2 = U_s$ ). Since the current must be the same, the current mismatch means that the total current from the two elements will be equal to the smaller of the currents.

Of the two simplest types of mismatch (mismatches of short-circuit current and no-load voltage), a short-circuit current mismatch occurs more often, since it can occur due to the shading of a part of the module. This type of discrepancy is also the most significant.



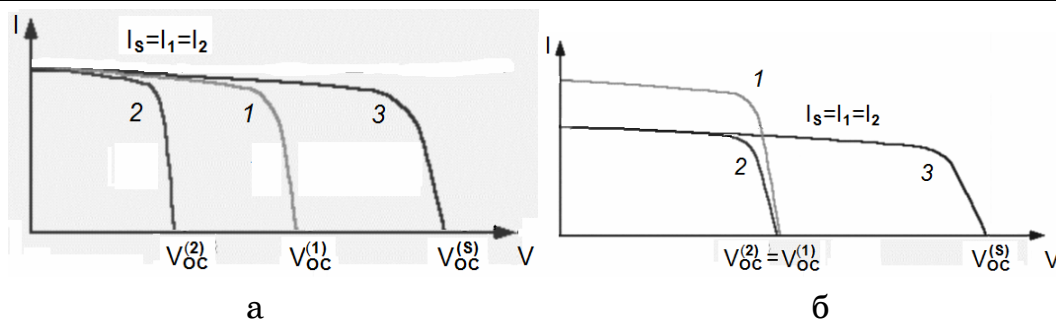


Fig. 2 - The volt-ampere characteristic (VAC) of a series connection of the photocells (3) of the module (Fig. 1) when their idle (open-circuit) voltages (a) or short-circuit currents (b) do not match each other. Index "1" corresponds to a "good" PVC and "2" – to a "bad" PVC

If the open-circuit voltages do not match each other when cells connected in series, at the short-circuit point the total current of the module remains unchanged, but the module power at the maximum power point decreases because of the lower performance of the "bad" solar cell [9]. Since two elements are connected in series, the same current flows through them, and the resultant voltage can be found by adding the voltages on each of two cells (Fig. 2, a).

The mismatch of the short-circuit currents in series connection case can have a negative effect on the photoelectric device depending on the operating point.

At the no-load voltage point, the effect of short-circuit current reducing is relatively small. The open-circuit voltage decreases only slightly, since it depends logarithmically on the short-circuit current.

However, since the current flowing through the two cells must be the same, the total current cannot exceed the current of the "bad" element. Therefore, the current from the two cells cannot be greater than the short-circuit current of the "bad" cell. At a low voltage at which this condition is fulfilled, the additionally generated current of the "healthy" cell will not be dissipated in each of cells connected in series, but only in the "bad" one. High energy dissipation in a "bad" cell can cause its irreversible damage.

### 3.2. Local overheating

Overheating in the active section of the series connection of the PVM's (or photocells inside them) takes place when one of them with a low short-circuit current ("bad", for example, a shaded PVM) is con-

nected in series with several elements with a high short-circuit current (Fig. 3).

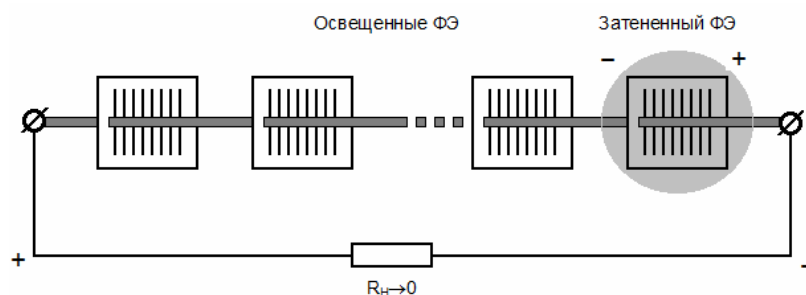


Fig. 3 - One shaded cell in the circuit reduces the current through the illuminated solar cells, as the result they produce a higher voltage that can displace the "bad" element in the opposite direction at a low load resistance  $R_L$

If the resulting current of the circuit approaches the short-circuit current of the "bad" cell, then it is limited by this current. The additional current produced by the "good" cells shifts them in the forward direction. If the circuit is closed, a direct bias on "good" cells displaces the "bad" cell in the opposite direction, and it works as a load, and not as a generator. Energy dissipation on such loads leads to an inhomogeneous heating of the module, in particular, to the appearance of local heating regions, which are called "hot spots".

Irregularities of PVM heating are detected and examined by visual inspection, infrared thermography, electroluminescent methods [14-18], etc. Fig. 4 presents the thermogram of the PVM sector given in [7], which illustrates the inhomogeneity of the temperature distribution in photovoltaic modules.

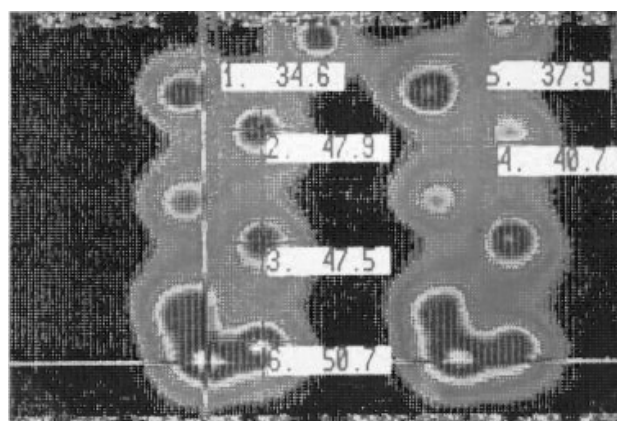


Fig. 4 - Thermographic image of a 16-cell photoelectric module with a single bypass diode at reverse bias, The digits indicate the temperatures of corresponding local areas

The appearance of "hot spots" and an increase in the PVM temperature lead to a number of undesirable effects [19], in particular:

- reduction of its electrical voltage and, consequently, of output power;
- increase in mechanical stresses associated with thermal expansion and various damages (glass cracking, melting of solder, damage to the solar cell itself, etc.);
- increase in the rate of degradation.

It should be noted that another potential cause of hot spots is a defect in the module, for example, a crack, poor soldering of two busbar leads inside the partitions, punctures in the lower fluoroplastic sheet, polarization or dirt [16, 18, 20]. This defect becomes a load, so the current also concentrates in this region, using a huge dissipation of power in the damaged cell.

The consequences of the appearance of "hot spots" in most cases lead to accelerated aging of PVM. A "hot spot" caused by a short circuit between the front and rear layers of the PVM partition causes "melting" of its lower layer and can lead to fires.

### 3.3. Inconsistency of parallel cells

In this case, the voltage in the circuit is always the same, and the resulting current equals to the sum of currents from each cell. In Fig. 5, a the output current of the second ("bad") element is lower than that of the first one. If currents do not match each other, the problem does not arise: the total current is always higher than the current of each cell. If the voltages of two cells connected in parallel do not match, the "bad" element reduces the open-circuit voltage of the "good" element (Fig. 5, b).

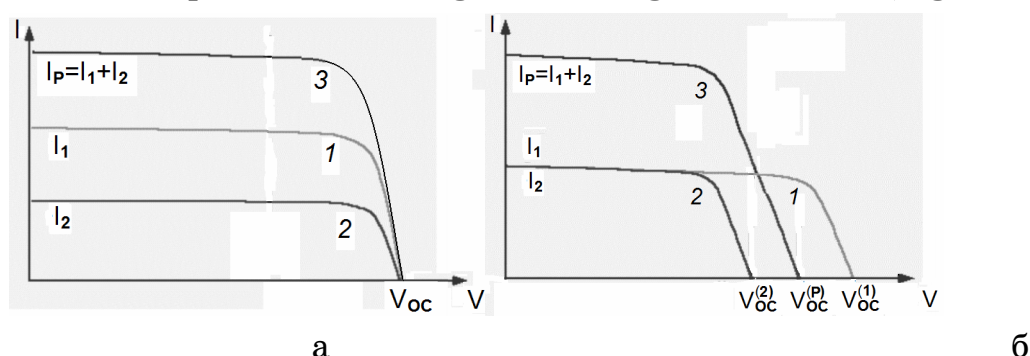


Fig. 5 - VAC of parallel connection of cells in the case of inconsistency of short-circuit currents (a) and open-circuit voltages (b). Index "1" corresponds to the "good" PVC and "2" corresponds to the "bad" one

$$V_{oc} = V_{oc}^{(P)} = V_{oc}^{(1)} = V_{oc}^{(2)}$$

#### 4. Circuit technique and means of minimizing the influence of regime factors on the operation of solar array components

##### 4.1. Photovoltaic modules

The destructive effect of local overheating can be leveled with a bypass diode. The bypass diode is connected in parallel with the PVC, so that their polarities are opposite.

Under conditions of short circuit ( $R_L \rightarrow 0$ ) and of the open circuit ( $R_L \rightarrow \infty$ ) and matched currents, each PVC from their connection in series will be shifted in the forward direction, and the bypass diode – in the reverse, i.e. will be in the idling state (will open the electric circuit).

However, when the "bad" PVC as a result of the mismatch of short-circuit currents between several series-connected cells moves in the opposite direction, the bypass diode will become conductive, allowing the current from the "good" cells to flow in the external circuit without changing the voltage on each "good" cell. The maximum reverse voltage on the "bad" element is reduced by the voltage on each of the diodes, reducing the current and preventing overheating.

The work of the bypass diode and the current-voltage characteristic in the short circuit case with inconsistent currents are shown in Fig. 6. The current from the "good" photocell PVC2 shifts it in the forward direction. The bypass diode of the "good" module D2 is shifted in the reverse direction and does not have any effect. The bypass diode of the shaded cell D1 is shifted in the forward direction from the "good" cell and conducts current. The shaded cell has a reverse bias.

In an open circuit with unmatched currents, the shaded solar cell has a reduced VOC. The bypass diodes are inversely shifted and have no effect.

Due to the fact that in practice using a bypass diode for each photocell is too expensive, they are connected straight to a serial connection of PVC's – from several ones up to the whole module. The voltage on the shaded cell or any other one producing a low current is equal to the forward bias voltage of all the other connected cells plus the voltage on the bypass diode.

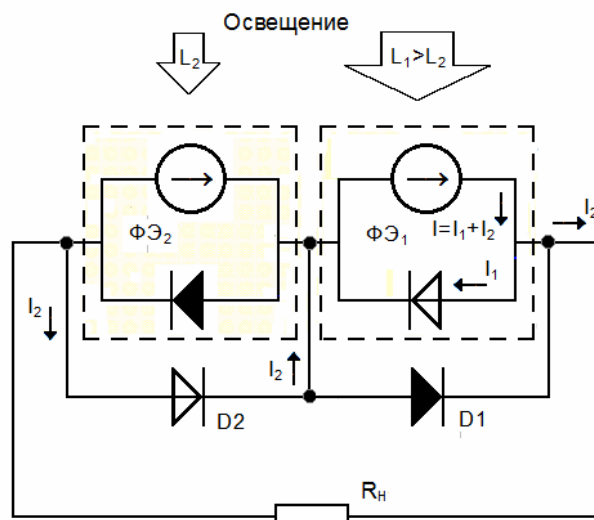


Fig. 6. The principle of the bypass diodes in series-connected solar modules in the case of uncoordinated currents at short circuit. It is assumed that the circuit elements contained in the dashed lines simulate photocells, the first of which is shaded PVC1. The current source is the current  $I$  generated by light. Diodes  $D1$  and  $D2$  outside the dashed blue line are bypass

#### 4.2. Solar arrays

In large photovoltaic systems, the modules are connected both in series and in parallel. A successively connected set of cells or modules is called a "row". The combination of serial and parallel connections can lead to some problems in solar panels.

For example, if one row from their parallel connection (which is often called a "block") is opened, the current through the remaining connected rows will be less than the current through the remaining blocks in the array. As a result, this leads to power output loss.

The parallel connection of rows of modules connected in series in combination with the mismatch effect in one of them requires that a bypass diode connected in parallel with the modules can withstand the current of all paralleled array rows. A mismatch in the connected modules will cause current flow through the bypass diode and heating it, which will lead to a decrease in its effective resistance and further increase in the flowing current. As a result, such bypass diodes become even hotter, their resistance is further reduced, increasing current, etc. If the bypass diodes are not designed for such a current, they can burn, which will damage the photovoltaic modules.

In addition to the bypass diodes, a diode, called a blocking diode, is applied to reduce the losses caused by the mismatch [7]. Such blocking diode is also used in stand-alone systems so that at night the current from the chemical batteries does not flow through the solar array. When modules are connected in parallel, each row of modules must have a blocking diode. This not only reduces the load on a single diode, but also does not allow the current from one parallel connected row to flow into a row with a smaller current, which reduces the losses caused by the mismatch when the rows in the array are connected in parallel (Fig. 7).

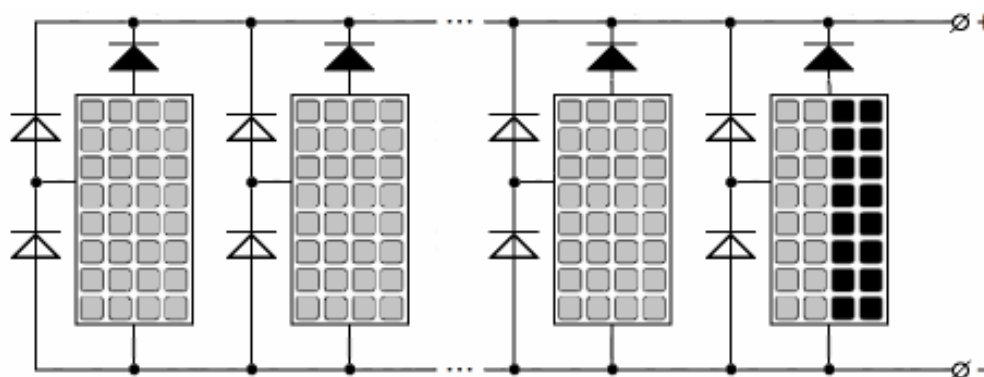


Fig. 7 - Blocking diodes (blackened) at parallel connection of modules: on the shaded module the blocking diode does not allow current flow to this module from the "good" ones connected in parallel

#### **5. Prospects for improving the efficiency of circuit protection methods against electrical thermal overloads**

Recently, the problems of research and development of methods and means to improve the reliability of solar arrays and their components are given great importance. There are a number of different approaches to the problem of "hot spots".

One of them is based on the improvement of previously formulated methods and means connected with using bypass diodes. So in [21] a new strategy of shunting for single-crystal and polycrystalline solar panels is presented, which allows to reduce the temperature of the hot spot significantly (up to 24°C maximally), both at partial and full shading. It uses a multiply connected power MOSFET that acting as a voltage divider, subtracts a portion of the reverse voltage from the shaded photocell.

Another direction is based on applying the MPPT (Maximum Power Point Tracking) techniques, which use digital devices that analyze the volt-ampere characteristic of PVM and determine the optimal mode of its operation. The results of simulation and field testing of the

behavior of "hot spots" in photovoltaic systems with central and distributed MPPT are given in [22]. The latter is recognized to be more effective, since it allowed to avoid "hot spots" under shading conditions up to 50% of one cell (while the central MPPT – only up to 12%).

It is also promising to use self-healing fuses (SHF) of "Polyswith" type [23] as additional blocking devices to isolate temporary short circuits or overcurrent inside photocells and photovoltaic modules. Such SHF's are polymer composites with nanosized carbon fillers. The basic functional property of SHF's is the abrupt increase in electrical resistance by several orders of magnitude when a certain temperature threshold is reached and return to the initial high-conductivity state with temperature decreasing [24, 25].

These elements of electrical and thermal protection have already found application in batteries and galvanic power supplies [25-28]. Their merits include:

- the resistance close to the metal resistance up to the switching temperature and to the insulator resistance above the specified temperature;
- realizability in the form of discrete elements and continuous films – tapes (that is, the possibility of realizing the isolation of a defective local area of a separate photocell);
- a reaction, in the form of a temporary blockage of individual components of the solar array, both to temperature rise and to current density increase.

### Conclusions

The sources of unreliability of solar arrays caused by factors directly related to the characteristics of their heterogeneous illumination are described.

The analyzed modern level of circuit technology and methods of protecting solar array components from local overheating and current overload testifies to the need for their improvement. As one of the prospective lines of protection from short circuits and current overloads, it has been proposed to use self-healing fuses made of polymer composites with nanocarbon fillers.

## LITERATURE

1. Weinstock, D., Appelbaum, J., 2004. Shadow Variation on Photovoltaic Collectors in a Solar Field. 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers, pp. 354–357.
2. Meyer, E.L., Dyk, E.E.V., 2004. Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters. IEEE Transactions on Reliability 53 (1), 83–92
3. E. Karatepe, M. Boztepe, M. Golak. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells // Solar Energy. - 2007. - Vol. 81, Iss. 8. -P. 977–992
4. R. Ramabadran, B. Mathur Effect of shading on series and parallel connected solar PV modules. Modern Applied Science, - 2009. - Vol 3, No 10. - P. 32-41.
5. Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалеева Р. Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: учебно-методическое пособие. – М.: Изд. Центр РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2016. – 90 с.
6. Зезин Д. А. Деградационные процессы в тонкоплёночных солнечных элементах. Дис. ... канд. техн. наук. Москва: нац. иссл. ун-т «МЭИ», - 2014. – 129 с.
7. Виды солнечных батарей: сравнительный обзор. Совет инженера - Интернет-энциклопедия по обустройству сетей инженерно-технического обеспечения [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://sovet-ingenera.com/>
8. А. В. Левшов, А. Ю. Фёдоров О математическом моделировании фотоэлектрических модулей // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №1(14)' 2013. С.153-158.
9. United Solar Technologies – Солнечные модули и батареи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ust.su/solar/media/section-inner17>.
10. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов.- 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш.шк., 1986. – 464 с.: ил.
11. Козырь И. Я Качество и надежность интегральных микросхем М.: В. шк., 1987. – 144 с.
12. Тонкошкур О. С., Ігнаткін В. У. Контроль якості та надійності мікроелектронії виробів. Практикум. Навчальний посібник з грифом МОН. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. – 128 с.
13. Ачкасов В. Н., Смерек В. А. Обобщенный критерий надежности интегральных схем и методы защиты от одиночных сбоев в цифровых устройствах на стадии проектирования. Научный журнал Куб. ГАУ. – 2014. – № 76(02). - С. 1-12.
14. Mucoz J, Lorenzo E, Martinez-Moreno F, Marroyo L, Garcia M. An investigation into hot-spots in two large grid-connected PV plants. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2008 ; 16: 693-701 . DOI:10.1002/pip.844
15. April M. Salazar, and Erees Queen B. Macabebe MATEC Web of Conferences 70, 10015 (2016), ICMIT. DOI: 10.1051/matecconf/20167010015



16. R. Moretyn, E. Lorenzo, L. Narvarte Experimental observations on hot-spots and derived acceptance/rejection criteria/ Solar Energy, Volume 118, August 2015, Pages 28-40 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.05.009>
17. Alonso-Garcia MC, Herrmann W, Böhmer W, Proisy B. Thermal and electrical effects caused by outdoor Hot-spot testing in associations of photovoltaic cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2003; 11: 293-307. DOI:10.1002/pip.490
18. April M. Salazar, and Erees Queen B. Macabebe MATEC Web of Conferences 70, 10015 (2016), ICMIT. DOI: 10.1051/mateconf/20167010015
19. Silvestre S. and Chouder A. Effects of Shadowing on Photovoltaic Module Performance // Prog. Photovolt: Res. Appl. (2007). Published online in Wiley InterScience ([www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)) DOI: 10.1002/pip.780
20. Miguel Garcia, Luis Marrojo, Eduardo Lorenzo, Javier Marcos and Miguel Páez Observed degradation in photovoltaic plants affected by hot-spots Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Volume 22, Issue 12 December 2014 Pages 1292–1301 DOI: 10.1002/pip.2393
21. Santolo Daliento, Fabio Di Napoli, Pierluigi Guerriero, Vincenzo d'Alessandro A modified bypass circuit for improved hot spot reliability of solar panels subject to partial shading. Solar Energy, Volume 134, September 2016, Pages 211-218
22. J. Solyrzano., M. A. Egido Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT)/ Solar Energy. Volume 101, March 2014, Pages 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.020>
23. Иванченко А. В., Мазурик С. В., Тонкошкур А. С., Беспалов В. М. Перспективы изделий из полимерных композитов с нанокремнеземными наполнителями как элементов электрической защиты солнечных батарей. Тези доп. II Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем - MEICS-2017». – Дніпро: ДНУ ім. Олеся Гончара, 2017. – С.207-208.
24. Трусков В. А., Гусев А. М. Элементы защиты электрических цепей от перенапряжений и сверхтоков. Труды Международного симпозиума «Надежность и качество» Издательство: Пензенский государственный университет (Пенза) 2011. - Том: 2. - С. 221-224
25. Гавриков В. Самовосстанавливающиеся РТС-предохранители для защиты от токовых перегрузок «Новости Электроники», 2014. - № 12. - С. 11-15.
26. E. C. Dimpault-Darcy, B. J. Bragg. Thermal switch disc for short circuit protection of batteries US Patent US4973936 A (1990). <https://www.google.ch/patents/US4973936>
27. Kyung-Yong Cheon Battery pack with battery protection circuit US Patent US 5963019 A (1999) <https://encrypted.google.com/patents/US5963019>
28. J. W. Oglesbee, A. G. Burns. Overcharge protection device and methods for lithium based rechargeable batteries. US Patent 6,608,470 B1 (2003). <https://www.google.com/patents/US6608470>.

В.Ф. Балакин, Ю.Д. Угрюмов, Д.А. Богдан,  
И.В. Донской, Ю.А. Кондратьев, С.В. Кадильников  
**РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ НА  
ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ»**

*Аннотация. В настоящее время на ПАО «Интерпайп НТЗ» эксплуатируются три трубопрокатных агрегата: ТПА 5-12" с пилигримовыми станами, пущенный в декабре 1968 года, ТПА 140 со станами «тандем» продольной прокатки (июль 1975 года) и ТПА 200 с трехвалковым раскатным станом Ассела (декабрь 1962 года).*

*Ключевые слова: пилигримовый стан, станами «тандем», стан Ассела, трубопрокатный агрегат, качество продукции, экономичность производства.*

Значительные сроки эксплуатации этих агрегатов и необходимость совершенствования технологии для производства труб, отвечающих современным требованиям, определяют выбор направлений развития этих ТПА.

Важнейшим событием явился пуск в 2012 году электрометаллургического комплекса с установкой непрерывной разливки заготовок круглого поперечного сечения, которую в настоящее время используют все трубопрокатные агрегаты завода. Качество НЛЗ достаточно высокое, что обеспечивает производство труб в соответствии со стандартами.

ТПА 5-12" с пилигримовыми станами. По сравнению с проектом за прошедшие годы можно отметить следующие основные изменения: установка пилы фирмы «Линзингер» (Австрия) для порезки НЛЗ на мерные части, 5-ти клетового калибровочного стана, замена клетей пилигримового стана. Проектный сортамент труб: диаметры 219-325 мм и толщина стенки  $\geq 8$  мм был значительно расширен и составляет 168-426 мм с толщиной стенки  $\geq 6$  мм. Характерной особенностью ТПА 5-12" является использование схемы Кальмеса для получения гильз в две стадии с промежуточным подогревом: прошивку слитка в стакан на горизонтальном гидравлическом прессе с после-

дующей раскаткой стакана с прошивкой доньшка на косовалковом стане элонгатора.

Схема Кальмеса отличается как низкой точностью гильз, так и затратами энергии на подогрев стакана. Ввиду невозможности в настоящее время полностью перейти на прямую прошивку гильзы из круглой непрерывнолитой заготовки в косовалковом стане из-за его недостаточной мощности основным направлением является применение модульной технологии, когда часть сортамента труб (168-245 мм) производят по схеме без пресса и подогревательной печи, а трубы (>245 мм) – по схеме Кальмеса. По такой модульной схеме работает ряд зарубежных агрегатов.

Для существенного улучшения качества труб на пилигримовом стане необходимо приобретение новых современных подающих агрегатов или постепенная модернизация существующих. Реальным представляется модернизация аппаратов для обеспечения кантовки гильз независимо от отката, что повысит точность труб.

Расширение сортамента труб в сторону больших диаметров >377 мм предопределяет необходимость замены клеток пилигримового стана для размещения соответствующих валков. Кроме того, для производства таких труб, как правило, небольшими партиями целесообразна установка одноклеточного автоматизированного калибровочного стана, в котором за 3-5 проходов обеспечивается необходимая точность труб по наружному диаметру. Известно, что пилигримовая прокатка характеризуется получением труб с низким качеством наружной поверхности.

Поэтому использование правильно-полировального стана за калибровочным позволит не только обеспечить правку труб по всей длине, включая и концевые участки с повышенной, как правило, кривизной, но и существенно улучшить товарный вид труб.

ТПА 140 со станами «Тандем» продольной прокатки. Этот агрегат, имея высокую производительность, обусловленную составом оборудования и линейным его расположением, имеет недостатки, которые связаны с невозможностью получения труб со стенкой <4 мм и недостаточной точностью труб по толщине стенки. Рассмотрим направления совершенствования технологии на этом агрегате. Кардинальным улучшением технологии разделения исходной НЛЗ на мерные части явилось бы использование процесса резания зубчатыми

или абразивными пилами. Это позволило бы повысить эффективность использования зацентровщика перед прошивкой, который в настоящее время не эксплуатируется. Актуальным вопросом здесь является и выбор рациональной конструкции зацентровщика. Важное значение для прокатки гильз на станах продольной прокатки является введение в них смазки с антиоксидантами и удаление лишней смазки. На стане продольной прокатки СПП-1 имеет место значительная динамика встречи гильзы с валками, что ухудшает условия захвата и ограничивает величину обжатия по толщине стенки.

Одним из направлений улучшения условий захвата и увеличения обжатия по стенке является метод прокатки на СПП-1 за линией центров, что достигается новой калибровкой оправки и ручья валков. Этот метод был ранее испытан на ТПА 140 с положительными результатами, однако имеет определенные ограничения, связанные с устойчивостью стержня оправки. Другим направлением улучшения захвата гильзы на СПП-1 является утонение переднего конца гильзы, которое использовалось на ТПА 350 (ЮТЗ).

Возможность увеличения обжатия по толщине стенки на обкатных трехвалковых станах до 20-25 % позволила бы существенно снизить разностенность труб и уменьшить толщину стенки готовых труб (<4 мм). Калибрование труб на многоклетевых станах вызывает появление повышенной кривизны концов труб, что приводит к увеличению обрезки и дополнительному расходу металла. Использование правильно-полировального стана решило бы эту проблему и улучшило качество наружной поверхности труб. Для улучшения качества ремонта внутренней поверхности труб необходимо использовать современные методы и оборудование.

ТПА 200 с трехвалковым раскатанным станом Ассела. Эти агрегаты получили широкое распространение в мире для производства труб с высокой точностью по диаметру и толщине стенки из углеродистых и легированных сталей прежде всего из стали ШХ15 для подшипниковой промышленности [1]. Однако они характеризуются достаточно узким сортаментом прокатываемых труб ( $D/S = 4-11$ ), что в современных условиях снижения спроса на эти трубы, и прежде всего, шарикоподшипниковые, приводит к недогрузке агрегата 200. В настоящее время для развития прокатки труб на ТПА 200 известно направление, разработанное Г.Н. Кушинским с сотрудниками, со-

гласно которому трубы диаметром 180-230 мм раскатывают на неподвижной профильной оправке, для чего на входной стороне стана устанавливают упорно-регулируемый механизм. При этом выходная сторона оборудуется перехватчиком стержня, двумя парами прижимных выдающих роликов расположенных до шестеренной клетки и парой прижимных роликов, расположенных за шестеренной клетью. Такая технология расширяет D/S труб до 12-17.

При прокатке заднего конца трубы с помощью регулятора размера калибра или гидроподушки за счет разведения одного или нескольких валков можно уменьшить обжатие по стенке, что позволяет вести прокатку без образования «треугольника» на заднем конце трубы. Однако такая технология приводит к увеличению массы обрезки и расхода металла. В ОАО «ЭЗТМ» совместно с ОАО «ВТЗ» разработали и внедрили новый способ прокатки тонкостенных труб  $D/S \leq 40$  на ТПА с трехвалковым раскатным станом 200 ОАО «ВТЗ» [2]. Сущность предложенного способа заключается в том, что при прошивке заднего конца гильзы его утоняют со стороны внутреннего диаметра за счет перемещения оправки против хода прокатки, а при раскатке этого конца валки раскатного стана разводят. При этом сумма величины утонения стенки конца гильзы при прошивке и величины разведения каждого валка с гребнем на раскатном стане должна быть равна 1,1-1,3 высоты гребня. Для использования данной технологии ОАО «ЭЗТМ» был разработан и поставлен на ОАО «ВТЗ» специальный упорно-регулируемый механизм, позволяющий перемещать стержень с оправкой в процессе прошивки [3]. Утонение стенки на заднем торце гильзы было принято в пределах  $\Delta S_r = 20-30 \%$ . Для утонения стенки гильзы на 3,5 мм ход перемещения оправки составил 44,6 мм.

В настоящее время ТПА 200 ПАО «Интерпайп НТЗ» нуждается в серьезной модернизации. Трехвалковая клеть раскатного стана находится в эксплуатации с 1994 года и требует замены [4], кроме того необходима замена клетки трехвалкового калибровочного стана, зацентровщика и восстановление подогревательной печи.

Перспективным направлением является расширение сортамента труб в сторону малых диаметров 28-32 мм с использованием процессов горячей и холодной деформации.

**ЛИТЕРАТУРА**

1 Пути расширения сортамента труб на агрегате 200 ПАО «Интерпайп НТЗ» / Ю.А. Кондратьев, А.Н. Степаненко, Б.И. Тартаковский и др. Бюллетень «Черная металлургия», 2014, № 9, с. 58-65.

2 Пат. 2138348 Россия. Способ горячей прокатки бесшовных тонкостенных труб / Б.И. Тартаковский, Н.П. Рябихин, М.А. Минтаханов и др. Б.И., 1999, № 27.

3 Пат. 2308330 Россия. Упорно-регулируемый механизм трубопрокатного стана поперечно-винтовой прокатки / И.К. Тартаковский, Ю.С. Артемьев, Б.И. Тартаковский и др. Б.И., 2007, № 29.

4 Пат. 2040348 Россия. Трехвалковая клеть стана поперечно-винтовой прокатки / И.Л. Гольдштейн, Д.В. Терентьев, П.М. Финагин и др. Б.И., 1995, № 21.

## БЕЗПЕКА СИСТЕМИ ПОДАЧІ ДУТТЯ В КОНВЕРТЕР

*Анотація. Розглянуто послідовність аналізу ризику на промислових об'єктах. На прикладі системи подачі дуття в кисневий конвертер побудовано дерево відмов для одного з факторів – знос сопел кисневої фурми та визначені показники безпеки.*

*Ключові слова: технічна безпека, конвертер, система подачі дуття, фурма, індекс безпеки, строк служби.*

Технічний рівень країни оцінюється, перш за все, згідно з виробництвом металургійної продукції – чавуну, сталі, прокату. Якість і обсяг виробництва металургійної продукції визначають розвиток усіх галузей країни – машинобудування, транспортної та хімічної промисловості, верстатобудування, енергетики та ін. Також важливим критерієм стану науки і виробництва в країні є рівень безпеки на підприємствах.

У теперішній час у конверторному виробництві різко зростає швидкість плавок та разом з цим і знос обладнання цехів. Наслідком жорсткості умов роботи устаткування є зменшення терміну служби вузлів і деталей і збільшення числа аварійних поломок, що приводять до простоїв.

Система подачі дуття є одною з найважливіших систем конверторного цеху, від її стану залежить якість продукції, термін служби самого конвертора, аварійна небезпека виробництва. Це у свою чергу змушує підходити до розгляду з точки зору показника безпеки усього процесу загалом.

Основними проблемами при оцінці ризику експлуатації системи подачі дуття є неможливість визначення гарантованого строку служби елементів її конструкції, внаслідок різноманітних деградаційних процесів, що протікають під час експлуатації системи [1].

### **Аналіз ризику на небезпечних промислових об'єктах.**

Аналіз ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах є складовою частиною управління промисловою безпекою. Аналіз ризику полягає в систематичному використанні всієї доступної інформації для ідентифікації небезпек і оцінки ризику можливих небажаних подій. Результати аналізу ризику використовуються при декларуванні промислової безпеки небезпечних виробничих об'єктів, експертизі промислової безпеки, обґрунтуванні технічних рішень по забезпеченню безпеки, страхуванні, економічному аналізі безпеки по критеріях "вартість - безпека - вигода", оцінці дії господарської діяльності на природне довкілля і при інших процедурах, пов'язаних з аналізом безпеки [2].

Основні завдання аналізу ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах полягають в представленні особам, що приймають рішення:

- об'єктивній інформації про стан промислової безпеки об'єкту;
- відомостей про найбільш небезпечні, "слабкі" місця з точки зору безпеки;
- обґрунтованих рекомендацій по зменшенню ризику.

Процес проведення аналізу ризику включає наступні основні етапи:

- планування і організація робіт;
- ідентифікація небезпек;
- оцінка ризику;
- розробка рекомендацій по зменшенню ризику.

На етапі планування робіт слід:

- визначити аналізований небезпечний виробничий об'єкт і дати його загальний опис;
- описати причини і проблеми, які викликали необхідність проведення аналізу ризику;
- підібрати групу виконавців для проведення аналізу ризику;
- визначити і описати джерела інформації про небезпечний виробничий об'єкт;
- вказати обмеження вихідних даних, фінансових ресурсів і інші обставини, що визначають глибину, повноту і детальність аналізу ризику, що проводиться;



- чітко визначити цілі і завдання аналізу ризику, що проводиться;
- обґрунтувати використовувані методи аналізу ризику;
- визначити критерії прийнятного ризику.

Для забезпечення якості аналізу ризику слід використовувати знання закономірностей виникнення і розвитку аварій на небезпечних виробничих об'єктах. Якщо існують результати аналізу ризику для подібного небезпечного виробничого об'єкту або аналогічних технічних пристроїв, вживаних на небезпечному виробничому об'єкті, то їх можна застосовувати як вихідну інформацію. Проте при цьому слід показати, що об'єкти і процеси подібні, а наявні відмінності не вноситимуть значних змін до результатів аналізу.

Цілі і завдання аналізу ризику можуть розрізнятися і конкретизуватися на різних етапах життєвого циклу небезпечного виробничого циклу.

На етапі розміщення (обґрунтування інвестицій або проведенні передпроектних робіт) або проектування небезпечного виробничого об'єкту метою аналізу ризику, як правило, є:

- виявлення небезпек і апріорна кількісна оцінка ризику з врахуванням дії уражуючих чинників аварії на персонал, населення, майно і природне довкілля;
- забезпечення обліку результатів при аналізі прийнятності запропонованих рішень і виборі оптимальних варіантів розміщення небезпечного виробничого об'єкту, вживаних технічних пристроїв, будівель і споруджень небезпечного виробничого об'єкту з врахуванням особливостей навколишньої місцевості, розташування інших об'єктів і економічної ефективності;
- забезпечення інформацією для розробки інструкцій, технологічного регламенту і планів ліквідації (локалізації) аварійних ситуацій на небезпечному виробничому об'єкті;
- оцінка альтернативних пропозицій по розміщенню небезпечного виробничого об'єкту або технічним рішенням.

На етапі експлуатації або реконструкції небезпечного виробничого об'єкту метою аналізу ризику може бути:

- перевірка відповідності умов експлуатації вимогам промислової безпеки;

- уточнення інформації про основні небезпеки і ризики (у тому числі при декларуванні промислової безпеки);
- розробка рекомендацій по організації діяльності наглядових органів;
- вдосконалення інструкцій з експлуатації і технічного обслуговування, планів ліквідації (локалізації) аварійних ситуацій на небезпечному виробничому об'єкті;
- оцінка ефекту зміни в організаційних структурах, прийомах практичної роботи і технічного обслуговування відносно вдосконалення системи управління промисловою безпекою.

Основні завдання етапу ідентифікації небезпек - виявлення і чіткий опис всіх джерел небезпек і путей (сценаріїв) їх реалізації. Це відповідальний етап аналізу, оскільки не виявлені на цьому етапі небезпеки не піддаються подальшому розгляду і зникають з поля зору. При ідентифікації слід визначити, які елементи, технічні пристрої, технологічні блоки або процеси в технологічній системі вимагають серйознішого аналізу і які представляють менший інтерес з точки зору безпеки.

Результатом ідентифікації небезпек є:

- перелік небажаних подій;
- опис джерел небезпеки, чинників ризику, умов виникнення і розвитку небажаних подій (наприклад, сценаріїв можливих аварій);
- попередні оцінки небезпеки і ризику.

Оцінка наслідків включає аналіз можливих дій на людей, майно і природне довкілля. Для оцінки наслідків необхідно оцінити фізичні ефекти небажаних подій (відмови, руйнування технічних пристроїв, будівель, споруд, пожежі, вибухи, викиди токсичних речовин і так далі), уточнити об'єкти, які можуть бути піддані небезпеці. При аналізі наслідків аварій необхідно використовувати моделі аварійних процесів і критерії поразки, руйнування об'єктів дії, що вивчаються, враховувати обмеження вживаних моделей. Слід також враховувати і, по можливості, виявити зв'язок масштабів наслідків з частотою їх виникнення.

Узагальнена оцінка ризику (або міра ризику) аварій повинна відображати стан промислової безпеки з врахуванням показників ризику від всіх небажаних подій, які можуть статися на небезпечному виробничому об'єкті, і ґрунтуватися на результатах:

- інтеграції показників ризику всіх небажаних подій (сценаріїв аварій) з врахуванням їх взаємного впливу;
- аналізу невизначеності і точності отриманих результатів;
- аналізу відповідності умов експлуатації вимогам промислової безпеки і критеріям прийнятності ризику.

При узагальненні оцінок ризику слід, по можливості, проаналізувати невизначеність і точність отриманих результатів. Є багато невизначеностей, пов'язаних з оцінкою ризику. Як правило, основними джерелами невизначеностей є неповнота інформації по надійності устаткування і людським помилкам, припущення, що приймаються, і допущення використовуваних моделей аварійного процесу. Щоб правильно інтерпретувати результати оцінки ризику, необхідно розуміти характер невизначеностей і їх причини. Джерела невизначеності слід ідентифікувати (наприклад, "людський чинник"), оцінити і представити в результатах.

Розробка рекомендацій по зменшенню ризику є завершальним етапом аналізу ризику. У рекомендаціях представляються обґрунтовані заходи по зменшенню ризику, що ґрунтуються на результатах оцінок ризику. Заходи по зменшенню ризику можуть мати технічний і (або) організаційний характер. У виборі типу міри вирішальне значення має загальна оцінка дієвості і надійності заходів, що роблять вплив на ризик, а також розмір витрат на їх реалізацію.

При розробці заходів по зменшенню ризику необхідно враховувати, що унаслідок можливої обмеженості ресурсів в першу чергу повинні розроблятися прості і пов'язані з найменшими витратами рекомендації, а також заходи на перспективу. В більшості випадків першочерговими заходами забезпечення безпеки, як правило, є заходи запобігання аварії. Вибір планованих для впровадження заходів безпеки має наступні пріоритети:

- заходи зменшення вірогідності виникнення аварійної ситуації, що включають:
  - заходи зменшення вірогідності виникнення інциденту;
  - заходи зменшення вірогідності переростання інциденту в аварійну ситуацію;
  - заходи зменшення важкості наслідків аварії, які, у свою чергу, мають наступні пріоритети:

а) заходи, що передбачаються при проектуванні небезпечного об'єкту (наприклад, вибір конструкцій, що несуть, замочної арматури);

б) заходи, що відносяться до систем протиаварійного захисту і контролю (наприклад, вживання газоаналізаторів);

в) заходи, що стосуються готовності експлуатуючої організації до локалізації і ліквідації наслідків аварій.

Для визначення пріоритетності виконання заходів по зменшенню ризику в умовах заданих засобів або обмеженості ресурсів слід:

– визначити сукупність заходів, які можуть бути реалізовані при заданих об'ємах фінансування;

– ранжирувати ці заходи по показнику "ефективність - витрати".

#### **Оцінка технічного стану небезпечних промислових об'єктів.**

Для оцінки технічного стану небезпечних промислових об'єктів застосовують оперативні показники ризику  $\rho$  і безпеки  $R_p$  [3, 4]:

$$\rho = 1 - R_p. \quad (1)$$

Вони також визначаються за допомогою імовірності безвідмовної роботи:

$$\rho = R^{-1} - 1. \quad (2)$$

У область практично цікавих рівнянь надійності, порядку 0.001 - 0.05, коли потрібно приймати рішення про продовження або припинення експлуатації об'єкту, для визначення ризику з помилкою не більше 5% можна використовувати формулу:

$$\rho = 1 - R. \quad (3)$$

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи може характеризувати як надійність, так і безпеку технічних систем.

З допомогою вірогіднісно-фізичних методів дослідження, можна провести аналіз надійності окремих структурних елементів технічної системи, що економніше, ніж її відробіток в цілому. Окрім цього, з'являється більше інформації про слабкі ланки системи.

Обчислення індексу безпеки для систем  $\beta\Sigma$  засноване на його зв'язку з ушкодженням, що відбивають поточний ризик експлуатації.

Враховуючи, що гарантований запас довговічності зворотно пропорційн гарантованому ушкодженню  $n_{Np} = a_p^{-1}$ , а індекс безпеки - його логарифм, то маємо:

$$\beta_p = -\lg a_p \text{ або } a_p = 10^{-\beta_p}.$$

$$\beta_{\Sigma p} = \lg \left( \sum U_{ij} \cdot 10^{-\beta_{ijp}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

де  $\beta_{ijp}$  – індекс безпеки  $i$  – го елемента для  $j$  – го процесу, що ушкоджує, отримані по функції розподіли ресурсу й наробітку для ймовірності  $P$ ;

$U_{ij}$  – рівень значимості обумовлений через відносну критичність відмови елемента системи.

#### **Аналіз відмов системи подачі дуття в конвертер.**

Проаналізувавши можливі причини виникнення аварійних ситуацій на ділянці конверторів можна виділити декілька причин пов'язаних з станом конструктивних елементів системи подачі дуття, такі як:

- Знос сопел наконечника фурми;
- Стан зварних з'єднань фурми;
- Стан елементів системи подачі охолоджувальної води;
- Стан виконуючих механізмів (лебідка вертикального переміщення фурми, механізм подачі фурми);
- Стан системи подачі кисню.

Постійно виникаючим фактором відмов системи подачі дуття в конвертер є знос сопел фурми, тому цьому параметру потрібно приділяти велику увагу. Інші фактори мають епізодичну природу і важко піддаються прогнозуванню. Для фактору зносу сопел фурми можна розробити дерево можливого розвитку аварійної ситуації в конверторному цеху (рис. 1).

Термін служби наконечників кисневих фурм для продувки конвертера обумовлений двома процесами, що ушкоджують: а) ростом наскрізної тріщини, що веде до витoku охолоджувальної води; б) розпалом сопла, що знижує ефективність плавки.

За результатами аналізу відмов (44 випадків за рік) апостеріорно були отримані фактичні функції розподілу довговічностей, які вимірялися числом плавок:

$$\left. \begin{aligned} \lg T_{cp} &= 2.27 \cdot (1 \pm u_p \cdot 0.126) - \text{для тріщин}, \\ \lg T_{wp} &= 2.78 \cdot (1 \pm u_p \cdot 0.047) - \text{для розпалу}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Згідно процедури «дерева відмов» (рис. 1) при розвитку ушкоджень збиток від аварій, внаслідок наскрізних тріщин був оцінений в 256 плавок, а збиток від розпалу сопел в 54 плавки. Тоді відносна вага збитку складе  $\pi_s=0,83$ ,  $\pi_w=0,17$ . Кількість видів відмов розподілилися нарівно  $s_s=s_w=0,5$ .



Рисунок 1 - Дерево можливого сценарію розвитку аварійної ситуації в конверторі

До початку експлуатації фурми з новим наконечником вихідні індекси безпеки становлять  $\beta_{s98}=1,69$ ,  $\beta_{w98}=2,52$ , що дає:

$$\beta_{\Sigma 98} = \lg(0.5 \cdot 0.17 \cdot 10^{-2.52} + 0.5 \cdot 0.83 \cdot 10^{-1.69}) = 2.06.$$

Відмітимо, що при  $U_{\Sigma}=U_w=1$   $\beta_{\Sigma 98}=1.63$ , який менше, ніж частки  $\beta_{s98}$  і  $\beta_{w98}$ . Таким чином, з рівнем безпеки  $R=0,98$  строк експлуатації наконечників даної конструкції становить  $102,06=115$  плавок.

### **Висновок**

Аналіз методів оцінки надійності складної технічної системи показав, що її некоректно здійснювати по показниках надійності окремих елементів або процесів, що ушкоджують. Ризик і безпеку механічної системи можливо оцінити за частними показниками ризику її елементів. Для цієї мети приведена відповідна методика, що оперує як ризиком, так і індексом безпеки, для системи подачі дуття в конвертер на прикладі такого фактору, як знос сопел фурми.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование. / А.Я. Жук, Г.П. Малышев, Н.К. Желябина, О.М. Клевцов – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2008. – 500 с.
2. Сценарное логико-вероятностное управление риском в бизнесе и технике. Изд. 2-е. – СПб.: Издательский дом «Бизнес-пресса», 2006, – 530 с.
3. Белодеденко С. В. Прогнозирование технического состояния и обеспечение безопасности при эксплуатации механических систем в металлургии/ С. В. Белодеденко, В. И. Гануш, С. В. Филиппенков, А. В. Попов // Вибрации машин: измерение, снижение, защита.- 2011.- №1.- С. 15 - 22.
4. Білодіденко С. В. Основи технічного обслуговування механічних систем за контролем безпеки/ С. В. Білодіденко, Г. М. Біліченко, В. І. Гануш, А. В. Попов // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту.- 2011. - спецви-пуск, ч. 1.-С. 170-178.

УДК 621.771

**О.М. Гречаний, Т.О. Васильченко, І.А. Шевченко, Ю.Г. Кобрін**  
**ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ПОЛОМОК**  
**ЕЛЕМЕНТІВ ПРОКАТНОГО СТАНУ З МЕТОЮ ЇХ**  
**ЗАПОБІГАННЯ**

*Анотація. Розглядаються фактори впливу бронзових вкладишів на надійність роботи й довговічність шпіндельних пристроїв. На підставі статистичних даних отримано закон розподілу наробітку до відмови та розроблена методика встановлення закону розподілу випадкових величин зношування бронзових вкладишів стану 1680. Це дозволить прогнозувати технічний стан вкладишів, та всіх деталей стану 1680 в цілому, протягом усього часу експлуатації, для виконання своєчасних ремонтних робіт.*

*Ключові слова: шпіндель, вкладиш, знос, закон розподілу випадкових величин.*

**Постановка проблеми**

Практика експлуатації універсальних шпінделів у приводах прокатних станів свідчить про недовговічність вкладишів шарнірів ковзання. Основною причиною частих періодичних поломок (або аварійних відмов) шпіндельних з'єднань є підвищений зазор у шарнірі через зношування бронзових вкладишів.[1]

Характер і швидкість зміни технічного стану обумовлені постійним впливом технологічних навантажень і зміною внутрішніх властивостей елементів устаткування, які носять випадковий (стохастичний) характер. Перераховані вище фактори безпосередньо впливає на зношування, фізичне старіння й міцність елементів устаткування, що приводить до порушення його працездатного стану, і як наслідок, до його відмови, а виходить, зупинці процесу виробництва, погіршуючи його технологічні й техніко-економічні показники. У зв'язку із цим, для підтримки устаткування в стані, відповідному до вимог нормативно-технічної й конструкторської документації, в умовах дії руйнуючих факторів, а також виключення й попередження його аварійних зупинок на металургійних підприємствах, крім



домінуючої функції виробництва, здійснюється спеціальна функція забезпечення працездатності, що включає в себе всі профілактичні й ремонтно-відбудовчі операції. Реалізація цієї функції здійснюється спеціальною системою, названою ремонтною службою підприємства, яка має свої цехові підрозділи.

До основних завдань, розв'язуваних ремонтною службою, відносяться:

- планування;
- підготовка;
- проведення ремонтних впливів.

Серед перерахованих завдань найбільш складним, внаслідок невизначеності, і відповідальним, з погляду впливу на ефективність виробництва, є завдання планування виконання завчасних ремонтних робіт. [2]

### Мета

Варіантом рішення проблеми планування виконання своєчасних ремонтних робіт – є встановлення закону розподілу випадкових величин, для поломок обладнання. Задача дослідження заключається у встановленні закону наробітку до відмови, за допомогою якого можливо було б розрахувати час початку ремонтних дій по заміні вкладишів. З цією метою провели математичну обробку даних отриманих в ході експлуатації бронзових вкладишів за період с 2008 по 2010 год на стані 1680 ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».

### Методика досліджень

На основі статистичних даних отриманих в ході експлуатації бронзових вкладишів за період з 2008 по 2010 рр складаємо інтервальний розподіл вибірки поломок вкладишів з кроком  $h=3$  доби (таблиця 1).

Таблиця 1

Інтервальний розподіл вибірки поломки вкладишів  
з кроком  $h=3$  доби

Інтервал ( $x_i; x_{i+1}$ ), діб	18ч21	21ч24	24ч27	27ч30	30ч33	33ч36	36ч39	39ч42
Кількість замін вкладишів в інтервалі, $n_i$	1	1	7	9	8	5	3	2

За отриманими значеннями інтервального розподілу вибірки (табл. 1) будуємо гістограму частот (рис.1), для чого на осі абсцис

відкладаємо часткові інтервали, на кожному з них будуємо прямокутники висотою:

$$\frac{n_i}{h}, \quad (1)$$

де  $n_i$  – частот варіантів  $i$ -го часткового інтервалу;

$h$  – крок (довжина інтервалу).

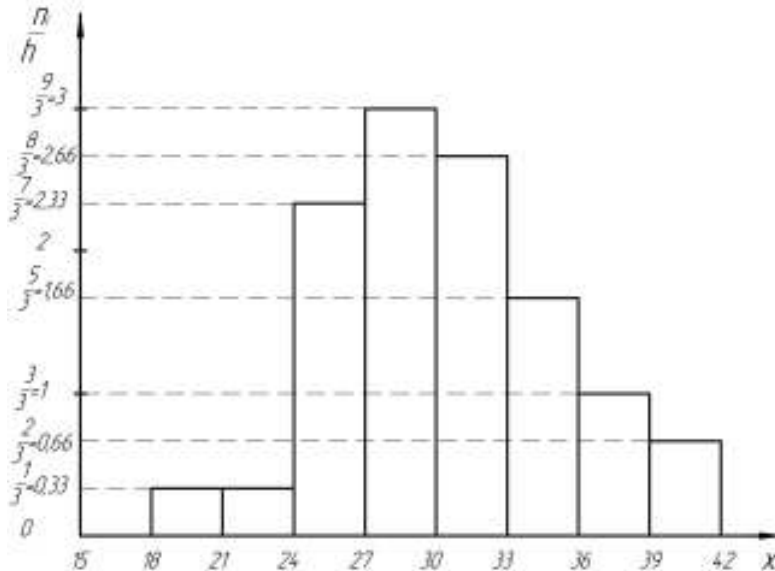


Рисунок 1 – Гістограма відносних частот

Виходячи з вигляду гістограми (рис. 1) можна припустити, що дана випадкова величина підпорядковується нормальному закону розподілу, який характерний для поступових відмов, викликаних зношуванням і старінням [3], але для остаточного підтвердження перевіримо висунуту нульову гіпотезу за допомогою критерію Пірсона при заданому рівні значущості  $\alpha=0,05$ .

Для обчислення теоретичних частот перетворимо знайдений інтервальний розподіл вибірки до дискретного вигляду за формулою:

$$x_i^* = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}, \quad (2)$$

Отримані значення зводимо в таблицю 2

Таблиця 2

Інтервальний розподіл вибірки з кроком  $h=3$  в дискретному вигляді

$x_i^*$ , діб	19,5	22,5	25,5	28,5	31,5	34,5	37,5	40,5
Кількість замін вкладишів в інтервалі, $n_i$	1	1	7	9	8	5	3	2

Згідно даних приведенних в таблиці 1 знаходимо вибірку середню для  $n=36$ :

$$\bar{x}_B = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^* \cdot n}{n}, \quad (3)$$

$$\bar{x}_B = \frac{(19,5 \cdot 1 + 22,5 \cdot 1 + 25,5 \cdot 7 + 28,5 \cdot 9 + 31,5 \cdot 8 + 34,5 \cdot 5 + 37,5 \cdot 3 + 40,5 \cdot 2)}{36} = 30,42$$

Вибіркову дисперсію знаходимо за формулою:

$$D_B = \overline{x_B^2} - (\bar{x}_B)^2, \quad (4)$$

$$D_B = \frac{(19,5^2 \cdot 1 + 22,5^2 \cdot 1 + 25,5 \cdot 7^2 + 28,5^2 \cdot 9) + (31,5^2 \cdot 8 + 34,5^2 \cdot 5 + 37,5^2 \cdot 3 + 40,5^2 \cdot 2)}{36} - 30,42^2 = 22,87$$

Звідки вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}, \quad (5)$$

$$\sigma_B = \sqrt{22,87} \approx 4,78$$

Знайдемо теоретичні частоти:

$$n'_i = n \cdot P_i, \quad (6)$$

де  $P_i = P(x_i < X < x_{i+1})$  – ймовірність того, що випадкова величина потрапить в  $i$ -й частковий інтервал  $(x_i; x_{i+1})$ .

Оскільки передбачуваний закон розподілу – нормальний, то

$$P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i),$$

де  $\Phi(z)$  – функція Лапласа, для спрощення розрахунків вибираємо з таблиці за розрахованими  $z_i, z_{i+1}$ , [5];

$z_i, z_{i+1}$  – обчислюються за формулами:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}_B}{\sigma_B}, \quad (7)$$

$$z_{i+1} = \frac{x_{i+1} - \bar{x}_B}{\sigma_B}, \quad (8)$$

Результати розрахунків зводимо в таблицю 3.

Таблиця 3

Результати розрахунків теоретичних частот

i	$x_i$	$x_{i+1}$	$z_i$	$z_{i+1}$	$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$P_i$	$n'_i$
1	18	21	-2,60	-1,97	-0,4953	-0,4756	0,0197	0,71
2	21	24	-1,97	-1,34	-0,4756	-0,4099	0,0657	2,37
3	24	27	-1,34	-0,72	-0,4099	-0,2642	0,1457	5,25
4	27	30	-0,72	-0,09	-0,2642	-0,0359	0,2283	8,22
5	30	33	-0,09	0,54	-0,0359	0,2054	0,2413	8,69
6	33	36	0,54	1,17	0,2054	0,3790	0,1736	6,25
7	36	39	1,17	1,80	0,3790	0,4641	0,0851	3,07
8	39	42	1,80	2,42	0,4641	0,4922	0,0281	1,02

Для порівняння емпіричних і теоретичних частот обчислюємо спостережуване значення критерію Пірсона:

$$\chi^2_{\text{спост}} = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, \quad (9)$$

Розраховані значення зводимо в таблицю 4

Таблиця 4

Результати розрахунків значень критерію Пірсона

i	$n_i$	$n'_i$	$ n_i - n'_i $	$(n_i - n'_i)^2$	$\frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}$
1	1	0,71	0,29	0,0841	0,118
2	1	2,37	1,37	1,8769	0,79
3	7	5,25	1,75	3,0625	0,583
4	9	8,22	0,78	0,6084	0,074
5	8	8,69	0,69	0,4761	0,055
6	5	6,25	1,25	1,5625	0,25
7	3	3,07	0,07	0,0049	0,0016
8	2	1,02	0,98	0,9604	0,942
$\Sigma$					$\chi^2_{\text{спост}}=2,81$

За таблицею критичних точок розподілу  $\chi^2$  [5], рівню значущості  $\alpha=0,05$  й числу ступенів свободи  $k=m-3=5-3=2$  знаходимо критичну точку правосторонньої критичної області  $\chi^2_{\text{кр}} = \chi^2(0,05; 2)=5,991$ .

Оскільки  $\chi^2_{\text{спост}}=2,81 < \chi^2_{\text{кр}}=5,991$ , то на рівні значущості  $\alpha=0,05$  нульова гіпотеза про нормальний розподіл генеральної сукупності приймається. Інакше кажучи, емпіричні та теоретичні частоти розрізняються не значуще.

Отже, виконані розрахунки остаточно підтвердили, що вихід з ладу вкладишів шпіндельних пристроїв підпорядковується нормальному закону розподілу випадкових величин, а значить можна розраховувати з надійністю  $\gamma=0,95$  довірчі інтервали для математичного сподівання поломки вкладишів шпінделів, котрі і будуть граничним часом виконання ремонтних робіт.

За значенням розрахованої по формулі (4) вибіркової дисперсії знаходимо виправлену вибірку дисперсію дорівнює:

$$s^2 = \frac{n}{n-1} D_B, \quad (10)$$

$$s^2 = \frac{36}{36-1} \cdot 22,87 = 23,52$$

Звідки виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення  $s$ :

$$s = \sqrt{23,52} \approx 4,85 \quad (11)$$

Т.я. відома вибіркова середня  $\bar{x}_B=30,42$  (3) та виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення  $s=4,85$ , то довірчі інтервали для математичного сподівання ознаки  $X$  генеральної сукупності відшукуються за допомогою розподілу Стюдента і мають вигляд:

$$\bar{x}_B - t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}} < a < \bar{x}_B + t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

де  $t_\gamma$  – коефіцієнт Стюдента, таблична величина для  $n=36$  та  $\gamma=0,95$   $t_\gamma=2,0281$

Отже отримаємо:

$$30,42 - \frac{2,0281 \cdot 4,85}{\sqrt{36}} < a < 30,42 + \frac{2,0281 \cdot 4,85}{\sqrt{36}}$$

$$28,78 < a < 32,01$$

Отже граничні межі виконання ремонтних робіт вкладишів шпіндельних пристроїв стану 1680 знаходяться в проміжку 28,78 – 32,01 доби, за початок виконання ремонтних впливів, рекомендовано прийняти нижню межу, що складає – 28,78 доби.

### Висновки

Встановлено закон розподілу випадкових величин, для поломки вкладишів шпіндельних пристроїв, який дозволяє прогнозувати початок виконання ремонтних робіт.

Розраховані довірчі інтервали для математичного сподівання поломки вкладиша з надійністю  $\gamma=0,95$ , що складають 28,78 – 32,01 доби і вказують на початок виконання ремонтних робіт по заміні вкладишів на 29 добу їх роботи.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Руденко В.И., Ошовская Е.В., Нижник Н.В. Обоснование рационального выбора конструкции шпиндельного соединения // Металлургические процессы и оборудование. - 2006. - № 1. - С. 28-32.
2. Ручко В.Н. Проблемы планирования ремонтов механического оборудования металлургических заводов // Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». - Наукові праці. - «Металургія». - 2008. - Випуск10(141), с. 299-309.
3. Жук А.Я., Малышев Г.П., Желябина Н.К., Клевцов О.М. Техническая диагностика. Контроль и прогнозирование. Монография. – Запорожье: Издательство государственной инженерной академии, 2008, - 500 с.
4. Плахтин В.Д. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин. – М.: металлургия, 1983 – 415 с.
5. Таблиці функцій та критичних точок розподілів. Розділи: Теорія ймовірностей. Математична статистика. Математичні методи в психології. / Укладач: М.М. Горонескуль. - Х.: УЦЗУ, 2009. - 90 с.

## РОЗРОБКА СЕМАНТИЧНОГО ФІЛЬТРУ НА ОСНОВІ ПЕРСОНАЛЬНИХ ВПОДОБАНЬ КОРИСТУВАЧА

*Анотація. У даній статті були досліджені проблеми сучасних рекомендаційних систем, методи надання рекомендацій, а також отримання релевантної інформації. Також були розглянуті технології штучного інтелекту, за допомогою яких можливо вирішити дані проблеми. В статті викладений один із варіантів вирішення проблеми рекомендацій стосовно новинного контенту комбінуючи інструменти семантичного порталу та інтелектуального сервісу Personality insights.*

*Ключові слова: Semantic WEB, IBM, TRUST, пошук, новини, об'єктивність.*

### Вступ

Завдяки сучасним технологіям стрімко збільшуються об'єми новинної інформації, яку отримують користувачі. Але чим більше інформації надходить, тим важче її обробляти та аналізувати, а тим паче знайти саме ту, що цікавить користувача. Крім того деякі сучасні держави вдаються до нечесної гри, беручи на озброєння мас-медіа, та розповсюджуючи за їх допомогою т.з. фейкові новини. Західні демократії вперше зіштовхнулися з таким явищем під час російської агресії на сході України та в Криму у 2014 року, коли величезна пропагандистська машина Кремля публікувала величезні об'єми неправдивої інформації стосовно подій у Криму, Україні та у країнах ЄС. Завдяки таким новинам можливо маніпулювати свідомістю громадян та впливати на демократичні процеси у західній спільноті, яка не була готова до боротьби з такою великою кількістю неправдивої або спотвореної новинної інформації.

Щоб знайти необхідну інформацію в мережі Інтернет, її треба проаналізувати, визначити пріоритети, відфільтрувати та відкинути зайве. Рекомендаційні системи вирішують цю проблему шляхом пошуку великого обсягу динамічної інформації, щоб забезпечити користувачам персоналізований контент та послуги. У даній роботі ми аналізуємо різні алгоритми формування рекомендацій та методи для

обчислення подібності вподобань користувачів, а також методи отримання інформації з цих систем. Ми запропонуємо новий підхід до надання рекомендацій користувачу та порівняємо його з вже існуючими методами та алгоритмами.

### **Еволюція рекомендаційних систем**

За останні двадцять років було проведено багато досліджень на тему як автоматично надавати рекомендації користувачу. За цей час було запропоновано багато різних методів та значно збільшився інтерес до рекомендаційних систем. Рекомендаційні системи повинні співпрацювати із користувачем, отримуючи точні дані, щоб встановити його вподобання, зменшити засміченість у наборах даних і надати рекомендації стосовно контенту. Одним із перших кроків по впровадженню рекомендаційних систем було створення комп'ютерного бібліотекаря «Grundy»[1]. Це була досить примітивна система, яка групувала користувачів у т.з. стереотипи на основі невеликого інтерв'ю користувача та застосовуючи інформацію стосовно вподобань кожного зі стереотипів, яка в свою чергу була завантажена до системи і надавала рекомендації користувачам.

Однією з перших була Tapestry[2] – полу-автоматична, система колаборативної фільтрації. Вона дозволяла користувачу робити запити до інформаційного домену, та надавала рекомендації за досвідом попередніх запитів або дій користувачів. Це потребувало зусиль зі сторони користувача, але завдяки цьому стало можливим використовувати досвід попередніх користувачів. Незабаром були розроблені нові системи сумісної фільтрації, які вже автоматично визначали відповідні думки та узагальнювали їх за для надання рекомендацій. Нова система GroupLens[3] використовувала цей метод для ідентифікації статей, які б могли бути цікаві конкретному користувачу. Користувачам було необхідно надавати рейтинги до кожної статті, далі ці рейтинги система поєднувала з рейтингами інших користувачів й надавала персоналізовані рекомендації.

Наприкінці 90 х років почали з'являтися перші комерційні рекомендаційні системи. Можливо найбільш популярною рекомендаційною системою є Amazon – система на підставі історії покупок та переглядів товарів надає користувачу відповідні рекомендації. Після цього рекомендаційні системи почали інтегрувати в системи електронної комерції, адже завдяки цим сис-

темам збільшувалися об'єми продажу товарів. Рекомендаційні системи знову привернули значну увагу у 2006 році, коли Netflix запропонував заохочувати користувачів за для поліпшення своєї рекомендаційної системи. Метою цього конкурсу було створення алгоритму рекомендацій, який міг би перевершити свій внутрішній алгоритм CineMatch в автономних тестах на 10%. Це викликало значне збільшення активності як в академічних колах, так і серед звичайних користувачів.

Сьогодні існує декілька варіантів вирішення питання надання рекомендацій стосовно контенту. У цій статті ми розглянемо два з них – колаборативна фільтрація та рекомендації на основі контенту:

Рекомендації від подібних користувачів (collaborative filtering) – система визначає на скільки схожий користувач з іншими користувачами із бази даних.

Контентні рекомендації (content-based filtering) – система за оцінками інших користувачів передбачає яку саме оцінку поставив би користувач, враховуючи тих користувачів або продукти які більш схожі на даний.

На рис.1 зображені різні типи рекомендаційних систем.

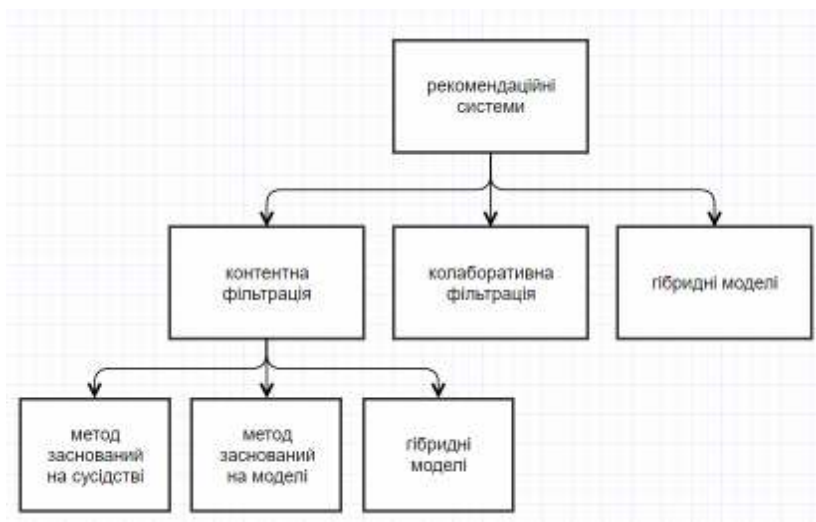


Рисунок 1

На початку 90х років за для вирішення питань з навантаженням в онлайн-просторах почали використовувати колаборативну фільтрацію. Основним припущенням цього методу є те, що думки інших користувачів можуть бути виділені та об'єднані таким чином, щоб забезпечити обґрунтоване прогнозування переваг активного користувача. Колаборативна фільтрація надає рекомендації, засновані



на моделі попередньої поведінки користувача. Ця модель може бути побудована виключно на основі поведінки певного користувача або з урахуванням поведінки інших користувачів зі схожими вподобаннями. У тих випадках коли колаборативна фільтрація бере до уваги поведінку інших користувачів вона використовує знання о цільових групах за для надання рекомендацій на підставі схожості поведінки і вподобань користувачів. Такі рекомендації базуються на автоматичній співпраці багатьох користувачів, які демонструють схожі вподобання або поведінку[4].

Існує два основних метода колаборативної фільтрації:

Заснований на сусідстві – для користувача підбирається група користувачів з найбільш схожими до нього вподобаннями, комбінуючи оцінки підгрупи система надає рекомендації.

Заснований на моделі – цей підхід надає рекомендації, визначаючи параметри статичних моделей за для оцінювання користувачів. Моделі можуть бути побудовані за допомогою байесових мереж, кластеризації и т.п.

Ці методи можуть бути поєднані за для отримання найбільш релевантного результату.

Підхід заснований на моделі є більш комплексним та надає більш точні рекомендації. Цей підхід більш ефективно обробляє великі набори даних, на відміну від методу заснованого на сусідстві. Недоліком цього підходу є необхідність компромісу між точністю моделі та її розміром.

Не зважаючи на всі переваги, у колаборативної фільтрації є низка недоліків та проблем:

Розрідженість даних: більшість комерційних, рекомендаційних проектів мають велику кількість товарів або послуг, користувачі не завжди мають змогу виставити їм оцінку. Через це матриця виходить досить великою та розрідженою.

Масштабованість: зі збільшенням кількості користувачів стає важче її обчислювати, також збільшується час на обробку, а деякі системи повинні швидко реагувати на запити користувачів.

Шахрайство: кожна людина може ставити гарні оцінки своїм улюбленим товарам і навпаки низькі – конкурентам. Це призводить до того, що деякі недобросовісні гравці можуть шахрайським методом

піднімати рейтинги своїм товарам, а інколи занижувати рейтинги конкурентів.

Контентна фільтрація формує рекомендацію на основі поведінки користувача. Цей метод може використовувати інформацію о переглядах або вподобаннях користувача накопичену за якийсь термін. Якщо користувач приділяє увагу до певних тематичних статей, видань, ресурсів, регулярно залишає коментарі під певними темами, виставляє рейтинги тощо, то контентна фільтрація використовує цю інформацію за для виявлення подібного контенту.

Контентна фільтрація має декілька переваг над колаборативною:

Незалежність користувачів: колаборативна фільтрація потребує рейтингу інших користувачів, щоб знайти подібність між користувачами, а потім надати рекомендації. Натомість метод, оснований на контенті, повинен лише аналізувати елементи та профіль користувача для рекомендації.

Прозорість: колаборативні методи надають рекомендації засновуючись на тому, що деякі користувачі мають вподобання схожі з вашими, а завдяки контентному методу користувач знає за якими характеристиками цей контент був запропонований.

Відсутній «швидкий старт»: на відміну від колаборативної фільтрації, контент може бути запропонований без попереднього збору інформації о вподобаннях користувачів.

З основних недоліків контентної фільтрації можливо виділити наступні:

Необхідність встановлювати зміст контенту.

Потреба у ручному або автоматичному індексуванні.

Необхідність встановлювати вподобання користувача, для цього необхідно витратити деякий час.

Інтуїтивна прозорливість – ефект при якому користувач випадково натрапляє на щось цікаве, у той час коли він шукав зовсім іншу за змістом інформацію [5].

На сьогодні існує декілька варіантів вирішення питання надання рекомендацій користувачу. Але колаборативна та контентна фільтрації, поодиночі, мають низку недоліків, тому у великих компаніях створюють гібридні моделі, які поєднують в собі декілька класичних рекомендаційних методів методів. Тому було вирішено

розробити свій персональний фільтр який би міг не тільки фільтрувати контент відповідно вподобанням користувача, а ще й аналізувати і робити висновок стосовно інформації, що надходить. За для аналізу інформації, що надходить ми вирішили використовувати інтелектуальний сервіс від IBM Watson – Personality Insights.

## **2. Застосування сервісу Personality Insights від IBM Watson**

IBM Watson це (когнітивна комп'ютерна система штучного інтелекту, яка здатна обробляти великі об'єми неструктурованих даних і відповідати на запитання, поставлені натуральною мовою, система здатна навчатися, розуміти та робити висновки.) проект, що представляє собою когнітивну систему, яка може навчатися, розуміти та робити висновки. Одним із інтелектуальних сервісів системи IBM Watson є Personality Insights, доступ до якого надається в хмарному середовищі. Сервіс Personality Insights використовує лінгвістичну аналітику, щоб визначити характеристики особистості, внутрішні потреби та цінності людей. Система аналізує публікації автора, ті які користувач вирішує зробити публічними, електронна пошта, текстові повідомлення, соціальні медіа, публікації на форумах, блогах тощо. Спочатку сервіс розмічає текст для створення представлення у n-мірному просторі. Сервіс використовує технологію word-embedding, з відкритим вихідним кодом, для того щоб отримати векторне представлення для усіх слів з тексту. Далі Personality Insights передає це представлення алгоритму машинного навчання, який описує профіль особистості із його характеристиками. Для навчання алгоритму сервіс використовує оцінки, отримані з опитувань, проведених серед тисяч користувачів, а також їх акаунтів соціальної мережі twitter.

Характеристики особистості, потреб та цінностей, використані у Personality Insights, допомагають компаніям краще зрозуміти своїх клієнтів та покращити рівень задоволеності клієнтів, передбачаючи потреби клієнтів та рекомендуючи майбутні дії. Це дозволяє підприємствам покращувати нові придбання, збереження та залучення клієнтів, а також зміцнювати їх відносини з існуючими клієнтами [6]. Цей сервіс може бути також використаний для аналізу публікації з висновками за трьома видами опису особистості, які зображені на Рисунок 2:

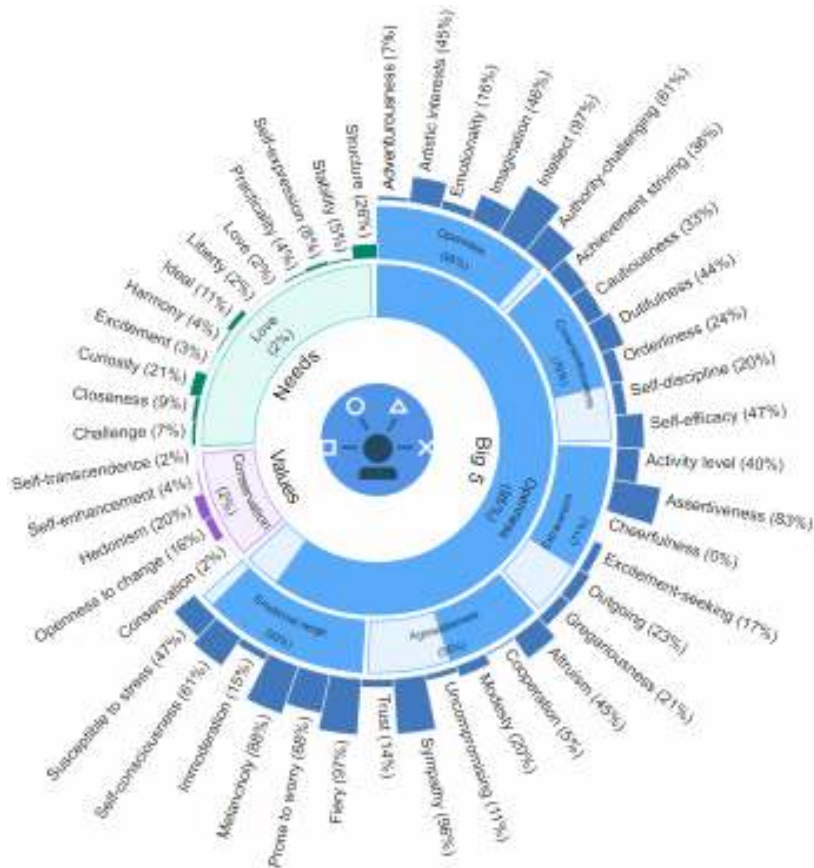


Рисунок 2

Характеристика особистості: сервіс може побудувати портрет особистості та визначити, як він взаємодіє із світом за п'ятьма основними характеристиками: відкритість, сумлінність, екстраверсія, агресивність і невротизм.

Потреби: сервіс може вивести певні аспекти продукту, який буде резонувати з індивідумом за дванадцятьма потребами: хвилювання, гармонія, цікавість, ідеал, близькість, самовираження, свобода, любов, практичність, стабільність, виклики та структура.

Цінності: сервіс може визначити цінності, які описують мотиваційні чинники, що впливають на прийняття рішень людиною за п'ятьма вимірами: трансцендентність або допомога іншим, збереження традицій, гедонізм або насолода життям, самовдосконалення або досягнення успіху та відкритість для змін. Таким чином, сервіс виводить з соціальних медіа, де зберігається неоднорідна та не структурована інформація, психологічні портрети людей, що відображають їх особистості [7].

### 3. Розробка персонального новинного фільтру

Другою складовою нашого методу, яким ми пропонуємо вирішувати проблему надання рекомендацій, щодо новинного контенту, є модернізація веб-системи, яка здатна накопичувати новинний контент та його мета-опис, який характеризує автора статті. Такою веб-системою є онтологічний портал оцінки якості вищої освіти в Україні – портал, який був розроблений в міжнародному проекті Tempus «Національна система забезпечення якості і взаємної довіри в системі вищої освіти (TRUST)» як технічний засіб підтримки і гармонізації процесів з оцінки і забезпечення якості вищої освіти. Для побудови порталу використана технологія за стандартами Semantic Web. Портал розгортається автоматично, використовуючи знання про галузь освіти і науки та про особливості власного функціонування і інтерфейсу, що зберігаються в двох онтологіях доменній і сервісній. Портал надає можливість накопичувати факти, які описують ресурси предметної галузі, і аналітично обробляти їх, що забезпечує можливість прозорого та неупередженого контролю за якістю внутрішніх процесів, заснованих на оцінці ресурсів.

Подібні системи посилюють соціальний вплив на оцінку інформації та унеможливають контроль за нею лише зацікавленою стороною. Для цього подібні системи будуються за принципами соціальних мереж. Користувачі порталу є головними контролерами достовірності зареєстрованих фактів завдяки механізму соціальної верифікації. Для оцінювання ресурсів портал дозволяє створювати і застосовувати різні системи цінностей у вигляді гнучких багатовимірних показників якості, зважених за ступенем їх важливості для ранжування запиту оцінки. Таким чином, кожен користувач може оцінити якість ресурсів з різних точок зору, так званих «систем цінностей».

Інформація, що використовується для опису архітектури та функціональності порталу, представлена у онтологічному вигляді (в сервісній онтології). Гнучкість порталу забезпечується за рахунок розподілу його архітектури та функціоналу на дві онтології – доменну та сервісну. Доменна онтологія відповідає за поняття і властивості, які використовуються для опису предметної галузі. Таким чином, модифікуючи доменну онтологію, ми можемо повністю змінити предметну галузь порталу. Сервісна онтологія

використовується в якості незалежної допоміжної структури та для гнучкої взаємодії з доменною онтологією. Вносити будь які зміни до сервісної онтології не потрібно [8].

За для використання порталу у предметній області «новини» ми реконфігурували домену онтологію відповідно до нових вимог. Кореневим класом створеної онтології є «стаття», який має низку властивостей, зображених на мал.2, які характеризують особистість автора. Ці властивості є основними логічними розділами сервісу Personality Insights від IBM Watson, які включають в себе більш детальні характеристики – властивості, зображені на Мал.3, для опису індивідуальності автора статті.

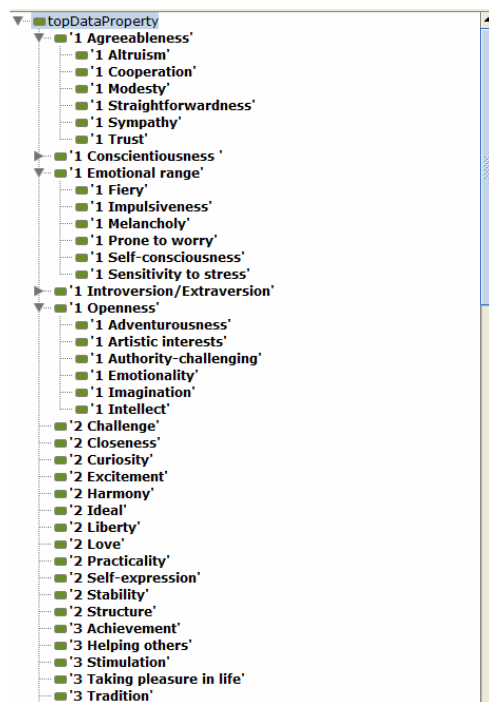


Рисунок 3

Таким чином, спираючись на властивості сервісу Personality Insights користувач, знаходячись в своєму особистому просторі, може створювати свої системи цінностей, встановлюючи вагові коефіцієнти відповідно до своїх вподобань. За для подальшої фільтрації публікацій ЗМІ ми повинні надати кожній статті рейтинг за допомогою зовнішніх експертів. У якості зовнішнього експерта ми використовуємо сервіс Personality Insights. Цей сервіс надає зручний API, що спрощує його розгортання та інтеграцію до будь-яких веб-систем. Сервіс аналізує та надає вагові коефіцієнти характеристикам статті, які зображені на Рисунок 4.



Рисунок 4

Далі користувач отримує відфільтрований, згідно із попередньо створеною системою цінностей, контент. Розробивши декілька таких систем цінностей користувач зможе отримувати контент який відповідає тільки його вподобанням або переконанням. Наприклад, з ранку користувачу потрібні новини практичність яких не була б нижчою за 90%, а ввечері він хоче отримувати емоційні новини але тільки приємні, в яких процент позитиву не менш ніж 85%. Завдяки цьому утворюються додаткові умови для проходження статей крізь фільтри користувачів, це повинно стимулювати авторів за для поліпшення якості написання новинного контенту. Таким чином, комбінуючи інструменти порталу та інтелектуального сервісу Personality Insights, ми можемо аналізувати і згодом фільтрувати новинний контент за нашими вподобаннями.

### Висновки

Проаналізувавши існуючі методи надання рекомендацій ми встановили, що вони мають низку недоліків, які ускладнюють надання рекомендацій користувачам. Існуючі системи, в своїй більшості, використовуються в комерційних проектах та мають закритий код, що унеможливує їх використання або модернізацію за для використання їх у інших галузях. Ми виявили, що рекомендаційні системи надають більш релевантні рекомендації, якщо вони працюють з однією предметною областю та засновані на гібридних моделях фільтрації. Тобто поєднання різних методів фільтрації в одній системі поліпшує якість наданих рекомендацій.

Організація рекомендаційної системи у вигляді соціальної мережі, де користувачі зможуть викладати та ділитися своїми системами цінностей, повинно сприяти поліпшенню якості написання но-

винного контенту. Залучення широких мас до фільтрації новинного контенту ускладнить масове розповсюдження фейкових новин. У подальшому планується провести порівняльний аналіз фейкових та правдивих новин, задля встановлення спільних рис всіх фейкових новин або певні фундаментальні розбіжності. Це допоможе у майбутньому встановлювати правдивість новини.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. E. Rich, "User modeling via stereotypes," *Cognitive Science*, vol. 3, no. 4, pp. 329–354, October 1979.
2. D. Goldberg, D. Nichols, B. M. Oki, and D. Terry, "Using collaborative filtering to weave an information tapestry," *Communications of the ACM*, vol. 35, no. 12, pp. 61–70, 1992.
3. P. Resnick, N. Iacovou, M. Suchak, P. Bergstrom, and J. Riedl, "GroupLens: an open architecture for collaborative filtering of netnews," in *ACM CSCW '94*, pp. 175–186, ACM, 1994.
4. G. Adomavicius, A. Tuzhilin Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions, In: *Knowledge and Data Engineering*, IEEE Transactions on, Vol. 17, No. 6. (2005), pp. 734-749
5. Recommender Systems through Collaborative Filtering [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://blog.dominodatalab.com/recommender-systems-collaborative-filtering/>
6. Personality Insights, documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://console.bluemix.net/docs/services/personality-insights/getting-started.html#getting-started-tutorial>
7. The science behind the service [Електронний ресурс]. – Режим доступу:  
<https://console.bluemix.net/docs/services/personality-insights/science.html#science>
8. Terziyan V., Golovianko M., Shevchenko O., Semantic Portal as a Tool for Structural Reform of the Ukrainian Educational System, In: *Information Technology for Development*, Vol. 21, No. 3, 2015, Taylor & Francis, pp. 381-402.



А.И. Федорович

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЭНТРОПИЙНЫХ ВЫБОРОК СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

*Аннотация. Проведен анализ возможности классификации многопараметрических объектов с использованием энтропийных преобразований. Исследовано влияние объема исходных данных на достоверность принятия решений о классе объекта контроля, а также влияние на ошибки априорных знаний об анализируемом объекте.*

*Ключевые слова: выборка измерений, энтропийные преобразования, классификация объектов, эффективность распознавания.*

### Постановка задачи

В настоящее время научная деятельность в технике, медицине, биологии, физики и других областях тесно связана с обработкой и анализом массивов данных, которые содержат информацию об объектах предметной области.

Рассмотрим подход к возможности классификации множества многопараметрических объектов, который предназначена для выявления структурных особенностей в значениях характеристик элементов исследуемых множеств.

Цель исследования – анализ эталонных выборок энтропийных преобразований и оценка работоспособности метода классификации многопараметрических объектов по экспериментальным измерениям.

### Вычислительные эксперименты

Задачу оценки потенциальных возможностей классификации можно решить путем проведения вычислительных экспериментов.

Введем следующие обозначения для упрощения записи законов распределения  $z_1 = \frac{x_1 - a_1}{\sqrt{D_1}}$ ,  $z_2 = \frac{x_2 - a_2}{\sqrt{D_2}}$ ,  $z_3 = \frac{x_3 - a_3}{\sqrt{D_3}}$ , и их корреляци-

онные зависимости  $A_{11} = 1 - r_{23}^2$ ,  $A_{22} = 1 - r_{13}^2$ ,  $A_{33} = 1 - r_{12}^2$ ,  $A_{12} = r_{12} - r_{13}r_{23}$ ,  $A_{13} = r_{13} - r_{12}r_{23}$ ,  $A_{23} = r_{23} - r_{12}r_{13}$ . В этом случае случай-

ные величины  $z_1, z_2, z_3$  имеют нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию, а их трехмерный закон распределения вероятностей запишется в виде

$$W(z_1 z_2 z_3) = \frac{\exp \left[ -\frac{A_{11} z_1^2 + A_{22} z_2^2 + A_{33} z_3^2 - 2A_{12} z_1 z_2 - 2A_{13} z_1 z_3 - 2A_{23} z_2 z_3}{2(1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12} r_{13} r_{23})} \right]}{\sqrt{(2\pi)^3 (1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12} r_{13} r_{23})}}.$$

Условные математические ожидания и дисперсии равны

$$M[z_1] = 0, \quad M\left[\frac{z_2}{z_1}\right] = r_{12} z_1, \quad M\left[\frac{z_3}{z_1 z_2}\right] = \frac{r_{13} - r_{12} r_{23}}{1 - r_{12}^2} z_1 + \frac{r_{23} - r_{12} r_{13}}{1 - r_{12}^2} z_2, \\ D[z_1] = 1, \quad D\left[\frac{z_2}{z_1}\right] = 1 - r_{12}^2, \quad D\left[\frac{z_3}{z_1 z_2}\right] = 1 - \frac{r_{13}^2 + r_{23}^2 - 2r_{12} r_{23} r_{13}}{1 - r_{12}^2}.$$

Эти знания позволяют формировать трехмерные выборки случайных величин для проведения вычислительных экспериментов. Если  $z_1 = \xi_1$ ,  $z_2 = r_{12} \xi_1 + \sqrt{1 - r_{12}^2} \xi_2$ ,  $z_3 = b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 \xi_3$ , где  $\xi_i$  – нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией ( $i = 1, 2, 3$ ). Коэффициенты  $b_1, b_2, b_3$  определим из системы уравнений

$$\begin{cases} r_{13} = b_1 + b_2 r_{12}, \\ r_{23} = b_1 r_{12} + b_2, \\ 1 = b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + 2b_1 b_2 r_{12}. \end{cases} \quad (1)$$

Решив систему уравнений (1) получим коэффициенты

$$b_1 = \frac{r_{13} - r_{12} r_{23}}{1 - r_{12}^2}, \quad b_2 = \frac{r_{23} - r_{12} r_{13}}{1 - r_{12}^2}, \\ b_3^2 = 1 - \left[ \left[ \frac{r_{12} (r_{13} - r_{23} r_{12})}{1 - r_{12}^2} + \frac{r_{23} - r_{13} r_{12}}{1 - r_{12}^2} \right]^2 + \left[ \frac{r_{13} - r_{12} r_{23}}{\sqrt{1 - r_{12}^2}} \right]^2 \right].$$

Проведем учебный вычислительный эксперимент, чтобы получить информацию о различиях соответствующих энтропийных преобразований, их гистограммы, минимальные, максимальные и средние значения ( $M^*$ ), выборочные дисперсии ( $D^*$ ) и коэффициенты вариации и размахов. Если коэффициент вариации – это отношение  $k_v = \sqrt{D^*} / M^*$ , то коэффициент размаха –  $k_p = (L_{\max} - L_{\min}) / \sqrt{D^*}$ . Счи-

тая параметры трех эталонных гауссовых выборок измерений известными (см. таблицу 1) определим их идеальный энтропийный преобразователь  $L_s(x_1(k), x_2(k), x_3(k))$ .

Таблица 1

Параметры эталонного энтропийного преобразователя

Параметры	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{23}$
Эталон	10	20	30	1	2	3	0,8	0,8	0,8

$$L_1(x_1(k), x_2(k), x_3(k)) = \frac{1}{2} \ln \left[ (2\pi)^3 (1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12}r_{13}r_{23}) D_{11}^* D_{12}^* D_{13}^* \right] +$$

$$+ \left( \frac{A_{11}x_1^2 + A_{22}x_2^2 + A_{33}x_3^2 - 2A_{12}x_1x_2 - 2A_{13}x_1x_3 - 2A_{23}x_2x_3}{2(1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12}r_{13}r_{23})} \right) \quad (2)$$

где  $x_1(k) = a_{11} + \sqrt{D_{11}}z_1$ ,  $x_2(k) = a_{12} + \sqrt{D_{12}}z_2$ ,  $x_3(k) = a_{13} + \sqrt{D_{13}}z_3$ .

Используя критерий сравнения  $W(m)$  выделим из нее те, которые относятся к первому классу

$$R^* \left( \frac{m}{1} \right) = \text{sgn}(W_0 - W(m)), \quad (3)$$

где  $\text{sgn}(x)$  – функция единичного скачка;  $W_0$  – пороговое значение критерия сравнения. В качестве критерия сравнения, можно использовать комплексный критерий непараметрической статистики – Буша-Винда.

Очевидно, что их относительное число может служить оценкой технологии производства этих объектов

$$P_{11}^* = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \text{sgn}(W_0 - W(m)). \quad (4)$$

Сформируем по двадцать трехпараметрических выборок измерений с объемом  $n$ , имея в распоряжении параметры  $(a_{11}, a_{12}, a_{13}, D_{11}, D_{12}, D_{13}, r_{12}, r_{13}, r_{23} \text{ и } a_{21}, a_{22}, a_{23}, D_{21}, D_{22}, D_{23}, r_{21}, r_{31}, r_{32})$ . Выберем три первых из них и оценим их параметры, например  $a_{11}^*, a_{12}^*, a_{13}^*, D_{11}^*, D_{12}^*, D_{13}^*, r_{12}^*, r_{13}^*, r_{23}^*$  и сформируем энтропийный преобразователь объектов первой класса по формуле (2).

Эксперимент 1. Цель эксперимента – исследование эталонных выборок энтропийных преобразований. В этом случае предполагается, что эталонный преобразователь сформирован с параметрами  $a_{11}^* a_{12}^*$ ,

$a_{13}, D_{11}, D_{12}, D_{13}, r_{12}, r_{13}, r_{23}$ , создаются достаточно длинные эталонные выборки энтропийного преобразования, строится гистограмма и оценки статистических показателей для случаев энтропийных преобразователей по известным параметрам измерительных выборок и оценками этих параметров.

В результате проведения этого эксперимента получено гистограмму энтропийного преобразователя (2) ( $n = 2000$ ), которая изображена на рисунке 1, при значениях параметров  $a_{11} = 0, a_{12} = 0, a_{13} = 0, D_{11} = 1, D_{12} = 1, D_{13} = 1, r_{12} = 0, r_{13} = 0, r_{23} = 0$ .

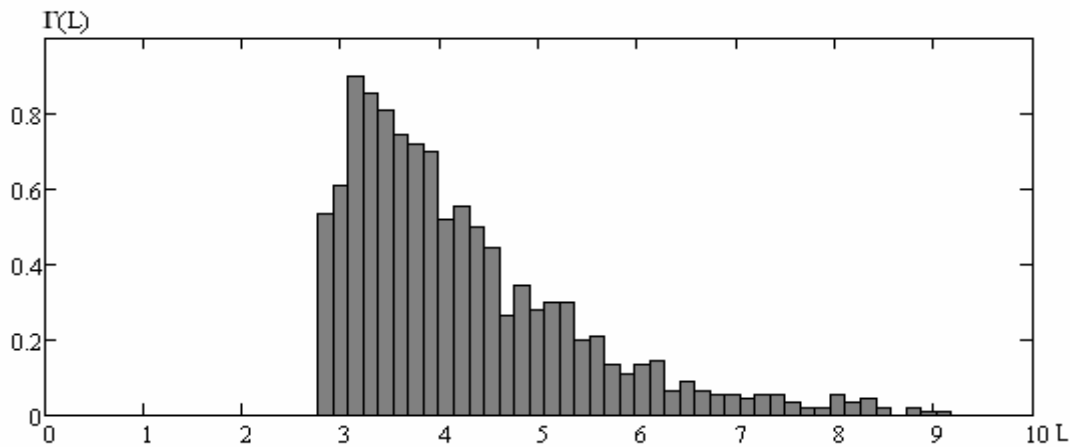


Рисунок 1 - Гистограмма энтропийного преобразователя ( $\bar{L}^* = 4,245$ ,  $\sqrt{D^*[L]} = 1,22$ ,  $L_{\min} = 2,763$ ,  $L_{\max} = 10,385$ ,  $k_v = 0,287$ ,  $k_r = 6,252$ )

Проверим выбранное значение подав на энтропийный преобразователь (2) двадцать трехмерных нормальных выборок с параметрами  $a_{11} = 0, a_{12} = 0, a_{13} = 0, D_{11} = 1, D_{12} = 1, D_{13} = 1, r_{12} = 0, r_{13} = 0, r_{23} = 0$ , длиной  $n = 50$ , и оценим по формуле (3) эффективность распознавания классов объекта контроля по сложившемуся правилу. В результате получим вероятность  $P \geq 0,949$ , не противоречащей выбранной вероятности принятия правильных решений.

Для проверки экспериментального преобразователя воспользуемся теми же условиями, но вероятность принятия правильного решения относительно класса объекта контроля оценивать по формуле (4). В этом случае получим  $P^* \geq 0,926$ . То есть отсутствие информации о параметрах входных данных увеличивает вероятность принятия ошибочного решения относительно класса объекта контроля на 2,3%.

Эксперимент 2. Цель – оценка работоспособности метода классификации многопараметрических объектов по экспериментальным измерениям.

Сформируем аналогично формуле (2) преобразователи для второго и третьего классов случайных величин и с их помощью классифицируем двадцать объектов контроля каждого из указанных классов. Объекты контроля описываются трехмерными выборками нормальных случайных величин. Параметры первого класса:  $a_{11} = 0$ ,  $a_{12} = 0$ ,  $a_{13} = 0$ ,  $D_{11} = 1$ ,  $D_{12} = 1$ ,  $r_{12} = 0,7$ ,  $r_{13} = 0,8$ ,  $r_{23} = 0,9$ . Параметры второго класса:  $a_{21} = 0$ ,  $a_{22} = 0$ ,  $a_{23} = 0$ ,  $D_{21} = 1$ ,  $D_{22} = 1$ ,  $D_{23} = 1$ ,  $r_{12} = 0$ ,  $r_{13} = 0$ ,  $r_{23} = 0$ , есть разница между первым и вторым классами заключается в наличии или отсутствии корреляции между измерительными параметрами. Параметры третьего класса:  $a_{31} = 1$ ,  $a_{32} = 1$ ,  $a_{33} = 1$ ,  $D_{31} = 2$ ,  $D_{32} = 2$ ,  $D_{33} = 2$ ,  $r_{12} = 0,9$ ,  $r_{13} = 0,7$ ,  $r_{23} = 0,8$ . Изделия, попавшие в третий класс существенно отличаются от изделий первого и второго классов по всем показателям.

Результат классификации представим в виде таблицы 2. Поскольку в этом вычислительном эксперименте речь идет о потенциальных возможностях классификации, то объем выборок измерений исследуемых выберем  $n = 2000$ , а параметры, формирующие энтропийные преобразователи, считать известными. Итак, согласно классификации с помощью энтропийных преобразований имеем:

Таблица 2

Количество объектов каждого класса

	Класс 1	Класс 2	Класс 3
Энтропийный преобразователь 1 класса	19	1	0
Энтропийный преобразователь 2 класса	2	17	1
Энтропийный преобразователь 3 класса	1	2	17

По данным таблицы 2 можно утверждать, что предложенный метод классификации работоспособен. При его использовании ошибки второго рода не превышают 7%. Это дает право рекомендовать его для использования при решении задач дефектоскопии.

Оценим влияние ограничения объема измерений и неизвестность точных значений параметров измерений на эффективность принятия решений контроля. Для этого по указанным в вычислительном эксперименте 1 параметрами объекта контроля сформируем выборки измерений объемом  $n = 25$ ,  $n = 50$ ,  $n = 100$ . Данные эксперимента сведены в таблице 3.

Вероятности принятия правильных решений  
о классе «нормы» объекта контроля

Вероятность вычисленная по точным параметрам объекта контроля			Вероятность вычисленная по оценкам параметров объекта контроля		
n=25	n=50	n=100	n=25	n=50	n=100
0,902	0,978	0,989	0,873	0,972	0,981

По данным таблицы 3 можно сделать вывод, что при объеме выборок измерений объектов контроля  $n \leq 25$ , вероятность принятия правильного решения уменьшается, а при объемах измерений  $n \geq 50$  отсутствие точной информации относительно значений параметров входных данных практически не влияет на качество классификации по энтропийным преобразователем трехмерных случайных величин.

### Выводы

В задачах классификации множества объектов контроля, при отсутствии выборок измерений эталонных образцов, использование энтропийных преобразований позволит не только повысить достоверность принимаемых решений, но и проводить сравнительный анализ измерений контролируемых параметров, и оценить их причинно-следственные связи. Кроме этого, проведенный анализ объема измерений, дает возможность оценить достоверность принимаемых решений. При этом построенные на основе рассмотренных методов решающие правила могут адаптироваться и уточняться в процессе проведения неразрушающего контроля и накопления данных об объектах, контролируемых.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика / А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2006. – 816 с.
2. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
3. Куренков Н. И. Энтропийный подход к решению задач классификации многомерных данных / Н. И. Куренков, С. Н. Ананьев // Ежемесячный теоретический и прикладной научно-технический журнал «Информационные технологии». – М.: «Новые технологии», 2006. – № 8. – С. 50-55.
4. Jenssen R. An Information Theoretic Approach to Machine Learning : Diss. for the Deg. of Dr. Scientiarum / R. Jenssen ; Department of Physics University of Tromso. – Tromso, 2005. – 179 p.
5. Xu Rui. Survey of clustering algorithms / Rui Xu, D. Wunsch II // IEEE Transactions on Neural Networks. – 2005. – V. 16, № 3. – P. 645.
6. Бабак В. П. Теоретические основы информационно-измерительных систем: Учебник / В. П. Бабак, С. В. Бабак, В. С. Ерёменко. – К. : ТОВ «Софія-А», 2014. – 832 с.
7. Fedorovich A. Classification of facilities multi parameters experimental measurements of their parameters / A. Fedorovich // European science review. – 2015. – № 7-8 July-August. – P. 140-142.

## АНАЛІЗ ЯКОСТІ СЕРЕДНЬОЇ ОСВІТИ

*Анотація. В рамках освітнього контексту ключовою метою є оцінка придбаних навичок учнів і кластеризація студентів відповідно до їх рівня здібностей. У зв'язку з цим необхідно враховувати відповідний елемент, з якого випливає можливий вплив на школярів. З цією метою надано методологічний інструмент, який враховує багаторівневу структуру даних (тобто учнів в школах) відповідним чином. Такий підхід дозволяє згрупувати як учнів, так і школи в однорідні класи здібностей і ефективності, а також оцінити вплив певних характеристик учнів і шкіл на ймовірність приналежності до таких класів.*

*Ключові слова: Ет-алгоритм, irt, багаторівневі моделі відповідей, двопараметрична логістична модель, ЗНО.*

**Вступ.** Класичною моделлю для профілів запитань (ймовірність респондента з рівнем знань  $\theta_i$  правильної відповіді на запитання зі складністю не вище за  $\beta_j$ ) вважають двопараметричну модель Бірнбаума:

$$P(\theta_i, \beta_j) = \frac{e^{D \cdot a_j (\theta_i - \beta_j)}}{1 + e^{D \cdot a_j (\theta_i - \beta_j)'}}$$

де  $D = 1.7$  константа,  $a_j$  - коефіцієнт дискримінації (item discrimination parameter), що визначає нахил характеристичної кривої.

Будемо вважати, що  $\theta$  і  $\beta$  в процесі експерименту (тестування) залишаються незмінними, тоді можливо знайти оцінки ймовірностей, які пов'язані з  $\theta$  і  $\beta$ . Припустимо, що результат відповіді  $i$ -го респондента на  $j$ -е завдання дорівнює  $r_{i,j}$ , де  $r_{i,j} = 1$ , якщо відповідь вірна (можна використовувати зважену оцінку  $r_{i,j} > 0$ ), у зворотному випадку, дорівнює 0. Тоді оцінка рівня знань респондента дорівнює:

$$\bar{\theta}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M r_{i,j},$$

а оцінка рівня складності завдання тесту дорівнює:

$$\bar{\beta}_i = 1 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{i,j},$$

де  $M$  — кількість завдань тесту,  $N$  — кількість респондентів.

Респондент з більш високим рівнем знань відповідає вірно на завдання з ймовірністю не менше ніж респондент з нижчим рівнем знань, отже, маємо:

$$P(\theta_i) \geq P(\theta_k), \text{ якщо } \theta_i > \theta_k$$

Ми бачимо, що залежність  $P(\theta_i)$  має неспадаючий характер для фіксованого рівня складності запитання  $\beta$ . Тобто,  $P(\theta_i, \beta)$  є характеристичним профілем завдання. Виходячи з цього,  $P(\theta_i, \beta)$  є кумулятивною кривою ймовірностей, кожна точка якої відповідає ймовірності того, що респондент із рівнем знань не більшим за  $\theta$  дає правильну відповідь на запитання з рівнем складності  $\beta$ . Таким чином, оцінки характеристичної кривої запитання визначаються як:

$$P_j(\theta) = \frac{1}{N} \sum \{r_{i,j} | \theta_i \leq \theta\}.$$

Оскільки ми маємо лише множину з  $N$  оцінок  $\theta$ , то отримуємо  $N$  емпіричних точок

$$\bar{P}_j(\theta_k) = \frac{1}{N} \sum \{r_{i,j} | \theta_i \leq \theta_k\}, k = 1, \dots, N.$$

Дані зовнішнього незалежного оцінювання (ЗНО).

Для аналізу було взято результати основної сесії ЗНО 2017 року з урахуванням різних показників. База містить деперсоніфіковані дані всіх учасників тестування.

Результати за шкалою 0-200 балів за найпопулярнішими предметами: Українська мова та література, Історія України, Математика, Фізика, Англійська мова.

Завдання на ЗНО різного типу – множинний вибір, відкриті питання, питання на відповідність тощо.

Попередні аналізи показують, що результати дуже різняться в залежності від статі учнів, географічного положення та виду навчального закладу. Наприклад, в цілому, частина учнів з міст виконала тестування успішніше, ніж із сел.



Середній показник по типу території і географічної області  
для п'яти вимірів тестів ЗНО

	Українська мова та література		Історія України		Математика		Фізика		Англійська мова	
	Місто	Село	Місто	Село	Місто	Село	Місто	Село	Місто	Село
Вінницька область	142.3	120.3	126.1	108.9	123.3	95.7	110.7	83.8	125.8	99.8
Волинська область	148.6	120.2	129.5	104.6	135.9	103.7	120.3	95.1	137.1	118.2
Дніпропетровська область	139.7	114.0	122.4	100.6	121.9	86.3	108.7	79.4	119.6	89.3
Донецька область	138.0	118.0	121.5	99.9	116.5	83.3	100.4	76.8	115.1	93.1
Житомирська область	143.9	113.5	126.5	103.5	120.1	83.4	110.0	71.7	129.1	91.3
Закарпатська область	125.9	80.6	104.3	70.1	127.8	76.7	115.7	70.4	125.0	81.9
Запорізька область	137.6	113.2	121.4	102.8	120.9	84.1	101.1	71.3	123.5	76.8
Івано-Франківська область	145.0	114.4	125.8	98.0	136.1	104.6	121.3	95.7	135.6	102.8
Київська область	143.7	125.1	125.6	109.9	126.4	102.3	114.3	97.0	123.7	99.2
Кіровоградська область	139.6	114.7	123.4	98.1	119.4	86.9	107.7	66.5	124.1	93.5
Луганська область	137.8	118.6	123.8	103.5	116.3	95.2	98.3	71.1	119.6	96.2
Львівська область	152.7	125.4	134.3	110.6	137.6	108.5	119.7	92.1	135.8	110.8
Миколаївська область	136.9	109.9	118.3	98.6	116.7	81.3	98.4	65.0	110.5	70.0
Одеська область	135.7	110.9	118.8	98.1	119.2	85.6	98.4	70.8	117.6	82.3
Полтавська область	142.8	122.9	125.1	107.7	121.6	97.6	106.6	83.2	126.4	105.6
Рівненська область	144.7	104.6	127.6	90.5	128.6	85.3	114.1	70.7	131.7	92.9
Сумська область	144.5	121.0	127.5	109.5	126.0	97.1	107.8	91.6	129.6	99.6
Тернопільська область	149.0	122.2	134.5	111.6	131.2	98.7	110.5	81.4	135.3	113.8
Харківська область	141.5	119.3	125.2	102.9	124.7	92.2	109.7	73.6	128.7	106.1
Херсонська область	134.3	111.3	117.9	99.1	115.6	82.9	104.5	69.9	115.2	88.8
Хмельницька область	143.6	114.1	129.0	101.8	125.0	90.6	111.8	76.3	124.7	88.4
Черкаська область	146.1	122.2	127.0	107.6	131.0	103.9	114.1	87.3	130.5	103.9
Чернівецька область	136.9	88.1	119.0	73.3	119.5	80.3	111.6	65.3	134.3	115.4
Чернігівська область	142.7	115.9	125.4	104.6	125.2	93.6	110.3	80.4	127.2	98.1
м. Київ	149.7	127.2	134.0	125.4	143.2	101.3	130.6	88.9	140.0	100.3

Висновок на основі вірогідності.

Нехай існує вектор  $\xi_v^{(v)}$  з елементами  $\theta_v$ , що відповідають рівню знань всіх без виключення респондентів, де  $v$  – клас. Отже,  $k_v$  – це кількість класів, на які можна поділити здатності учнів. За принципом IRT 2PL,  $k_v$  прийнято вважати рівним 3, тобто класи з низьким, середнім та високим рівнями здатностей.

$\pi_v^{(V)}$  – вага класу  $v$ , де  $\sum_v \pi_v^{(V)} = 1$  та  $\pi_v^{(V)} > 0$  для  $v = 1, \dots, k_V$ .

Також задаємо вектор  $\xi_u^{(U)}$  з елементами  $\xi_u^{(U)}$ , що відповідають рівню знань згрупованих учнів (наприклад, в нашому випадку, за регіонами, або, як варіант, за статтю, за типом навчального закладу тощо), де  $u$  – тип групи.

Кількість типів груп обираємо використовуючи Байєсівський інформаційний критерій ( $BIC$ ). Виходячи з цього критерію, кількість типів груп відповідає мінімальному значенню

$$BIC = -2\ell(\theta) + \log(n)\#par$$

На практиці ми пропонуємо встановити модель для збільшення значень  $k_U$  при обмеженні  $k_U \geq k_V$ . Коли  $BIC$  починає збільшуватися, попереднє значення  $k_U$  приймається як оптимальне. Зверніть увагу, що всі інші елементи, які характеризують модель, залишаються фіксованими.

При заданих  $k_U$  та  $k_V$  параметри можуть бути оцінені шляхом максимізації  $\log$ -правдоподібності ( $\rho_h$ ):

$$\ell(\theta) = \sum_{h=1}^H \log \sum_{u=1}^{k_U} \pi_{hu}^{(U)} \rho_h(\xi_u^{(U)})$$

де  $\theta$  – вектор, що містить всі вільні параметри, і

$$\rho_h(\xi_u^{(U)}) = \prod_{i=1}^{n_h} \sum_{v=1}^{k_V} \pi_{(hi,v|u)}^{(V)} \prod_{j=1}^r p(y_{hij} | V_{hi} = v)$$

де  $h$  – група,  $i$  – учень (респондент),  $j$  – завдання тесту,  $y_{hij} | V_{hi} = v$  – означає реалізацію випадкової величини, яка відповідає відповіді на пункт  $j$ , наданий  $i$ -м респондентом.

Щоб зробити модель ідентифікуючою, ми приймаємо обмеження

$$\beta_{jd} = 0, \gamma_{jd} = 1, d = 1, \dots, s,$$

де  $\beta_j$  (складність завдання) та  $\gamma_j$  (дискримінаційний індекс) для  $d$ -го.

Фактично існують коефіцієнти регресії  $(k_V - 1)(m_V + k_U) + (k_U - 1)(m_U + 1)$  для прихованих класів, параметри здатності  $k_V s$ , параметри дискретизації  $r - s$  і параметри труднощів  $r - s$ , вектор коваріацій індивідуального рівня ( $m_U$ ) та групового рівня ( $m_V$ ). При параметризації їх кількість зменшується на  $r - s$ , так як дискримінаційні індекси не оцінюються.

Для вибору кількості типів груп ми складаємо модель з коваріатами (тип території і географічна область) в п'ятивимірній версії (предмети: V1 - Українська мова та література, V2 - Історія України, V3 - Математика, V4 - Фізика, V5 - Англійська мова). Нехай значення  $k_U$  приймемо 6. Результати цієї підгонки представлені в таблиці 2. Отже, виберемо  $k_U = 5$ , так як відповідно до цієї кількості типів спостерігається найменше значення  $BIC$ .

Таблиця 2

Визначення  $k_U$ ; жирним шрифтом виділено найменше значення  $BIC$

$k$	$\ell$	$\#par$	$BIC$
1	-551442.8	301	1069688
2	-550185.9	309	1067501
3	-559744.5	315	1067035
4	-549930.3	319	1066838
5	-549789.9	335	1066531
6	-549571.8	339	1066665

Щоб максимізувати  $\log$ -правдоподібність  $\ell(\theta)$ , ми використовуємо алгоритм максимізації очікування (ЕМ).

Повна логарифмічна ймовірність, на якій заснований алгоритм ЕМ, може бути виражена як

$$\begin{aligned}\ell^*(\theta) &= \sum_{h=1}^H [\ell_{1h}^*(\theta) + \ell_{2h}^*(\theta) + \ell_{3h}^*(\theta)], \\ \ell_{1h}^*(\theta) &= \sum_{i=1}^{n_h} \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{k_V} z_{htv} \log p(\psi_{htj} | V_{ht} = v), \\ \ell_{2h}^*(\theta) &= \sum_{i=1}^{n_h} \sum_{u=1}^{k_u} \sum_{v=1}^{k_V} z_{hu} z_{htv} \log \pi_{(ht,v|u)}^{(V)}, \\ \ell_{3h}^*(\theta) &= \sum_{u=1}^{k_1} z_{hu} \log \pi_{hu}^{(U)},\end{aligned}$$

де  $z_{htv}$  - індикаторна функція для суб'єкта  $i$ , яка перебуває в латентному класі  $v$  ( $V_{ht} = v$ ), а  $z_{hu}$  - індикаторна функція для кластера  $h$ , що має типологію  $u$  ( $U_h = \xi_u^{(U)}$ ). Отже,  $z_{hu} z_{htv}$  дорівнює 1, якщо обидві умови виконані і 0 в іншому випадку.

Зазвичай  $\ell^*(\theta)$  набагато простіше максимізувати по відношенню до  $\ell(\theta)$ . Алгоритм ЕМ чергує наступні два кроки:

– Е-крок. Він складається в обчисленні очікуваного значення повної лог-правдоподібності  $\ell^*(\theta)$ . На практиці це еквівалентно обчис-

ленню задніх очікуваних значень змінних індикатора. Зокрема, ми маємо:

$$\mathcal{Z}_{hiv} = p(V_{hi} = v | \mathcal{D}) = \sum_{u=1}^{k_U} \mathbb{I}(\mathcal{Z})_{hu} \widetilde{\mathcal{Z}}_{hiv}$$

де  $\mathcal{D}$  – скорочений запис спостережуваних даних. Більш того, ми маємо:

$$\mathbb{I}V_{hi} = \mathbb{I}V_{hi}$$

та

$$\mathcal{Z}_{hu} = p(U_h = \xi_u^{(U)} | \mathcal{D}) = \frac{\rho_h(\xi_u^{(U)})}{\sum_{h=1}^H \rho_h(\xi_u^{(U)})}.$$

– М-крок. Він складається з поновлення параметрів моделі, максимізуючи очікуване значення  $\ell^*(\theta)$ , обчислене на Е-кроці. Точніше, в той час як для окремих ваг класу існує явне рішення, а для інших параметрів явне рішення не існує. Тому використовується ітераційний алгоритм оптимізації типу Ньютон-Рафсона. Отримані оцінки  $\theta$  використовуються для поновлення  $\ell^*(\theta)$  на наступному Е-кроці.

Коли алгоритм сходиться, останнє значення  $\theta$ , що позначається  $\hat{\theta}$ , відповідає максимуму  $\ell(\theta)$ , а потім береться як оцінка максимальної правдоподібності цього параметра. Важливо підкреслити, що кількість ітерацій і, зокрема, виявлення глобальної, а не локальної точки максимуму у більшій мірі залежить від ініціалізації ЕМ-алгоритму. Тому рекомендовано спробувати кілька ініціалізацій цього алгоритму.

Після оцінки параметрів кожен суб'єкт  $i$  може бути призначений одному з класів  $k_V$  на основі шаблону відповіді  $\psi_i$ , яку було надано учнем, а також його коваріацій  $x_i$  і типології групи, до якої він належить. Аналогічно, кожна група  $h$  може бути віднесена одному з  $k_U$ - класів. В обох випадках найбільш поширеним підходом є призначення суб'єкта і групи класу з найвищою постеріорною ймовірністю, розрахованої, як в рівняннях на Е-кроці.

Застосування. Ми маємо справу з оцінкою параметрів IRT з  $k_V = 3$  на рівні учнів,  $k_U = 5$  на рівні груп і п'яти вимірів ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ ), що позначають 5 предметів ЗНО.

Надалі здатності виражаються через стандартизований масштаб, а вагу класів отримуються як середні значення оцінених питомих ваг класу, які охоплюють  $\hat{\pi}_v^{(V)}$ , і виходять як

$$\hat{\pi}_v^{(V)} = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{n_h} \hat{\pi}_{(h,v|u)}^{(V)}.$$

У таблиці 4 показані оціночні здібності і середні ваги для трьох класів учнів і п'яти пов'язаних вимірювань разом з рангом здібностей в кожному стовпці для полегшення інтерпретації. Перевірка цих оцінок показує, що учні, які належать до класу 3 в тестах V1-V5, мають найменший рівень здатності. В цілому, частка учнів з низьким рівнем підготовленості, згрупованих за класом 3, вельми велика з точки зору класових пропорцій, оскільки вона становить трохи більше 32 відсотків учнів в цілому. Учні з найвищими рівнями здібностей відносяться до класу 1, який становить трохи більше 18 відсотків, а клас 2 – це клас випробовуваних з середніми рівнями здатності (більше 51%).

Таблиця 3

Розподіл здібностей на рівні учнів ( $\hat{\xi}_v^{(V)}$ )

	V1	V2	V3	V4	V5	$\hat{\pi}_v^{(V)}$
Class 1	0.878	0.815	0.732	0.614	0.642	0.183
Class 2	0.521	0.509	0.448	0.399	0.474	0.512
Class 3	0.298	0.191	0.188	0.140	0.194	0.321

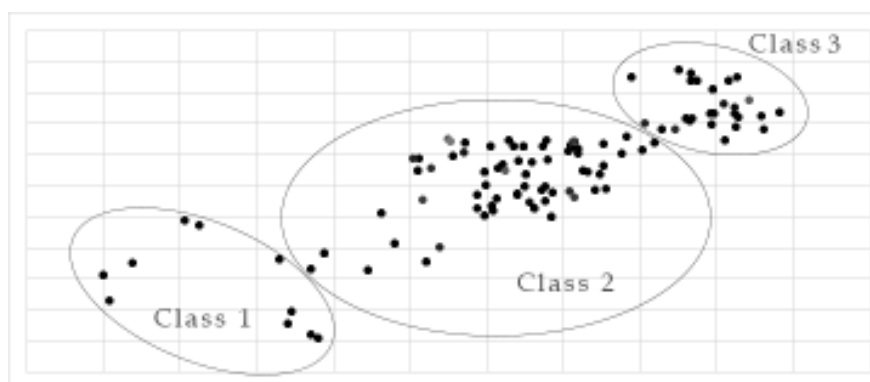


Рисунок 1 - Розподіл здібностей на рівні учнів на 3 класи

На рівні груп (міські та сільські школи за областями) розподіл оціночних середніх здібностей для п'яти обраних типів ( $k_U = 5$ ) дозволяє нам класифікувати школи від найгірших (тип 1) до кращих (тип 5) шкіл. Ми бачимо, що 18,2% шкіл належать до кращих типів (тип 4 і 5), тоді як 31,1% ставляться до найгірших; інші 50,6% є проміжними, тобто середніми.

Розподіл здібностей на рівні шкіл

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
$\xi_u^{(U)}$	0.216	0.307	0.488	0.679	0.821
$\pi_u^{(U)}$	0.098	0.213	0.506	0.123	0.059

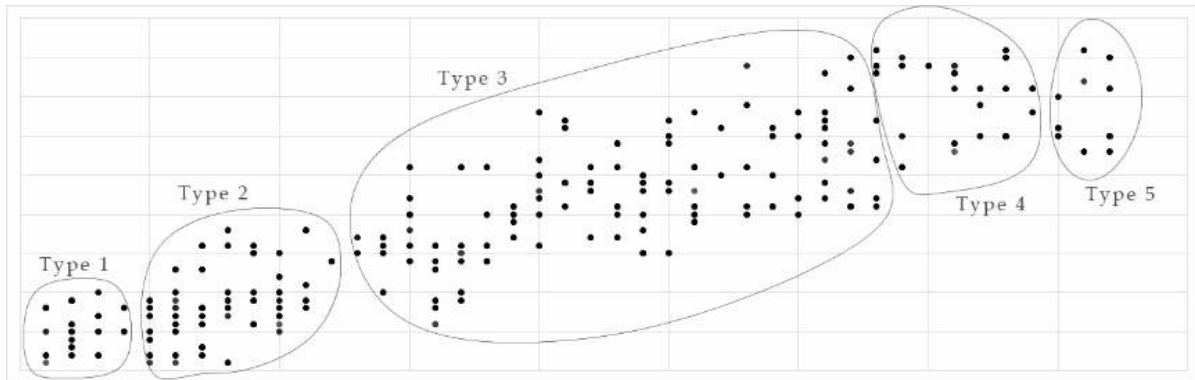


Рисунок 2 - Розподіл здібностей на рівні шкіл на 5 типів

У перших двох типах, тобто, школи з найслабшою підготовкою учнів, найбільшу частку займають сільські школи різних областей країни. «Міста», як правило, групуються у 3-5 типи, їх результати вищі.

Тепер згрупуємо результати міських і сільських шкіл за районами України и розглянемо розподіл здібностей.

Результати, наведені в таблиці 5, підтверджують, що попередній описовий аналіз (див. Таблицю 1) вже частково виявлено, тобто дуже різноманітні рівні досягнень при обліку шкільних географічних районів. Але тепер чітко видно, що найгірший рівень підготовки учнів мають школи Західної частини країни (частка таких шкіл становить більше 60%). Як показують попередні аналізи, ця ситуація склалась через те, що кількість сіл у цьому районі найбільша, а, як вже відомо, сільські школи – це «слабке місце» у системі середньої освіти України.

Проте, слід відмітити, що центральна частина України по кількості сільських шкіл знаходиться на другому місці і частка з низьким рівнем підготовки складає приблизно 23%.

Рівень підготовки у школах за районами України

	Кількість міст	Кількість сіл	Type 1 $\pi_u^{(U)}$	Type 2 $\pi_u^{(U)}$	Type 3 $\pi_u^{(U)}$	Type 4 $\pi_u^{(U)}$	Type 5 $\pi_u^{(U)}$
Захід	134	8245	0.189	0.413	0.206	0.163	0.029
Північ	69	5781	0.031	0.223	0.305	0.321	0.119
Центр	81	6650	0.032	0.207	0.310	0.352	0.099
Схід	106	3869	0.036	0.234	0.406	0.263	0.061
Південь	51	3684	0.041	0.246	0.458	0.199	0.056

**Висновки.** Дані для аналізу були взяті на сайті Українського центру оцінювання якості освіти.

В цілому, представлене розширення моделі IRT дозволяє робити різноманітні «зрізи» для аналізу результатів і надання подальших висновків та рекомендацій. Ґрунтуючись на цій моделі, ми з'ясовуємо наявність прихованих класів випробовуваних, які демонструють послідовні рівні здатності по залученим вимірам (предметам ЗНО), а також кілька типів шкіл - від найменш підготовлених шкіл до найвищих досягнень. Потім вивчаємо взаємозв'язок, що спостерігається між змінними клас та тип. На рівні учнів ми виявляємо, що тип території (місто або село) значно впливає на членство в класі, як правило учні міських шкіл, групуються в клас з найвищим рівнем підготовки. На рівні школи результати показують, як і в якій мірі чинники, пов'язані зі шкільною географічною областю, впливають на ймовірність того, що школа буде згрупована за певним типом школи (наприклад, як за нашим аналізом, школи із заходу мають найнижчий рівень підготовки).

У представленому прикладі, було з'ясовано, які райони України мають проблеми з рівнем якості середньої освіти та визначені ці причини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Чельшкова М.Б. Теория и практика конструирования педагогических тестов.-М.:Логос, 2002.- 432 с.
2. Алгина Дж. Введение в классическую и современную теорию тестов: учебник / Дж. Алгина, Л. Крокер .- М.: Логос, 2010 .- 668 с.
3. Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов/Ю.М.Нейман, В.А.Хлебников.- М.:Прометей, 2000.- 168 с.
4. Шумейко А.А., Сотник С.Л. Интеллектуальный анализ данных. Введение в Data Mining, 2014. - 223 с.

5. Abrahamowicz M., Multicategorical spline model for item response theory / M. Abrahamowicz, J. O. Ramsay // Psychometrika .– 1992 .– vol. 57, no. 1. – P. 5-27.
6. Winsberg S. Fitting item characteristic curves with spline functions / S. Winsberg, D. Thissen, H. Wainer // Educational Testing Service. Technical Report .– Princeton: NJ, 1984 .– P. 84-52.
7. Шумейко О.О., Кнуренко В.М. Побудова профілів IRT за допомогою сплайнів, які зберігають середнє значення/Математичне моделювання, №1 (32), 2015, с.28-32.
8. Reckase, M. D. (2009). Multidimensional Item Response Theory. Springer, New York.
9. Bartolucci, F. (2007). A class of multidimensional IRT models for testing unidimensionality and clustering items. Psychometrika, 72:141.
10. Bartolucci, F., Bacci, S., and Gnaldi, M. (2014). MultiLCIRT: An R package for multidimensional latent class item response models. Computational Statistics and Data Analysis, 71:971.
11. Шумейко О.О., Іскандарова-Мала А.О. Побудова профілів IRT за допомогою кусково-лінійної регресії з вільними вузлами / А.О.Іскандарова-Мала, О.О.Шумейко // збірник КНУ .— 2016 .
12. Шумейко О.О., Іскандарова-Мала А.О. Вплив адаптивного тестування на профілі IRT / А.О.Іскандарова-Мала, О.О.Шумейко // збірник КНУ .— 2017 .
13. Іскандарова-Мала А.О. Про вибір параметрів ЕМ-алгоритму для поділу суміші розподілів / А.О.Іскандарова-Мала, О.О.Шумейко // Математичне моделювання .— 2018 .
14. Іскандарова-Мала А.О. Адаптивне тестування на основі профілів IRT / А.О.Іскандарова-Мала // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті: Тези XI Міжнародної науково-практичної конференції.— 2017 .— №11 .— С.178.



Г.Л. Євтушенко, О.І. Євтушенко, В.І. Кузнецов

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ  
ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ**

*Анотація. В даній роботі проаналізовані найпопулярніші інструменти, що використовуються для автоматизації процесу тестування настільних та веб-додатків. Для побудови рейтингу розглянутих інструментів обрано метод аналізу ієрархій «у абсолютних вимірюваннях» (нормативний MAI, MAI-H).*

*Ключові слова: автоматизація тестування програмних засобів, багатокритеріальний аналіз, метод аналізу ієрархій у абсолютних вимірюваннях.*

Світ сучасних інформаційних технологій стрімко розвивається. Кожен день відбуваються розробка нових ідей, впроваджуються нові методи розробки різноманітних додатків. Пишуться тисячі рядків програмного коду, які полегшують наше життя. Проте, і вже створені проекти нікуди не зникають. Вони продовжують розвиватися, і вдосконалюватися. Адже без потрібного базису неможливо рухатися вперед.

Разом з тим неможливо уявити сучасний процес розробки чи то настільного, чи то веб-, чи то мобільного додатку без тестування. Адже у сучасному стрімкому, і інколи безжальному світі ціна навіть невеликої помилки різко збільшується. Тому тестування – це необхідний етап процесу розробки, який завжди стоїть на сторожі якості програмного продукту. І для полегшення та прискорення процесу тестування часто його автоматизують.

Основна мета автоматизації тестування – скорочення витрат на випробування програми після її модернізації. Періодично повторювані однотипні перевірки забирають багато часу в циклі розробки. Автоматизація скорочує етап тестування і вивільняє головний ресурс компанії – робочий час фахівців. Інша, не менш очевидна перевага такого тестування – підвищення якості випробувань, що

гарантує надійність продукту. Адже збитки від дефектів, виявлених лише на стадії промислової експлуатації, можуть бути дуже високими, як і незадоволеність замовників [1].

В даній роботі виконаний багатокритеріальний порівняльний аналіз сучасних інструментів для автоматизації тестування настільних та веб-додатків. Для побудови рейтингу розглянутих інструментів обрано метод аналізу ієрархій «у абсолютних вимірюваннях» (нормативний MAI, MAI-H), який визнається точнішим за метод зважених сум (МЗС), який зазвичай використовується у складанні рейтингів. Разом з тим MAI-H не має обмежень щодо кількості об'єктів порівняння, як стандартний варіант MAI «у відносних вимірюваннях» (дескриптивний MAI, MAI-D).

MAI-H дозволяє порівнювати велику (у принципі – необмежену) кількість альтернатив; важливо також, що він надає можливість використання шкал інтенсивностей (лінгвістичних стандартів), які можна застосовувати для роздільної оцінки об'єктів (інструментів тестування у нашому випадку).

Одинадцять інструментів проаналізовані та оцінені за наступними критеріями (табл. 1):

1) Платформа, для тестування якої призначений той чи інший інструмент автоматизації (Windows, web, Android та ін.).

2) Мови програмування, на яких є можливість розробляти тестові випадки.

3) Ліцензія – варіант розповсюдження, за яким можна використовувати даний інструмент (безкоштовно чи платно).

4) Формат, у якому розповсюджується інструмент автоматизації, чи то фреймворк, який інтегрується у платформу для якої створений додаток, який перевіряється, чи самостійна середа розробки з власними додатковим функціоналом.

5) Складність – рівень підготовки та рівень вимог до інженера-тестувальника. Рівень знання мови програмування та теоретичний базис тестування: Високий, середній та низький.

Для побудови рейтингу запропонованих інструментів автоматизації тестування програмних засобів застосовано метод аналізу ієрархій у абсолютних вимірюваннях (нормативний MAI, MAI-H) [13], який програмно реалізований у системі підтримки прийняття рішень NooTron [14].

## Порівняльний аналіз інструментів автоматизації програмних засобів

Інструменти автоматизації	Платформи	Мови	Ліцензія	Формат	Складність
.Net UI Automation [2]	Windows	C#	Безкоштовна	Фреймворк	Середня
White project [3]	Windows	C#	Безкоштовна	Фреймворк	Середня
SilkTest [4]	Windows, UNIX, Linux, web	4test, Java, C#	Платна	Середня розробки	Висока
Coded UI Test [5]	Windows	C#	Платна	Фреймворк	Середня
Test Complete [6]	Windows, web, Android, iOS	VBScript, JScript, C++Script, C#Script, Python, VB	Платна (є безкоштовна версія)	Середня розробки	Висока
UFT [7]	Windows, web, Android, iOS	C#, Java	Платна (є безкоштовна версія)	Середня розробки	Висока
Ranorex [8]	Windows, web, Android, iOS	C#, VB.NET	Платна (є безкоштовна версія)	Середня розробки	Середня
Selenium [9]	Web	Java, C#, JS, Python, PHP, Ruby	Безкоштовний	Фреймворк	Середня
Katalon Studio [10]	Web, Windows, Linux, Android, iOS	Java, C#, JS, Python	Платна (є безкоштовна версія)	Фреймворк/Середня розробки	Середня
Watir [11]	Web	Ruby	Безкоштовний	Фреймворк	Середня
TestPlant eggPlant [12]	Web, Windows, Linux, Android, iOS	Java, C#, JS, Python, PHP, Ruby	Платна (є безкоштовна версія)	Середня розробки	Середня

На першому етапі у МАІ-Н необхідно визначити пріоритети критеріїв відносно цілі за допомогою матриці парних порівнянь (рис.1).

	Название	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	ЛПр.
Кр1	Платформи	1	1	4	3	5	0.352
Кр2	Мови	1	1	4	3	5	0.352
Кр3	Ліцензія	1/4	1/4	1	2	3	0.132
Кр4	Формат	1/3	1/3	1/2	1	3	0.110
Кр5	Складність	1/5	1/5	1/3	1/3	1	0.054

Dim	Lam	CI	CR
5.000	5.189	0.047	0.042

Рисунок 1 – Матриця парних порівнянь критеріїв

Отже, найголовнішими критеріями виявилися – платформа та мови програмування.

Далі необхідно визначити шкалу інтенсивностей для кожного критерію, або – загальну для всіх критеріїв, як у нашому випадку (рис. 2).

	Название	Инт5.1	Инт5.2	Инт5.3	Инт5.4	ЛПр.
Инт5.1	Високий	1	2	3	4	0.467
Инт5.2	Вище середнього	1/2	1	2	3	0.277
Инт5.3	Середній	1/3	1/2	1	2	0.160
Инт5.4	Низький	1/4	1/3	1/2	1	0.096
		Dim	Lam	CI	CR	
		4.000	4.031	0.010	0.011	

Рисунок 2 – Матриця парних порівнянь шкали інтенсивностей критеріїв

На наступному етапі задаються альтернативи (у нашій задачі – це інструменти автоматизації тестування ПЗ) та їхні оцінки за критеріями у шкалі інтенсивностей (рис. 3). Після чого розраховуються глобальні пріоритети альтернатив та будується рейтинг (рис. 4).

№	Альтернативы	Кр1	Кр2	Кр3	Кр4	Кр5	
A1	.Net UI Automation	Середній	Середній	Високий	Середній	Середній	✗
A2	White project	Середній	Середній	Високий	Середній	Середній	✗
A3	SilkTest	Вище середнього	Вище середнього	Низький	Вище середнього	Високий	✗
A4	Coded UI Test	Середній	Середній	Низький	Середній	Середній	✗
A5	Test Complete	Високий	Високий	Середній	Вище середнього	Високий	✗
A6	UFT	Високий	Вище середнього	Середній	Вище середнього	Високий	✗
A7	Ranorex	Високий	Середній	Середній	Вище середнього	Середній	✗
A8	Selenium	Низький	Високий	Високий	Середній	Середній	✗
A9	Katalon Studio	Високий	Вище середнього	Середній	Високий	Середній	✗
A10	Watir	Низький	Низький	Високий	Середній	Середній	✗
A11	TestPlant eggPlant	Високий	Високий	Середній	Вище середнього	Середній	✗

Рисунок 3 – Оцінки альтернатив по критеріям

З отриманого вище рейтингу можна зробити наступні висновки:

1. Найбільшу кількість балів отримали інструменти, які дозволяють охопити найбільшу кількість платформ, а також дають широкий вибір підтримки мов програмування.

2. За результатами отриманого рейтингу розглянуті інструменти автоматизації утворюють 5 класів за пріоритетністю (див. рис. 4): 1 – Test Complete, TestPlant eggPlant; 2 – Katalon Studio, UFT; 3 – Selenium, Ranorex, SilkTest; 4 – .Net UI Automation, White project; 5 – Watir, Coded UI Test.

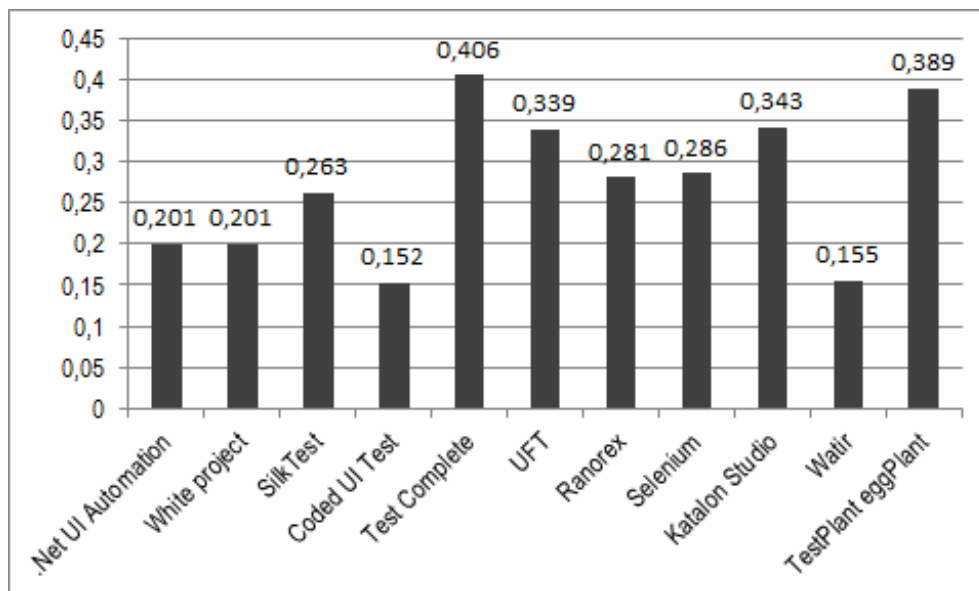


Рисунок 4 – Рейтинг інструментів автоматизації тестування програмних засобів

В процесі виконання роботи проаналізовані найпопулярніші інструменти, що використовуються для автоматизації процесу тестування. Також на основі описаних критеріїв було складено рейтинг на основі методу аналізу ієрархій у абсолютних вимірюваннях із застосуванням СППР NooTron.

Можна зробити загальний висновок, що проблематика автоматизації тестування програмних продуктів є вельми актуальною. Тестування займає важливе місце в життєвому циклі додатків. Розвивається його інструментарій. Без професійного і якісного тестування неможливо створити якісний та успішний програмний продукт.

Результати проведеного аналізу можуть бути використані для обґрунтування вибору інструменту автоматизації тестування програмного засобу у конкретному проекті.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Криспин Л., Грегори Дж. Гибкое тестирование: практическое руководство для тестировщиков ПО и гибких команд. – М.: «Вильямс», 2010. – С. 464.
2. UI Automation Overview [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/framework/ui-automation/ui-automation-overview/>, вільний. – Загол. з екрану.
3. White project Overview [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <http://white.teststack.net/docs/getting-started/>, вільний. – Загол. з екрану.
4. SilkTest [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <https://www.microfocus.com/products/silk-portfolio/silk-test/>, вільний. – Загол. з екрану.
5. Coded UI Test [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <http://www.dotnetcurry.com/visualstudio/702/codedui-test-cuit-using-visual-studio-2010/>, вільний. – Загол. з екрану.
6. Test Complete Test [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <https://smartbear.com/product/testcomplete/overview/>, вільний. – Загол. з екрану.
7. Unified Functional Testing Test [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <https://software.microfocus.com/en-us/products/unified-functional-automated-testing/overview/>, вільний. – Загол. з екрану.
8. Ranorex Test [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступу <https://www.ranorex.com/>, вільний. – Загол. з екрану.
9. Что такое Selenium? [Электронный ресурс] // Selenium/Webdriver. Автоматизация тестирования веб-приложения через браузер. – Режим доступа: <http://selenium2.ru/>
10. Katalon Studio [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступа <https://www.katalon.com/>, вільний. – Загол. з екрану.
11. Watir [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступа <http://watir.com/>, вільний. – Загол. з екрану.
12. TestPlant eggplant [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступа <https://www.testplant.com/>, вільний. – Загол. з екрану.
13. Саати Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т.Л.Саати. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 360 с.
14. Система поддержки принятия решений NooTron [Электронный ресурс] – Электрон. дані – Режим доступа: <http://nootron.net.ua>, вільний. – Загол. з екрану.

О.О. Луценко, Т.В. Селівьорстова

## **ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА GPS НАВІГАЦІЇ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ**

*Анотація. У статті наведені вимоги до інформаційної системи моніторингу рухомих об'єктів та дослідження їх поведінки з використанням GPS. Розглянутий стек інформаційних технологій, які можуть бути використані в процесі розробки системи GPS-моніторингу. Отримані результати можуть бути використані в процесі розробки інформаційної системи моніторингу рухомих об'єктів та дослідження їх поведінки з використанням GPS.*

*Ключові слова: GPS навігація, сільськогосподарські агрегати, місцезнаходження, технічний стан.*

### **Постановка задачі**

У зв'язку з необхідністю зменшення собівартості обробки сільськогосподарських угідь перспективним напрямком є використання GPS навігації, яка дозволяє збільшити точність обробки землі, посіву, збору врожаю. Тому важливою задачею є розробка інформаційної системи GPS навігації для моніторингу руху сільськогосподарських агрегатів. Метою розробки є автоматизація рутинних контрольних заходів при експлуатації сільськогосподарських агрегатів.

### **Аналіз останніх досліджень**

В останні роки в землеробстві спостерігається ознаки технічної революції, що знайшла своє втілення в технологіях прецизійного землеробства. Ці технології забезпечують більш точну роботу у полі і об'єктивну оцінку проведення робіт. В результаті підвищується врожайність, поліпшується якість продукції і раціонально використовуються кошти для виробництва. Однак впровадження таких технологій пов'язане з досить високими початковими інвестиціями. Цей факт є серйозною перешкодою на шляху поширення прецизійного землеробства, особливо в країнах Східної Європи і СНД,

де господарства і без того перебувають в обмежених фінансових умовах. Проте, економічні розрахунки показують, що незважаючи на високу вартість впровадження цих технологій, вони можуть окупитися не тільки в Західній Європі, але і в умовах сільського господарства України. З урахуванням унікальних природно-кліматичних умов і вигідного географічного положення країни продумані інвестиції в аграрний сектор утворюють перспективний напрямок. Причому, встановлення GPS обладнання на сільськогосподарських агрегатах дозволяє:

- спостерігати за місцезнаходженням автопарку на мапі місцевості;
- проглядати повну історію переміщень по будь-якому агрегату;
- отримувати звіти технічного стану, ефективності роботи агрегату.

Не зважаючи на присутність на ринку готових проектних та інженерних рішень у цій галузі, питання вдосконалення інформаційних технологій та розробки індивідуальних обчислювальних алгоритмів актуальні і перспективні [1, 2].

#### Формулювання цілей (постановка задачі)

Визначити вимоги до інформаційної системи моніторингу рухомих об'єктів та дослідження їх поведінки з використанням GPS.

#### Основна частина

Інтерфейс інформаційної системи GPS-моніторингу рухомих об'єктів складається з програмної та апаратної частин. GPS-трекер «BITREK» (рисунок 1) забезпечує апаратний інтерфейс WEB-додатку.



Рисунок 1 – GPS-трекер «BITREK», ТОВ «Дискові системи»



WEB-інтерфейс доцільно розробляти на мові програмування PHP, з використанням фреймворку Symfony2 та веб серверу Nginx. Важливою перевагою Symfony є можливість використання існуючих відкритих PHP проектів, як частини фреймворка [3, 4]. Для збереження та обробки масивів даних отриманих від GPS-трекера використовується база даних PostgreSQL з розширенням PostGIS. Реалізація інтерфейсу виконується на мові програмування JavaScript та бібліотеки Back Bone.

Як відомо, GPS-трекер, окрім визначення місця знаходження, може зчитувати багато інших даних які характеризують роботу транспортного засобу, зокрема, напругу в електричній мережі транспортного засобу, температуру двигуна, кількість обертів двигуна та інші дані з електронних приборів. Деякі GPS-трекери додатково реалізують можливість підключення додаткових датчиків метеостанції, рівня палива, електромагнітного поля та інших.

Устаткування (трекер) відправляє дані в форматі HEX на сервер по протоколу Телтоніка. На сервері отримані дані перетворюються і заносяться в базу даних (рисунок 2).



Рисунок 2 – Схема передачі та обробки даних від GPS-трекера

Інформаційна система GPS-моніторингу рухомих об'єктів потребує реалізації декількох модулів, що надають можливість оперативно керувати сільськогосподарською технікою:

- перегляд історії треків роботи агрегатів;
- on-line перегляд треків роботи агрегатів.

Інформація, що надана в звітах, дозволяє:

- аналізувати продуктивність агрегатів по процесах, операціях;
- контролювати та оптимізувати витрати паливно мастильних матеріалів;
- контролювати площу обробки, маршрут, швидкість руху;
- контролювати робочий час кожного агрегату по операціях.

WEB-інтерфейс інформаційної системи GPS-моніторингу рухомих об'єктів (рисунк 3) розділений на дві логічні області. В першій – відображається мапа місцевості з відображенням треків агрегатів. Друга містить список агрегатів, статистику поїздок, графіки та інше. Реалізована можливість вибору інтервалу для відображення та аналізу даних від агрегатів.

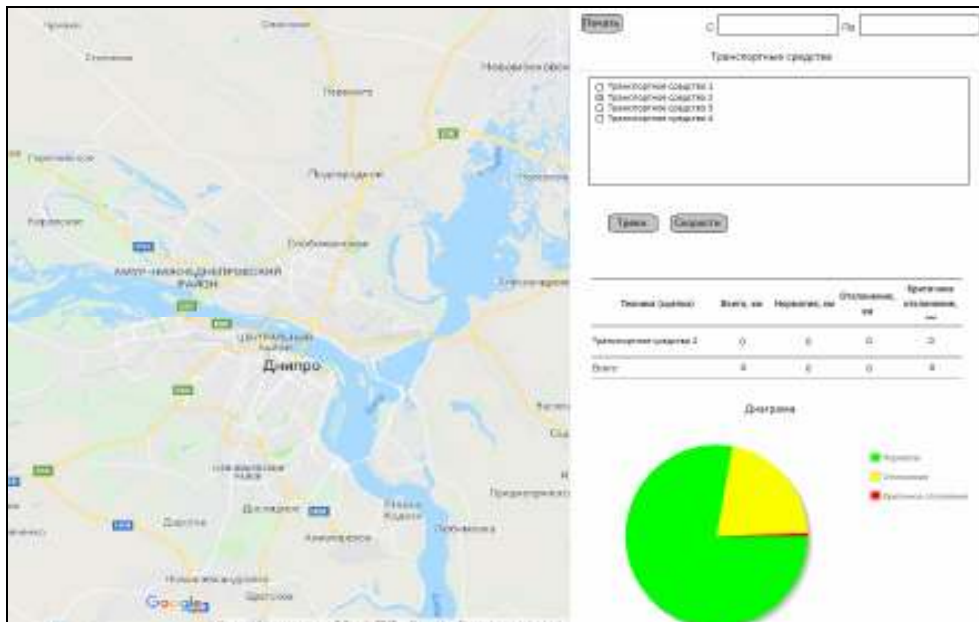


Рисунок 3 – WEB-інтерфейс інформаційної системи GPS моніторингу рухомих об'єктів

Таким чином, за допомогою супутникового зв'язку дані про місцезнаходження агрегату передаються на сервер, з якого користувач в будь-який момент часу (минулий або теперішній) зможе спостерігати шлях та технічні особливості роботи агрегату. Аналізуючи результат, користувач може контролювати, скільки часу і як добре агрегат обробляв поле, а також, де і у який час робив зупинки. Також, завдяки супутниковому моніторингу, є можливість перевірки якості обробки площі ділянки. Всі ці дані, що отримані за допомогою супутникового моніторингу, дозволяють користувачу підвищити точність планування як видаткової, так і дохідної частини

сільськогосподарського бізнесу. Дана система також дозволяє отримувати on-line інформацію про перебування транспортного засобу в разі його неправомірного використання (викрадення). Додаткові датчики дають змогу вчасно виявляти несправності в роботі агрегатів та виконувати ремонтні роботи з меншими затратами, ніж при пізньому виявленні цих несправностей. Наприклад, датчики рівня палива, дадуть змогу контролювати витрати палива та несанкціонований злив палива. Якщо злив все ж таки був, за допомогою звітів можна виявити в якому місці, в який час та в якій кількості був злив.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень**

1. Представлені основні вимоги до інформаційної системи моніторингу рухомих об'єктів та дослідження їх поведінки з використанням GPS.

2. Запропонований стек інформаційних технологій, які можуть бути використані в процесі розробки системи GPS-моніторингу сільськогосподарських агрегатів.

3. Встановлено, що відмінною рисою реалізації розробленої інформаційних технологій є використання розширення PostGIS до БД PostgreSQL.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с. ISBN 5-93517-218-6.

2. Богданов М.Р. Применения GPS / ГЛОНАСС. – Долгопрудный: Интеллект, 2012. – 134 с. – ISBN 978-5-91559-109-6

3. Скляр Д. Изучаем PHP 7. Руководство по созданию интерактивных ВЕБ-сайтов / Дэвид Скляр., 2016. – 464 с. – (Вильямс). – (O'Reilly). ISBN 978-5-9908462-3-4

4. Symfony 4.0 Documentation [Електронний ресурс] // Symfony – Режим доступу до ресурсу: <https://symfony.com/doc/current/index.html>.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Баглай А.В., Веренев В.В.**

Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях ..... 3

**Власов А.А., Зданевич С.В.**

Исследование динамической системы балансирного электрододержателя дуговой сталеплавильной печи ..... 10

**Капітонов О.Г.**

Комп'ютерна модель масопереносу в гальванічних процесах ..... 19

**Лапханов Е.О., Палій О.С.**

Аналіз можливості застосування двигунної установки з постійними магнітами для космічних апаратів на навколоземній орбіті..... 24

**Узлов К.І., Дзюбіна А.В., Романова Н.С., Мовчан О.В.**

Обчислення точних значень температур фазових перетворень за результатами математичної обробки в пакеті MathCad даних диференційного термічного аналізу ..... 36

**Nadtochiy A.A., Velikonskaya N.M.**

Analysis of the equilibrium distribution of phases of the system Fe-P-C in the preparation of phosphoric ferroalloys ..... 45

**Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Левін Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р.**

Перспективи генерації феросплавів нового покоління для легування та мікролегування сталі ..... 52

**Редчиц Д.А., Белоусова Т.П., Выгоднер И.В., Ляхович Т.П., Моисеенко С.В.**

Автоматизированный препроцессор для задач вычислительной аэродинамики..... 61

**Баклан І.В., Баришич Л.М., Дідик Б.О.**

Побудова теплової карти переміщень інтелектуального агента в середовищі ..... 72

**Островська К.Ю., Михальов О.І., Черевко А.І.**

Алгоритми нечіткої кластеризації для аналізу металографічних зображень ..... 77

**Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Ivaschenko E.V., Busygin V.V.**

Effective algorithms for solving coefficient problems of high accuracy order schemotechnical technologies for reliability of solar arrays ..... 95

**Балакин В.Ф., Угрюмов Ю.Д., Богдан Ю.Д., Донской И.В., Кондратьев Ю.А., Кадильников С.В.**

Развитие производства труб на ПАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» ..... 108

<b>Гануш В.І., Гунза А.</b>	
Безпека системи подачі дуття в конвертер.....	113
<b>Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Шевченко І.А., Кобрін Ю.Г.</b>	
Встановлення закону розподілу поломок елементів прокатного стану з метою їх запобігання .....	122
<b>Тітов К.Ю.</b>	
Розробка семантичного фільтру на основі персональних вподобань користувача .....	128
<b>Федорович А.И.</b>	
Исследование потенциальных возможностей классификации энтропийных выборок случайных величин .....	139
<b>Іскандарова-Мала А.О.</b>	
Аналіз якості середньої освіти.....	145
<b>Євтушенко Г.Л., Євтушенко О.І., Кузнецов В.І.</b>	
Багатокритеріальний порівняльний аналіз інструментів для автоматизації тестування програмних засобів .....	155
<b>Луценко О.О., Селівьорстова Т.В.</b>	
Інформаційна система GPS навігації для моніторингу стану сільськогосподарських агрегатів .....	161

## РЕФЕРАТЫ

УДК 621.771.06

Баглай А.В., Веренев В.В. **Сравнительный диагностический анализ вибропереходных процессов в смежных прокатных клетях** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.3 - 9.

Представлен сравнительный анализ результатов измерений переходных процессов в трех смежных черновых клетях стана 1680, отличающихся техническим состоянием по износу сочленений. Показано, что путем сравнения вибропараметров, измеряемых на идентичных участках линий привода можно давать оценку технического состояния оборудования.

Библ. 5.

УДК 621.365.22

Власов А.О. **Дослідження динамічної системи балансирующего электродотримача дугової сталеплавильної печі** / А.О.Власов, С.В. Зданевич // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.10 - 18.

Розглядається динамічна система балансирующего электродотримача дугової трифазної сталеплавильної печі на основі подвійного фізичного маятника з пружнодисипативними зв'язками. Визначено параметри динамічної моделі та електродинамічного впливу, що змушує коливання. Складено диференціальні рівняння змущених коливань дисипативної системи з двома ступенями волі. Виконано математичне моделювання змущених і вільних коливань електрода в горизонтальній площині. Показано можливість зниження максимальних амплітуд і зміни характеру коливань електрода при раціональному виборі значень жорсткості і параметрів дисипації гасителя коливань.

Бібл. 9, іл. 4.

УДК 004.9:544.6

Капітонов О.Г. **Комп'ютерна модель масопереносу в гальванічних процесах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.19 - 23.

Розроблено математичну модель та реалізовано відповідний комп'ютерний додаток для розрахунків характеристик масопереносу в гальванічних процесах. Модель враховує протікання певних хімічних процесів, міграційну, дифузійну та конвективну складову потоку маси. Адекватність моделі підтверджена розрахунками для реальних композицій з порівнянням результатів з експериментальними даними.

Бібл. 1.

УДК 629.78

Лапханов Е.О., Палий А.С. **Анализ возможности применения двигательной установки с постоянным магнитом для космических аппаратов на околоземную орбиту** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.24 - 35.

Статья посвящена анализу возможности применения двигательной установки с постоянными магнитами (ДУПМ) для космических аппаратов (КА) на околоземных и окололунную орбитах, а также в межпланетном пространстве. Целью данной статьи является исследование возможности и эффективности применения ДУПМ для управления орбитальным движением КА на околоземных и окололунную орбитах и траекторией полета при движении в межпланетном пространстве. Проведен анализ использования электромагнитных двигательных систем для КА, выявлены преимущества и недостатки. Проведен анализ возможности и эффективности применения ДУПМ на разных высотах околоземных орбит. Избран необходимые параметры для магнитных материалов постоянных магнитов и разработаны конструктивная схема ДУПМ. Проведено розрахунки силы тяги (торможения), которую получаем при взаимодействии созданной магнитосферы КА с набегающим потоком на КА, заряженных частиц ионосферы. Произведена оценка эффективности применения ДУПМ и запропоновани ее дальнейшие пути развития.

Библ. 6.

УДК 519.876.5:620.22:620.181.4

Узлов К.І., Дзюбіна А.В., Романова Н.С., Мовчан О.В. **Обчислення точних значень температур фазових перетворень за результатами математичної обробки в пакеті mathcad даних диференційного термічного аналізу** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.36 - 44.

Обчисленням даних диференційного термічного аналізу дослідного сплаву системи Cu-Sn-Si за допомогою математичного процесора MathCAD 14 в інтервалі температур 20 ... 624°C визначене положення точок перегинів та екстремуму на експериментальній кривій диференційного термічного аналізу в області твердофазних перетворень. Коректні значення температур низькотемпературного та середньотемпературного структурних перетворень (перегини) в дослідному сплаві встановлені як  $T_X = 274.5^\circ\text{C}$  і  $T_Y = 368.25^\circ\text{C}$  з коефіцієнтами кореляції поліноміальних апроксимацій  $r = 0.995$ . Коректне значення температури високотемпературного структурного перетворення (екстремум) в дослідному сплаві встановлене як  $T_Z = 507.5^\circ\text{C}$  з коефіцієнтом кореляції поліноміальної апроксимації  $r = 0.978$ .

Бібл. 12, іл. 9, табл. 4

УДК 669.168

Надточий А.А., Великонская Н.М. **Анализ равновесного распределения фаз системы Fe – P – C при получении фосфористых ферросплавов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.45 - 51.

Проведен теоретический анализ возможности использования фосфоритов отечественных месторождений в качестве сырья для производства феррофосфора. Рассмотрено равновесное распределение фаз по переменным основности и температуре. Исследован состав газовой фазы при различных температурах. Поведение соединений в восстанови-

тельных условиях рассматривали с помощью программ термодинамического моделирования.

Библ. 5, ил. 6, табл. 2.

УДК 669.02:669.15-194.018.26

Піптюк В.П., Тогобицька Д.М., Логозинський І.М., Левін Б.А., Петров О.П., Греков С.В., Снігура І.Р. **Перспективи генерації феросплавів нового покоління для легування та мікролегування сталі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.52 - 60.

Викладено основні положення розроблених в ІЧМ НАНУ методичних підходів в прогнозуванні комплексу властивостей нових складів нестандартних феросплавів з поліпшеними технологічними властивостями для легування і мікролегування електросталі, які засновані на використанні параметрів міжатомної взаємодії, що дозволяє врахувати роль кожного елементу у складі сплаву у формуванні його структури та властивостей. Теоретично обґрунтована можливість підвищення ефективності застосування нових феросплавів.

Бібл. 19.

УДК 532.516

Редчиць Д.О., Білоусова Т.П., Вигоднер І.В., Ляхович Т.П., Моїсєєнко С.В. **Автоматизований препроцесор для задач обчислювальної аеродинаміки** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.61 - 71.

На базі багатоблокових пересічних структурованих сіток, що перетинаються, розроблений автоматизований препроцесор для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки. Багатоблокові обчислювальні технології дозволяють проводити чисельне моделювання стаціонарних і нестаціонарних, ламінарних і турбулентних течій нестисливої рідини навколо рухомих і нерухомих тіл складної геометрії. Розроблений алгоритм має можливість легкого розпаралелювання на багатоядерних системах.

Бібл. 7, іл. 10.

УДК 004.67

Баклан И.В. **Построение тепловой карты перемещений интеллектуального агента в среде** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.72 - 76.

В статье представлен метод построения тепловых карт на основе массива декартовых точек, собранных по дискретным тикам времени.

Библ.5, ил.5.

УДК 681.3.068

Островская К.Ю., Михалев А.И., Черевко А.И. **Алгоритмы нечеткой кластеризации для анализа металлографических изображений** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.77 - 85.



Для исследования в работе было реализовано два алгоритма нечеткой кластеризации: с-средних и субтрактивный метод нечеткой кластеризации для образца микроструктуры металлографического изображения.

Библ. 5. рис. 7.

УДК 681.3.012:621.1

Иващенко В.П. **Эффективные алгоритмы решения коэффициентных задач высокого порядка точности** / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, Е.В. Иващенко, В.В. Бусыгин // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.86 - 94.

Для исследования теплофизических свойств материалов обратными методами выведен соответствующий класс математических моделей. Процедура обработки математических моделей возведена к экстремальной постановке, что позволило разработать эффективные алгоритмы решения коэффициентных задач произвольного порядка точности. Разработан пакет прикладных программ для решения коэффициентных задач теплопроводности методами математического моделирования. Создание пакета выполнено с учетом требований объектно -ориентированного программирования. Процедура моделирования была реализована на основе применения многопроцессорной вычислительной системы. Приводятся результаты решения тестовых задач на основе предложенного подхода.

Библ. 12, ил 2.

УДК 621.3

Тонкошкур А.С., Накашидзе Л.В., Лягушин С.Ф. **Схемотехнические технологии для надежности солнечных батарей** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.95 - 107.

Проанализированы факторы режима, приводящие к сбоям фотоэлектрических элементов солнечных батарей и их компонентов, а также схемные методы и средства, позволяющие решать проблемы обеспечения их надежности.

Перспективы повышения эффективности схемных методов защиты от электрических тепловых перегрузок указываются, в частности, на основе использования новых элементов защиты от перегрузок тока на основе самовозвращающихся предохранителей из углеродного полимера.

Библ. 28, рис.7.

УДК 621.771

Балакін В.Ф., Угрюмов Ю.Д., Богдан Д.А., Донской И.В., Кондратьев Ю.А., Кадильников С.В. **Розвиток виробництва труб на ПАТ «ИНТЕРПАЙП НТЗ»** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.108 - 112.

Розглянуто основні напрями вдосконалення виробництва труб на агрегатах з пілігримовими станами, станами поздовжньої і гвинтовий розкочування труб ПАТ «Интерпайп НТЗ».

Бібл. 4.

УДК 669.02

Гануш В.І., Гунза А. **Безпека системи подачі дуття в конвертер** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.113 - 121.

Розглянуто послідовність аналізу ризику на промислових об'єктах. На прикладі системи подачі дуття в кисневий конвертер побудовано дерево відмов для одного з факторів – знос сопел кисневої фурми та визначені показники безпеки.

Бібл. 4, іл. 1.

УДК 621.771

Гречаний О.М., Васильченко Т.О., Шевченко І.А., Кобрін Ю.Г. **Встановлення закону розподілу поломок елементів прокатного стану з метою їх запобігання** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.122 - 127.

Розглядаються фактори впливу бронзових вкладишів на надійність роботи й довговічність шпіндельних пристроїв. На підставі статистичних даних отримано закон розподілу наробітку до відмови та розроблена методика встановлення закону розподілу випадкових величин зношування бронзових вкладишів стану 1680. Це дозволить прогнозувати технічний стан вкладишів, та всіх деталей стану 1680 в цілому, протягом усього часу експлуатації, для виконання своєчасних ремонтних робіт.

Бібл. 5.

УДК 004.8

Тітов К.Ю. **Розробка семантичного фільтру на основі персональних вподобань користувача** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.128 - 138.

Метою даної статті є дослідження методів, які використовуються у сучасних рекомендаційних системах, а також розробка персоналізованого сервісу за для фільтрації новинної інформації.

Бібл. 6, іл. 4

УДК 620.179

Федорович А.І. **Дослідження потенційних можливостей класифікації ентропійних вибірок випадкових** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.139 - 144.

Розглянуто задачу аналіз еталонних вибірок ентропійних перетворень і оцінка працездатності методу класифікації багатопараметричних об'єктів за експериментальними вимірами. Шляхом проведення обчислювальних експериментів досліджено можливості класифікації багатопараметричних об'єктів при різному обсязі вихідних даних. Розраховані ймовірності прийняття правильних рішень в залежності від обсягу вимірювань і апріорних знань щодо об'єкту контролю.

Бібл.7, іл.1.

УДК 37.07

Искандарова-Малая А.А. **Анализ качества среднего образования** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.145 - 151.

В рамках образовательного контекста ключевой целью является оценка приобретенных навыков учащихся и кластеризация студентов в соответствии с их уровнем способностей. В связи с этим необходимо учитывать соответствующий элемент, из которого следует возможное влияние на школьников. С этой целью на-дано методологический инструмент, который учитывает многоуровневую структуру данных (то есть учеников в школах) соответственно. Такой подход к-щему сгруппировать как учеников, так и школы в однородные классы способностей и эффективности, а также оценить влияние определенных характеристик учащихся и школ на вероятность принадлежности в классы.

Библ.14.

УДК 004.942:519.816

Євтушенко Г.Л., Євтушенко О.І., Кузнецов В.І. **Багатокритеріальний порівняльний аналіз інструментів для автоматизації тестування програмних засобів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.155 - 160.

В даній роботі проаналізовані найпопулярніші інструменти, що використовуються для автоматизації процесу тестування настільних та веб-додатків. Для побудови рейтингу розглянутих інструментів обрано метод аналізу ієрархій «у абсолютних вимірюваннях» (нормативний MAI, MAI-H).

Бібл. 14, іл. 4, табл. 1

УДК 004.896: 621.396

Лущенко А.А., Селиверстова Т.В. **Информационная система GPS навигации для мониторинга состояния сельскохозяйственных агрегатов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (117). - Днепр, 2018. - С.161 - 165.

В статье приведены требования к информационной системе мониторинга подвижных объектов и исследования их поведения с использованием GPS. Рассмотрен стек информационных технологий, которые могут быть использованы в процессе разработки системы GPS-мониторинга. Полученные результаты могут быть использованы в процессе разработки информационной системы мониторинга подвижных объектов и исследования их поведения с использованием GPS.

Библ. 4.

UDK 621.771.06

Baglai A., Verenev V. **Comparative diagnostic analysis of vibro-transitive processes in adjacent rolling stands** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.3 - 9.

A comparative analysis of the results of measurements of the transient processes in three adjacent roughing stands of the 1680 mill, differing in the technical state of wear of the joints is presented. It is shown that by comparing the vibroparameters measured on identical sections of the drive lines, it is possible to assess the technical condition of the equipment.

Refs.5.

UDC 621.365.22

Vlasov A.A. **Investigation of the dynamic system of the balancing electrode holder of electric arc furnace** / A.A. Vlasov, S.V. Zdanevich // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.10 - 18.

The dynamic system of the balancing electrode holder of three-phase electric arc furnace based on a double physical pendulum with elastic-dissipative constraints is considered. The parameters of the dynamic model and the compulsory electrodynamic effect were determined. Differential equations of forced oscillations of a dissipative system with two degrees of freedom were set up. A mathematical simulation of the forced and free oscillations of the electrode in the horizontal plane was performed. The possibility of decreasing the maximum amplitudes and changing the character of the electrode oscillations is shown with a rational choice of stiffness values and dissipation parameters of the oscillations absorber.

Ref. 9, fig. 4.

UDC 004.9:544.6

Kapitonov A.G. **A computer model of mass transport in galvanic processes** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.19 - 23.

Mathematical model and corresponding computer application for determination of mass transport characteristics in galvanic processes were developed. The model simulates chemical reactions, migration, diffusion and convective transport within diffusional layer of the electrolyte. Model adequacy was proved by calculation for real compositions and results comparison with experimental data.

Bibl. 1.

UDC 629.78

Lapkhanov E.O., Paliy A.S. **Analysis of the possibility of using a motor installation with a permanent magnet for spacecraft to the near-Earth orbit** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.24 - 35.

The article is devoted to the analysis of the possibility of using a propulsion system with permanent magnets (DPMM) for spacecraft (spacecraft) in near-earth and near-lunar orbits, as well as in the interplanetary space. The purpose of this article is to investigate the feasibility and effectiveness of using DUPM to control the orbital motion of spacecraft in near-Earth and near-moon orbits and the trajectory of flight when moving in midplane space. The analysis of the use of electromagnetic motor systems for spacecraft is carried out, advantages and disadvantages are revealed. Analysis of the possibility and efficiency of the DUPM

application at various altitudes of near-earth orbits was conducted. The necessary parameters for the magnetic materials of permanent magnets were selected and a constructive DUPM scheme was developed. The rosary force of traction (braking) is obtained, which is obtained by the interaction of the created magnetosphere of the space vehicle with the on-running flow on the spacecraft, charged particles of the ionosphere. An estimation of the effectiveness of the DUPM application and an inquiry into its further development paths was made.

Bibl. 6.

UDC 519.876.5:620.22:620.181.4

Uzlov K.I., Dziubina A.V., Romanova N.S., Movchan A.V. **Calculation of phase transformations temperatures exact values according to data of differential thermal analysis results by mathematical processing in mathcad package** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.36 - 44.

By calculation of differential thermal analysis data of Cu-Sn-Si system experimental alloy using mathematical processor MathCAD 14 in temperature range 20 ... 624°C bending and extreme points positions on differential thermal analysis experimental curve in solid state temperature interval have been determined. Correct temperature values of low-temperature and medium-temperature structural transformations (bendings) in investigated alloy are set as  $T_X = 274.5^\circ\text{C}$  and  $T_Y = 368.25^\circ\text{C}$  with correlation coefficients of polynomial approximations  $r = 0.995$ . Correct temperature value of high-temperature structural transformation (extreme) in investigated alloy is set as  $T_Z = 507.5^\circ\text{C}$  with correlation coefficient of polynomial approximation  $r = 0.978$ .

Bibl. 12, fig. 9, tables 4.

UDC 669.168

Nadtochij A.A., Velikonskaya N.M. **Analysis of the equilibrium distribution of phases of the system Fe – P – C in the preparation of phosphoric ferroalloys** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.45 - 51.

A theoretical analysis of the possibility of using phosphorites of domestic deposits as a raw material for the production of ferrophosphorus has been carried out. The equilibrium phase distribution under basicity and temperature variables is considered. The behavior of compounds under reducing conditions is substantiated using programs for thermodynamic modeling.

Ref. 5, Fig. 6, Table. 2.

UDC 669.02:669.15-194.018.26

Piptyuk V.P, Togobitskaya D.N, Logozinsky I.N., Levin B.A., Petrov A.Ph, Grekov S.V, Snigura I.R. **Prospects of predicting the properties of integrated ferro-alloys of new generation for alloying and microalloying of steel** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.52 - 60.

The main provisions of the methodical approaches developed in the IFM of NASU for predicting the complex of properties of new compositions of non-standard ferroalloys with improved technological properties for alloying and microalloying of electric steel based on the use of parameters of interatomic interaction, which allows us to take into account the role

of each element in the composition of the alloy in the formation of its structure and properties are described. The possibility of increasing the efficiency of use of new ferroalloys are theoretically justified

Bibl. 19.

UDK 532.516

Redchyts D.O., Belousova T.P., Vygodner I.V., Lyahovich T.P., Moiseenko S.V. **Automated preprocessor for computational fluid dynamics** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.61 - 71.

Automated preprocessor for solving problems of computational fluid dynamics are developed on the basis of multi-block overset structured grids. Multi-block computational technologies allow spending the numerical simulation of steady and unsteady, laminar and turbulent incompressible flows around moving and stationary objects of complex geometry. The developed algorithm has the ability to easily parallel on multicore systems.

Bibl. 7.

UDK 004.67

Baklan I.V. **Construction Heat Map intelligent agents moved in environment** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.72 - 76.

In the article we present a method of building heat maps based on an array of cartesian points, collected on discrete ticks of time.

Bibl.5.

UDC 681.3.068

Ostrovskaya K.Yu., Mikhalev A.I., Cherevko A.I. **Fuzzy clustering algorithms for analyzing metallographic images** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.77 - 85.

To study the work, two algorithms of fuzzy clustering were realized: a c-average and a subtractive method fuzzy clustering for a sample of a microstructure a metallographic image.

Bibl. 5.pic. 7.

UDC 681.3.012: 621.1

Ivaschenko V.P. **Effective algorithms for solving coefficient problems of high accuracy order** / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.V. Ivaschenko, V.V. Busygin // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.86 - 94.

In order to research the materials thermophysical properties by the inverse methods, a corresponding class of mathematical models is derived. The processing procedure for simulation models is reduced to extreme formulation, that allowed to develop effective algorithms for solving coefficient problems of arbitrary accuracy order. The package of applied programs for solving coefficient problems of thermal conductivity by simulation modeling methods is developed. The package is made on the bases of the object-oriented programming requirements. The simulation procedure was based on a multiprocessor computing system application. The test problems solution results are presented on the basis of the proposed approach.

Bibl. 12, il. 2.

UDK 621.3

Tonkoshkur A.S., Nakashidze L.V., Lyagushyn S.F. **Schemotechnical technologies for reliability of solar arrays** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.95 - 107.

Regime factors leading to the failures of photovoltaic units of solar arrays and their components, as well as circuitry methods and means that allow solving the problems of ensuring their reliability are analyzed.

Prospects for improving the efficiency of circuit methods of protection against electrical thermal overloads are pointed out, in particular, based on the use of new elements of protection against current overloads on the basis of carbon-polymer self-resetting fuses.

Bibl. 28, fig.7.

UDK 621.771

Balakin V.F., Ugryumov Yu.D., Bogdan D.A., Donskoy I.V., Kondratiev Yu.A., Kadilnikov S.V. **Development of pipe production AT «ИНТЕРПАЙП НТЗ»** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.108 - 112.

The main directions of improving the production of pipes on aggregates with pilgrim mills, longitudinal and screw rolling pipes of pipes at «Интерпайп НТЗ».

Ref.4.

UDK 669.02

Ganush V.I., Gunza A. **Safety of the blowing system in the converter** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.113 - 121.

The sequence of analysis of risk at industrial objects is considered. On the example of a system of feeding the blast into an oxygen converter, a failure tree was constructed for one of the factors - the wear of oxygen nozzle nozzles and safety indicators.

Ref.4.

UDK 621.771

Grechany A.N., Vasilchenko T.O., Shevchenko I.A., Kobrin Y.G. **Laying the law of distributing rolling mill elements breakage in order to prevent them** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.122 - 127.

The factors of influence of bronze liners on reliability of work and durability of spindle devices are considered. Based on the statistical data, the law of the distribution of the operating time to failure has been obtained, and a method has been developed for establishing the distribution of the random wear values of the bronze liners of the rolling mill 1680. This will allow us to predict the technical condition of the liners and all the details of the rolling mill 1680 as a whole, during the entire operation, for timely repairs.

Ref. 5.

UDK 004.8

Titov K.Y. **Development of a semantic filter based on personal preferences of the user** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.128 - 138.

The goal of this paper is to study the methods used in modern recommender systems, and to develop the service for filtering the news information.

Ref. 5.

UDC 620.179

Fedorovich A. **Investigation of the potential possibilities for the classification of entropy samples of random variables** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.139 - 144.

The problem of analysis of reference samples of entropy transformations and an estimation of the working capacity of the method of classification of multiparameter objects from experimental measurements are considered. By carrying out computational experiments, the possibility of classifying multiparameter objects under different volumes of initial data was investigated. The probabilities of making the right decisions depending on the volume of measurements and a priori knowledge about the object of control are calculated.

Bibl.7, ill.1.

UDC 37.07

Iskandarova-Malaya A.A. **Analysis of quality of secondary education** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.145 - 154.

Within the context of the educational context, the key objective is to assess the acquired skills of students and to cluster students according to their ability level. In this regard, it is necessary to take into account the relevant element from which the possible impact on schoolchildren follows. To this end, a methodological tool that takes into account the multi-level structure of the data (i.e., pupils in schools), respectively, is provided. This approach is to group both pupils and schools into homogeneous classes of abilities and effectiveness, and also to assess the impact of certain characteristics of students and schools on the probability of belonging to classes.

Bibl.14.

UDC 004.942:519.816

Yevtushenko G.L., Yevtushenko O.I., Kuznetsov V.I. **Multiple-criteria comparative analysis of tools for software automation testing** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.155 - 160.

The most popular tools for software automation testing of desktop and web-applications are analyzed in this paper. Analytic hierarchy process "in absolute measurements" (normative AHP, AHP-N) is chosen to construct the rating of the considered tools.

Ref. 14, fig. 4, Tab. 1.

UDC 004.896: 621.396

Lushchenko AA, Seliverstova T.V. **Information system GPS navigation for monitoring the condition of agricultural aggregates** // System technologies. N 4(117) - Dnipro, 2018.- P.161 - 165.

The article describes the requirements for an information system for monitoring mobile objects and examining their behavior using GPS. The stack of information technologies that can be used in the development of the GPS monitoring system is considered. The obtained results can be used in the process of developing an information system for monitoring mobile objects and investigating their behavior using GPS.

Bibl.4.



**АВТОРЫ ВЫПУСКА**

**Баглай Андрей Васильевич** - директор ДП «ДИАМЕХ-УКРАИНА».

**Веренев Валентин Владимирович** - доктор технических наук, Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ.

**Власов Андрей Александрович** - старший преподаватель, кафедра металлургического оборудования, Запорожская государственная инженерная академия, Украина.

**Зданевич Сергей Владимирович** - к.т.н., доцент, кафедра прикладной механики, Национальная металлургическая академия Украины.

**Капітонов Олександр Георгійович** - доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет».

**Узлов Костянтин Іванович** - доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства НМетАУ.

**Дзюбіна Аліна Валентинівна** - спеціаліст, аспірант НМетАУ.

**Романова Наталія Сергіївна** - кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства НМетАУ.

**Мовчан Олександр Володимирович** - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НМетАУ.

**Надточий А.А.** – к.т.н., доцент кафедри ТМП и Х, НМетАУ.

**Великонская Н.М.** – ст. преподаватель кафедры ТМП и Х, НМетАУ.

**Піптюк Віталій Петрович** - старший науковий співробітник, Кандидат технічних наук, Інститут чорної металургії НАН України.

**Тогобицька Дар'я Миколаївна** - старший науковий співробітник, професор, доктор технічних наук, завідувачий відділом фізико-технічних проблем металургії, Інститут чорної металургії НАН України.

**Логозинський Ігор Миколайович** - заступник технічного директора, ПрАТ "Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" ім. А.М. Кузьміна".

**Левін Борис Арнович** - начальник технічного відділу, ПрАТ "Електрометалургійний завод "Дніпроспецсталь" ім. А.М. Кузьміна".

**Петров Олександр Пилипович** - науковий співробітник, Інститут чорної металургії НАН України.

**Греков Станислав Викторович** - науковий співробітник, Інститут чорної металургії НАН України.

**Снігура Ірина Романівна** - аспірант, молодший науковий співробітник, Інститут чорної металургії НАН України.

**Редчиц Дмитрий Александрович** - к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

**Белоусова Татьяна Петровна** - старший преподаватель кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

**Выгоднер Инна Валентиновна** - старший преподаватель кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

**Ляхович Татьяна Павловна** - старший преподаватель кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

**Моисеенко Светлана Викторовна** - к.т.н., доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

**Баклан Ігор Всеволодович** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації і управління, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

**Баришич Лука** – студент кафедри АСОІУ Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

**Дідик Богдан** – студент кафедри АСОІУ Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

**Островська Катерина Юріївна** – к.т.н., доцент кафедри Інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

**Михальов Олександр Ілліч** - д.т.н., професор кафедри Інформаційних технологій та систем, НМетАУ.

**Черевко Андрій Ігорович** – магістрант кафедри Інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

**Іващенко Валерій Петрович** - д.т.н., проф., перший проректор НМетАУ.

**Швачич Геннадій Григорович** - д.т.н., проф. зав. каф. ПМ та ОТ, НМетАУ.

**Іващенко Олена Валеріївна** - ст.викл. каф. документознавства та інформаційної діяльності, НМетАУ.

**Бусигін Володимир Володимирович** – магістр, НМетАУ.

**Tonkoshkur Alexander Sergeevich** - doctor of physical and mathematical sciences, professor, Oles Honchar Dnipro National University.

**Nakashidze Lilia Valentinovna** - PhD in technical sciences, Director of Research Institute of Power Engineering, Oles Gonchar Dnipro National University.

**Lyugushin Sergey Fedorovich** - PhD in physical and mathematical sciences, associate professor, Oles Honchar Dnipro National University.

**Балакин Валерий Федорович** – заведующий кафедрой технологического проектирования Национальной металлургической академии Украины (НМетАУ), доктор технических наук, профессор.

**Угрюмов Юрий Дмитриевич** – старший научный сотрудник НМетАУ, кандидат технических наук.

**Богдан Дмитрий Алексеевич** – директор по технологии и качеству ПАО «Интерпайп НТЗ».

**Донской Иван Владимирович** – начальник ЦЗЛ ПАО «Интерпайп НТЗ».

**Кондратьев Юрий Анатольевич** – ведущий инженер ПАО «Интерпайп НТЗ», кандидат технических наук.

**Кадильников Святослав Витальевич** – аспирант кафедры технологического проектирования, НМетАУ.

**Гануш Василь Іванович** - старший викладач кафедри Машин та агрегатів металургійного виробництва, НМетАУ.

**Гунза Альберто Да Сільва** - студент групи МБ01-14-1, кафедри Машин та агрегатів металургійного виробництва, НМетАУ.

**Гречаний Олексій Миколайович** – аспірант, Національна металургійна академія України.

**Васильченко Тетяна Олександрівна** – к.т.н., доцент кафедри «Металургійне обладнання», Запорізька державна інженерна академія.

**Шевченко Ірина Артурівна** – к.т.н., доцент кафедри «Металургійне обладнання», Запорізька державна інженерна академія.

**Кобрін Юрій Григорович** – аспірант, Національна металургійна академія України.

**Тітов К.Ю.** - аспірант кафедри систем та засобів штучного інтелекту, ХНУРЕ.

**Федорович Анна Игоревна** - к.т.н., доцент кафедри Радиоэлектронной автоматизации, физико-технического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

**Іскандарова-Мала А.О.** - аспірант кафедри програмного забезпечення систем, Дніпровський державний технічний університет.

**Євтушенко Галина Львівна** - к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем НМетАУ.

**Євтушенко Олександр Іванович** - студент кафедри інформаційних технологій та систем НМетАУ.

**Кузнецов Володимир Іванович** - к.т.н., с.н.с., доцент кафедри інформаційних технологій та систем НМетАУ.

**Луценко Олександр Олександрович** - студент групи КН904-11-М, магістр спеціальності 122 – “Комп’ютерні науки та інформаційні технології», спеціалізація – «Інформаційні технології проектування», кафедра інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна** - к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.