

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ АГРЕГАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ PVD

Анотація. В роботі створена імітаційна модель агрегації кластерних утворень при формуванні плівок за технологією Physical Vapor Deposition.

Ключові слова: комп'ютерна модель, агрегація, потенціал Морзе, хаотичні коливання.

Вступ

Порівняння різних технологій формування покриттів, показує, що постійно зростає роль фізичних методів осадження плівок (Physical Vapor Deposition) з атомизованих потоків речовини в паровій або газовій фазі. Методи PVD дозволяють одержувати багатошарові покриття, і покриття із градієнтом уздовж підкладки або по товщині покриття, що досягається за рахунок підвищення енергії часток, а не загальної температури [1].

Технологічно процес PVD реалізується в три етапи:

1. Дисоціація ісходної речовини та утворення її часток [2]..
2. Агрегація часток та формування кластерних утворень.
3. Осадження кластерних утворень та адгезія з поверхнею.

Таким чином, моделювання процесів дисоціації та агрегації методами молекулярної динаміки дає можливість дослідити (прогнозувати) умови створення наноструктурних утворень за технологією PVD.

Постановка задачі

Метою роботи є створення імітаційної моделі агрегації за принципами молекулярної динаміки для дослідження руху та взаємодії часток в обмеженому просторі за умов вприску часток інертного газу.

Основна частина

Комп'ютерне моделювання є ефективним методом дослідження складних систем. При цьому імітаційне моделювання виходить з того, що закони взаємодії та руху часток системи відомі апіорі, а результатом моделювання є поведінка всієї системи. У випадку стохас-

тичної або хаотичної поведінки в якості оцінки критерія адекватності моделі має розглядатися не точність прогнозу, а її статистичний аналог – доствірність [3].

Прийmemo опис динаміки окремої частки системи у вигляді класичної гамільтонової моделі [4]:

$$H = \frac{p^2}{2m} + \Pi(r) - \mu(r)u(t), \quad (1)$$

де $r(t)$ - відстань між частками, m - маса окремої частки, $\Pi(r)$ - потенціал взаємодії між частками, $\mu(r)$ - дипольний момент, $u(t)$ - зовнішнє керуюче поле.

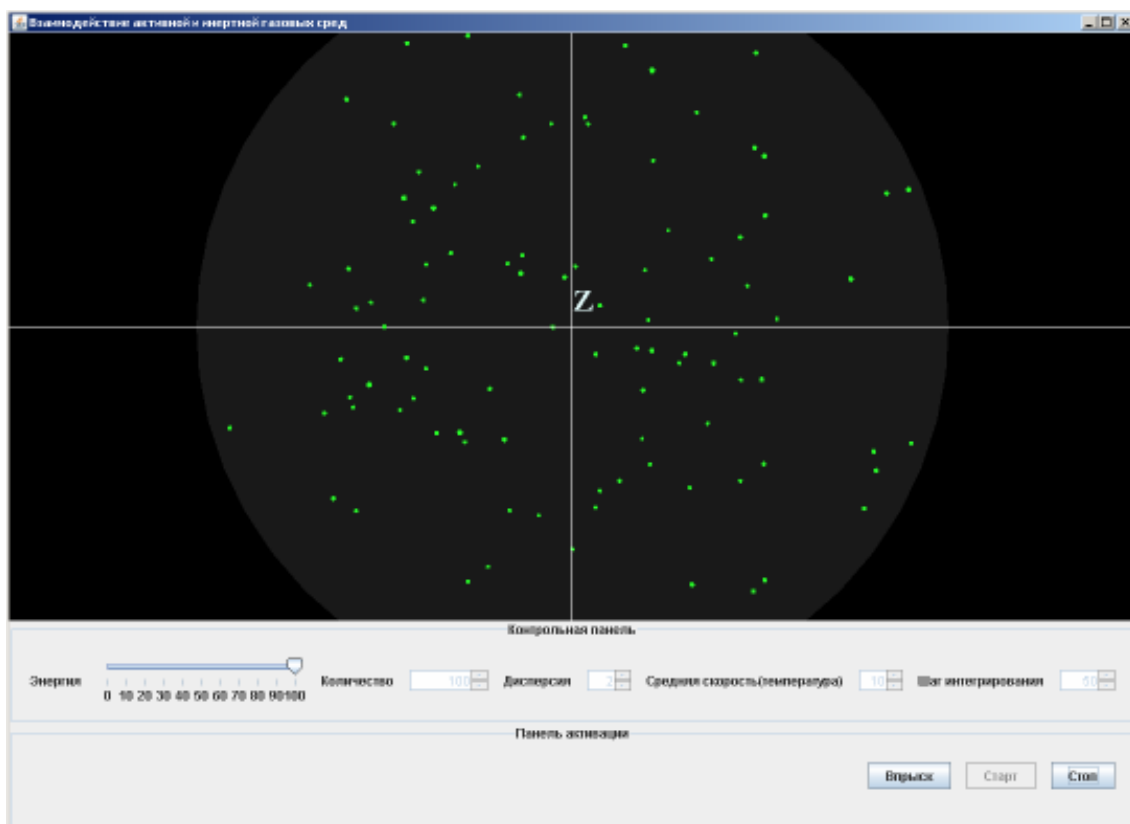


Рисунок 1 – Початок моделювання
(хаотичний рух часток першого виду)

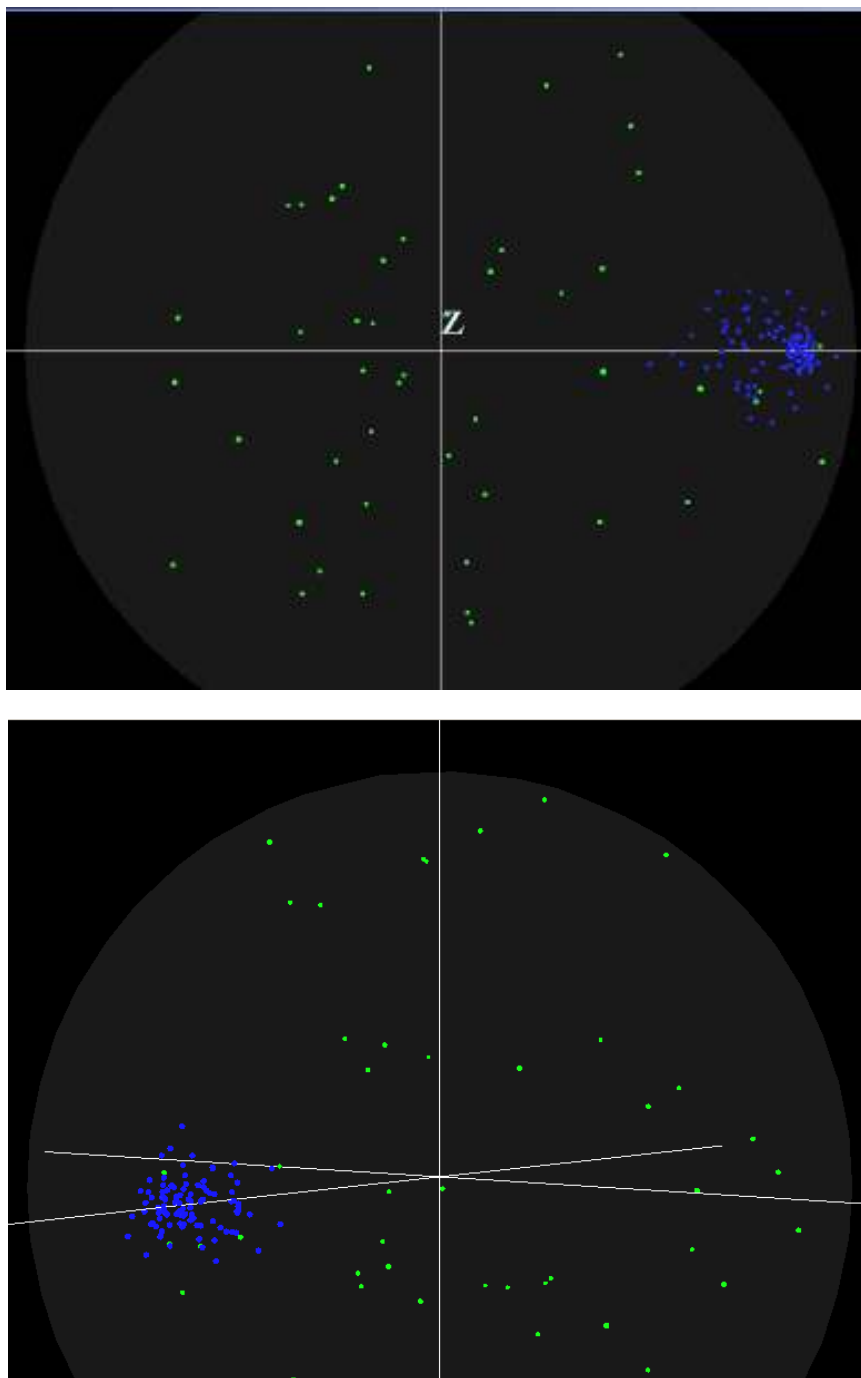


Рисунок 2 – Впрыск инертных частиц
(под разными углами наблюдения)

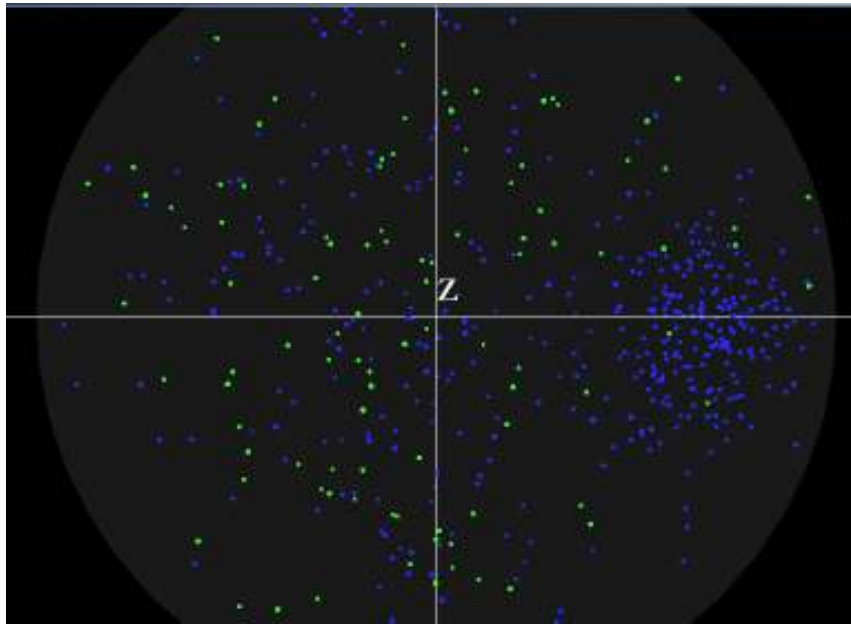


Рисунок 3 – Дифузія інертних часток

Для опису взаємодії між частки системи в роботі використано потенціал Морзе:

$$P(r) = D(1 - e^{-a(r-a)})^2 - D = D(e^{-2a(r-a)} - 2e^{-a(r-a)}), \quad (2)$$

де D – енергія зв'язку (дисоціації), a – рівноважна відстань між частками. Дипольний момент

$$\mu(r) = A r e^{-\alpha r^4}, \quad (3)$$

в роботі розглянуто за умови малого значення ξr^4 , тобто у формі:

$$\mu(r) = A r, \quad (4)$$

При цьому рівняння керованих часток системи в формі Лагранжа має вигляд:

$$m\ddot{r} = 2aD(e^{-2a(r-a)} - e^{-a(r-a)}) + Au(t). \quad (5)$$

В роботі [5] показано, що осцилятор Морзе (5) за певних умов зовнішнього впливу $u(t)$ має хаотичний режим руху. Існування цього режиму пов'язано із газовою фазою (станом) речовини.

Рівняння (5) припускає, що рух часток системи одновимірний, та орієнтован уздовж силових ліній керуючого зовнішнього поля, тобто ефектами зміни орієнтації й обертання молекули зневажається. При цьому слід зазначити, що модель системи залишається тривимірною.

Крім того, в системі існують особливі частки, що виконують роль інертного газу. Ці частки взаємодіють між собою та першим ви-

дом часток за принципом абсолютно пружного зіткнення, та з'являються в обмеженому просторі системи за рахунок вприску у точці кордону, що вказаній користувачем. Цей потік, маючи низьку температуру, та виконує роль стоку енергії для часток першого виду.

Всі частки мають однаковий розподіл Больцмана.

На початку моделювання (рис. 1) присутні лише частки першого виду, що здійснюють хаотичні коливання та мають енергію, яка перевищує енергію дисоціації, і тому не взаємодіють між собою (поводять себе як інертні частки).

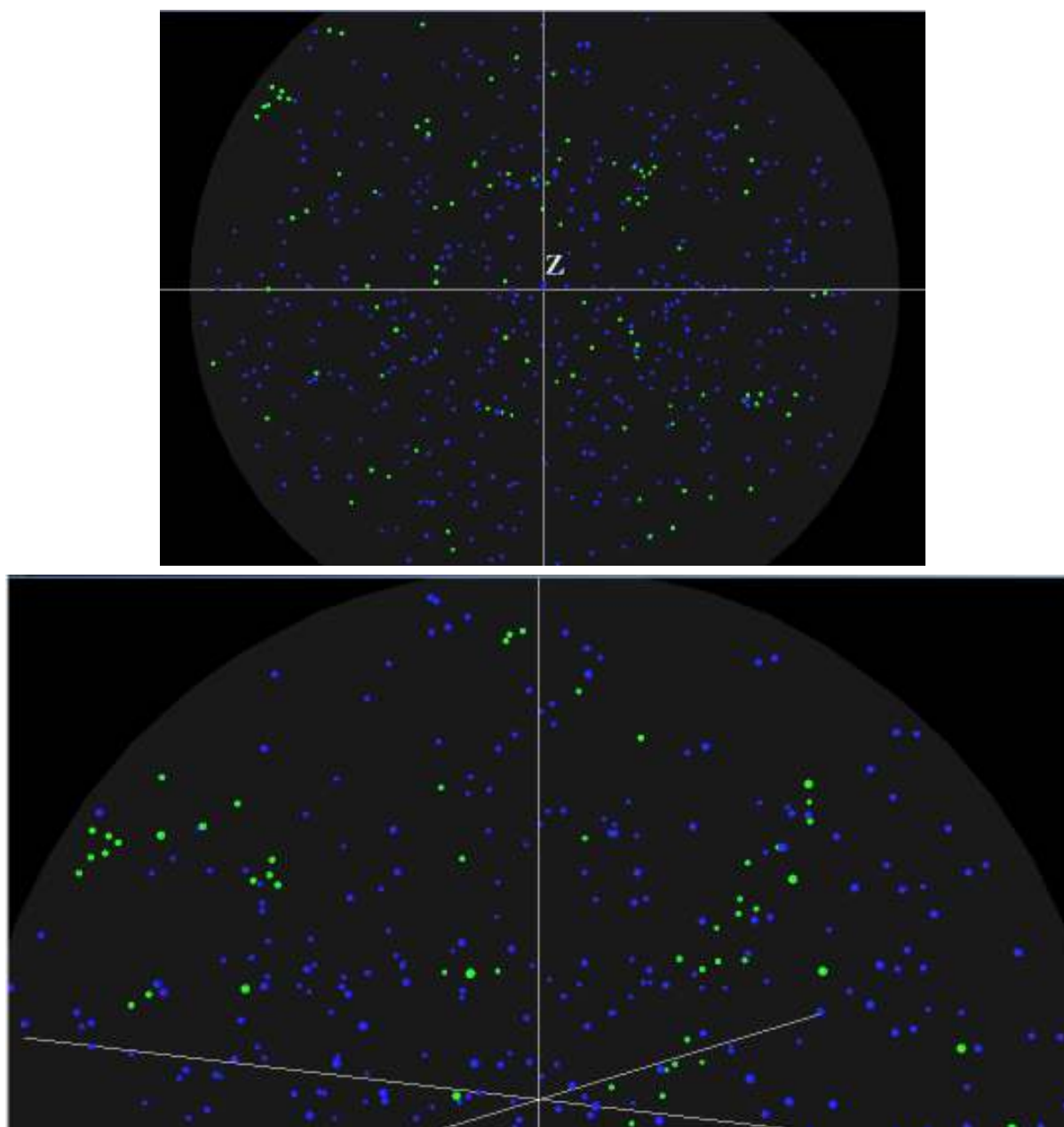


Рисунок 4 – Створення кластерів
(спостереження під різними кутами та масштабами)

Висновки

Дослідження руху окремих часток, що входять до складу утворених кластерів, мають характер полігармонійних коливань навідміну від вільних, які здійснюють хаотичний рух. Таким чином, формування кластерних структур пов'язано з виникненням нового фазового стану системи.

Параметр впливу $u(t)$ однаковий на кожну окрему частку (5) та обумовлен тиском інертного газу та швидкістю його потрапляння в об'єм системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Суздалев И.П.. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров наноструктур и наноматериалов. – М.: КоаКнига, 2006, – 592с.
2. Деревянко А.И. Determine the conditions of dissociation in pvd tecnology// Produkcja i zarzadzanie w przemysle. Seria Metalurgia, nr 56. Politechnika czestochowska, 2014. – p.359-364.
3. Самарский А.А., Калиткин Н.Н. «Математическое моделирование» - М.: Наука, 1989, - 19с.
4. Zaslavsky G. M. The physics of chaos in hamiltonial systems. – London.: Imperial College Press, 2007, - 329p.
5. Lie G., Yuan J-M. Bistable and chaotic behavior in a damped driven Morse oscillator – J.Chem.Phys., vol.84, No.10, 1986, 5486-5493.

А.Ю. Зимогляд, А.И. Гуда, А.А. Журба, В.В. Ковтун

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

Аннотация. Произведено исследование зависимости коэффициента трения металлической пленки, к ее фрактальной размерности.

Ключевые слова: фрактальная размерность, фрактальный анализ, вакуум, металлические пленки, термическое нанесение в вакууме.

Введение и постановка задачи

Термическое напыление металлических пленок в вакууме применяется для нанесения слоев металлизации. Термическое напыление активно применяется в микроэлектронике и оптике. Было выявлено отличие в цвете поверхности пленок, от вакуума при нанесении пленок, на основании чего было принято решение изучить структуру и физические свойства этих пленок.

Цели

Целью данной работы является изучение влияния фрактальной размерности структуры металлических пленок на коэффициент трения.

Основная часть

Для получения функциональных покрытий, применяют достаточно обширный диапазон методов, как химических, так и физических. С помощью этих методов достигаются определенные свойства покрытий. Примером могут служить отражающие и просветляющие покрытия в оптике, проводящие и диэлектрические покрытия в электронике, жаростойкие покрытия в машиностроении. Данный список весьма обширен, и можно найти применение функциональных тонкопленочных покрытий почти везде от медицины до космических аппаратов.

Как метод получения функционального покрытия, было выбрано термическое напыление металла в вакууме. Данный метод характеризуется высокой скоростью осаждения металла, простотой, а

также возможностью получения толстых покрытий. К слову сказать, это один из первых методов получения металлических покрытий. Данный метод открыл Фарадей в 1887 году, при проведении эксперимента по пропусканию больших токов через проволоку в атмосфере инертного газа.

Напыление производилось в вакуумной камере ВУП – 4, металлом был выбран цинк, из – за его физико – химических свойств. Конденсация паров металла выполнялась на стеклянную подложку, которая предварительно проходила химическую очистку, с дальнейшей ионной очисткой. Все стеклянные подложки располагались на одном расстоянии от тигеля испарителя, выдерживалось одинаковое время испарения металла, изменялось только давление при нанесении.

После выполнения серии напыления металла на стеклянные подложки, было обнаружено отличие в структуре пленок. Отличие проявлялось в цвете поверхности пленки, который менялся от матового до зеркального (рис.1). Исходя из литературы по напылению металлов в вакууме, если произвести процесс напыления при недостаточном вакууме, полученное металлическое покрытие будет, как правило, неоднородным, пористым, возможно из – за газовых включений. Цвет покрытия будет отличаться от чистого металла, и поверхность будет матовой, вне зависимости от качества поверхности подложки. Так же возможно образование оксидов, нитридов и гидроксидов.



Рисунок 1 – Фотографии пленок нанесенных при разном давлении

Как писалось выше, недостаточный вакуум влияет на структуру полученной пленки, что и было, замечено в ходе исследования. Для рассмотрения структуры пленки более детально, был применен металлографический иммерсионный микроскоп МИМ – 8 М, с боко-

вой подсветкой. При боковой подсветке сильнее видна структура металлической пленки (рис.2).

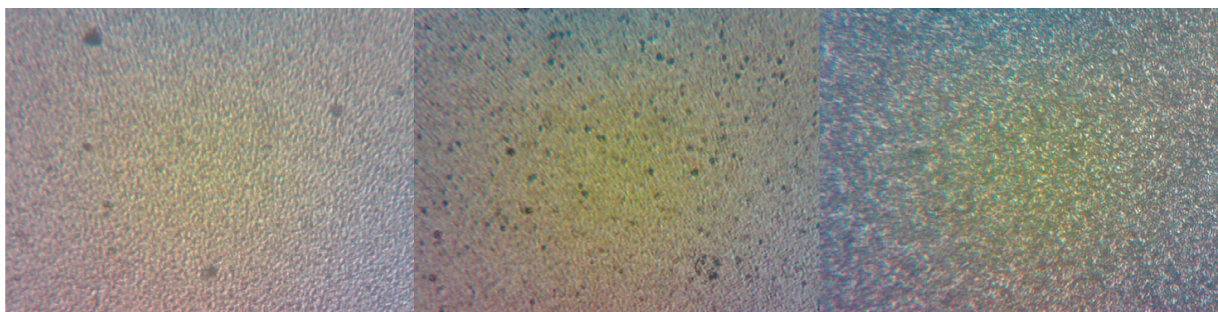


Рисунок 2 – Структура поверхности пленок слева направо при:
0,8 Па, 1,3 Па, 2,1 Па

Проводя визуальный анализ поверхности, с помощью микроскопа была замечена разница, было видно, что чем выше давление при нанесении, тем структура сложнее. И наоборот, чем ниже вакуум при нанесении, тем структура проще и однороднее.

Для связи структуры пленок с физическими свойствами было принято решение произвести замер на коэффициент трения пленок. Каждую пленку подвергали замеру на трение 5 раз, а потом брали среднее арифметическое. Потом по полученной связи давления и коэффициента трения был построен график (рис.3).

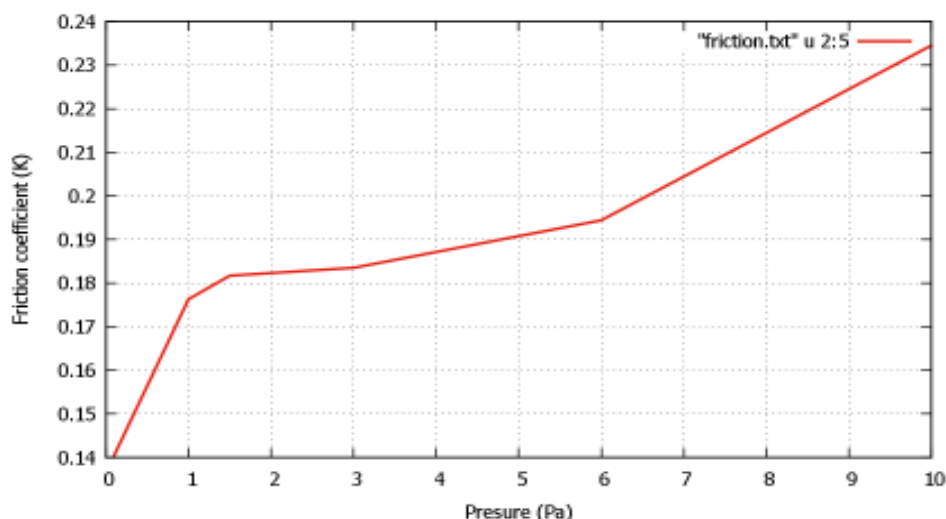


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения пленки от давления

Поскольку при разной структуре пленок, был разный коэффициент трения. Было принято решение изучить структуру этих пленок, с помощью методов обработки изображений.

Одним из методов обработки изображений, является метод нахождения фрактальной размерности. Данный метод, нашел свое при-

менение в материаловедении, при исследовании металлов. Поэтому его применение в исследовании цинка, весьма оправданно.

Для определения фрактальной размерности применялся алгоритм Box counting. Фрактальный анализ проводился в 2 средах в AnalysisFS и Imghead (рис.4,5).

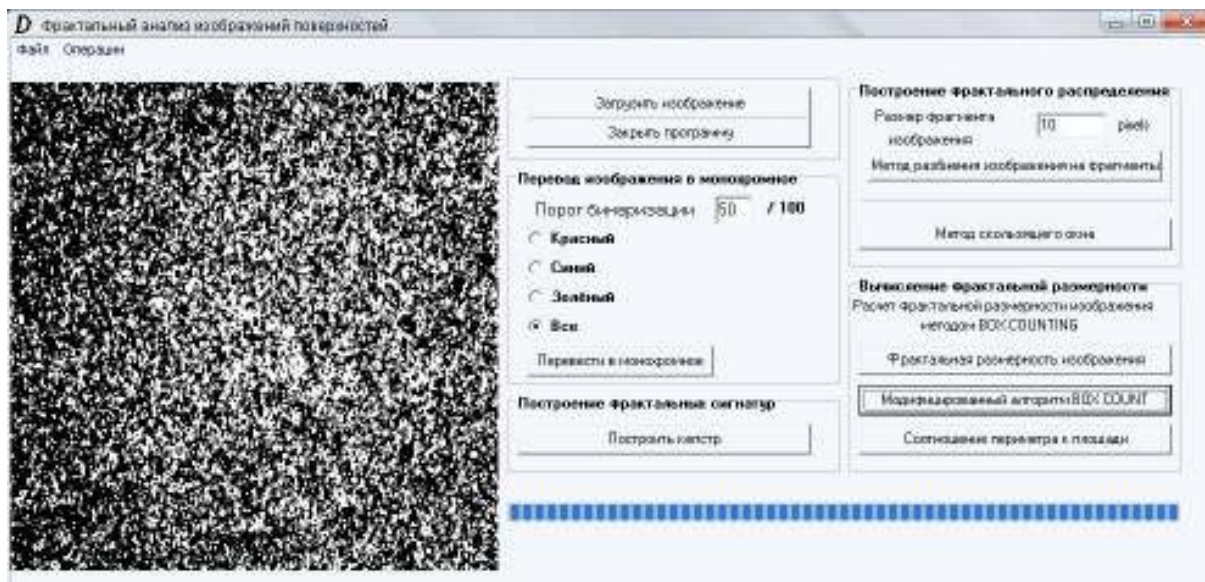


Рисунок 4 – Определение фрактальной размерности в среде AnalysisFS

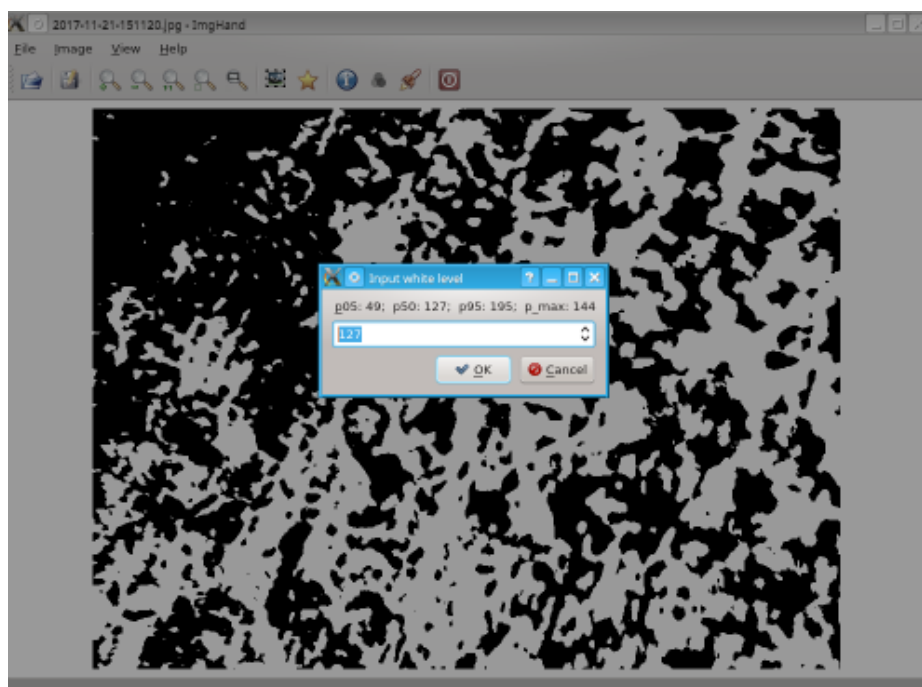


Рисунок 5 – Определение фрактальной размерности в среде Imghead

По полученным фрактальным размерностям каждой пленки был построен график. В этом графике была показана зависимость коэффициента трения к фрактальной размерности (рис.6).

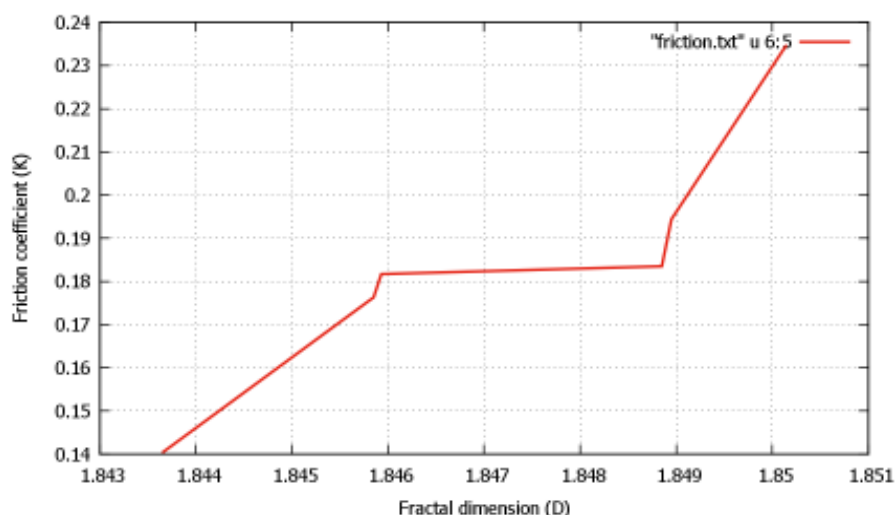


Рисунок 6 – Зависимость фрактальной размерности к коэффициенту трения

Вывод

Было установлена связь между фрактальной размерностью и коэффициентом трения полученных пленок. Так же было замечено, что давление при нанесении металлических пленок может влиять на функциональные свойства пленки, такие как коэффициент трения. Следовательно, можно создать покрытие с заданным коэффициентом трения, путем контроля давления при нанесении. Данные требуют дополнительного изучения, для определения закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок / Б.С. Данилин // Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
2. Попов В. Ф. Процессы и установки электронно-ионной технологии/ В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин // М.: Высш. шк., 1988. — 255 с.
3. Виноградов М.И. Вакуумные процессы и оборудование ионно - и электронно-лучевой технологии/ М.И. Виноградов, Ю.П. Маишев // М.: Машиностроение, 1989. — 56 с.
4. Mattox Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing: Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control / Mattox, M. Donald // Westwood, N.J.: Noyes Publications, 1998 — 944p.
5. Powell Vapor Deposition. The Electrochemical Society series / F. Carroll, H. Joseph, Oxley, J. M. Blocher // New York: Wiley, 1966— 158 p.
6. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогов. // М.: Наука, 1994. — 382 с.
7. Бунин И.Ж. Концепция фрактала в материаловедении. / И.Ж. Бунин, А.Г. Колмаков, В.Г. Встовский, В.Ф. Тереньтьев // Материаловедение. — 1999. — № 2 . — С. 19 – 26.

Д.Н. Тогобицкая, О.В. Кукса, А.В. Пучиков, О.В. Узлов, А.Н. Хулин

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИН КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК
ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ A_{c1} , A_{c3} ДЛЯ
МАЛОУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ
МЕТОДОМ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ МЕЖАТОМНОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Аннотация. Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать температуру критических точек фазовых превращений A_{c1} и A_{c3} для низкоуглеродистых конструкционных сталей. Представлен сравнительный анализ с наиболее известными зависимостями других авторов. Подтверждена адекватность полученных моделей с возможностью их использования для расчета значений A_{c1} и A_{c3} низкоуглеродистых конструкционных сталей для оперативного расчета и интеграции моделей в АСУ ТП.

Ключевые слова: состав, свойства, параметры межатомного взаимодействия, температура критических точек, фазовые превращения, прогнозирование.

Введение. Наиболее характерными параметрами при нагреве стали являются критические точки фазовых превращений A_{c1} и A_{c3} . В соответствии с величинами их температурных значений назначают режимы термической обработки для придания сталям необходимых эксплуатационных свойств.

Для доэвтектоидных сталей (содержание углерода в стали менее 0,8%) обычно выбирают температуру закалки по формуле $A_{c3} + 30...50^{\circ}\text{C}$. В некоторых случаях доэвтектоидные стали закалывают в интервале температур между A_{c1} и A_{c3} . При этом структура стали обычно состоит из мартенсита и нерастворенного феррита. Такой процесс называется неполной закалкой и теоретически является браком. На практике такую схему используют, чтобы снизить коробление деталей или исключить трещинообразование в высоколегированных сталях. Заэвтектоидные стали обычно нагревают под закалку до тем-

ператур $Ac_1 + 30...50^\circ C$. В этом случае после закалки структура стали состоит из мартенсита и вторичного нерастворённого цементита, который повышает твердость и износостойкость изделий.

Наряду с экспериментальными методами (например, с дилатометрическими) все чаще для расчетов критических точек Ac_1 и Ac_3 используются эмпирические уравнения. Математическая обработка репрезентативной выборки экспериментальных данных дает возможность построения моделей, связывающих температуры критических точек с химическим составом легированных сталей. Обширный экспериментальный материал по показателям Ac_1 и Ac_3 можно найти в справочной литературе по термической обработке металлов [1-8].

Из отечественных исследователей наиболее часто используются зависимости (1,8) полученные Винокуром Б.В., из зарубежных – зависимости (5,10), полученные Яцеком Трзаском [7], которые активно используются учеными различных стран Европейского Союза. Ниже представлены некоторые зависимости, получившие наибольшее распространение:

$$Ac_1 = 723 - 7,08Mn + 37,7Si + 18,1Cr + 44,2Mo - 8,95Ni + 50,1V + 21,7Al + 3,18W + 297S - 830N - 11,5CSi - 14MnSi - 3,1CrSi - 57,9CMo - 15,5MnMo - 5,28CNi - 6MnNi + 6,77SiNi - 0,8CrNi - 27,4CV + 30,8MoV - 0,84CrCr - 3,46MoMo - 0,46NiNi - 28VV$$

(1) [1];

$$Ac_1 = 723 - 16,9Ni + 29,1Si + 6,83W - 10,7Mn + 16,9Cr + 290As$$

(2) [2];

$$Ac_1 = 712 - 17,8Mn - 19,1Ni + 20,1Si + 11,9Cr + 9,8Mo$$

(3) [3];

$$Ac_1 = 754,83 - 32,25C - 17,76Mn + 23,32Si + 17,3Cr + 4,51Mo - 15,62V$$

(4) [4];

$$Ac_1 = 742 - 29C - 14Mn + 13Si + 16Cr - 17Ni - 16Mo + 45V + 36Cu$$

(5) [7];

$$Ac_1 = 739 - 22C - 7Mn + 2Si + 14Cr + 13Mo - 13Ni$$

(6) [8];

$$Ac_3 = 912 - 370C - 27,4Mn + 27,3Si - 6,35Cr - 32,7Ni + 95,2V + 70,2Ti + 72,0Al + 64,5Nb + 5,57W + 332S + 276P - 485N - 900B + 16,2CMn + 32,3CSi + 15,4CCr + 48,0CNi + 4,8MnNi + 4,32SiCr - 17,3SiMo - 18,6SiNi + 40,5MoV + 174CC + 2,46MnMn - 6,86SiSi +$$

$$0,322\text{CrCr} + 9,9\text{MoMo} + 1,24\text{NiNi} - 60,2\text{VV}$$

(7) [1];

$$A_{c_3} = 910 - 203\sqrt{C} + 44,7\text{Si} - 15,2\text{Ni} + 31,5\text{Mo} + 104\text{V} + 13,1\text{W} - 30\text{Mn} + 11\text{Cr} + 20\text{Cu} - 700\text{P} - 400\text{Al} - 120\text{As} - 400\text{Ti}$$

(8) [2];

$$A_{c_3} = 871 - 254,4\sqrt{C} - 14,2\text{Ni} + 51,7\text{Si}$$

(9) [3];

$$A_{c_3} = 925 - 219 - 7\text{Mn} + 39\text{Si} - 16\text{Ni} + 13\text{Mo} + 97\text{V}$$

(10) [7];

$$A_{c_3} = 902 - 255C - 11\text{Mn} + 19\text{Si} - 5\text{Cr} + 13\text{Mo} - 20\text{Ni} + 55\text{V}$$

(11) [8];

Результаты исследований. В настоящей работе проведен сравнительный анализ моделей, разработанных по методике ИЧМ, на основе параметров межатомного взаимодействия [9], с наиболее известными моделями расчета A_{c_1} и A_{c_3} . Исследование проводилось на данных низкоуглеродистых конструкционных низко- и сложнолегированных сталей. Особое внимание уделено конструкционной стали 09Г2С, которая обладает спектром важных потребительских свойств, благодаря которым данная сталь получила широкое распространение и признание [6].

С целью выявления основных закономерностей, влияния состава сталей на критические точки фазовых превращений (A_{c_1} и A_{c_3}) были сформированы выборки на основе справочных данных [1-5]. Для сталей конструкционных низколегированных для сварных конструкций, а также для конструкционных сложнолегированных низкоуглеродистых сталей (фрагмент выборки – табл. 1) выполнен анализ влияния химического состава на исследуемые величины путем его «свертки» на основе параметров межатомного взаимодействия. В частности: среднее межъядерное расстояние – d ; градиент изменения радиуса иона при изменении его заряда – tga ; физико-химический эквивалент зарядового состояния – ZY и его микронеоднородности – ΔZY , а также параметр направленной зарядовой плотности – ρ_l .

Химические составы низко- и сложнолегированных
конструкционных сталей

	C	Si	Mn	Cr	Cu≤	Ni	P≤	S≤	V	Ac ₁	Ac ₃
09Г2	0,115	0,27	1,6	0,2	0,2	0,2	0,03	0,035	-	720	830
09Г2С	0,115	0,65	1,5	0,2	0,2	0,2	0,03	0,035	-	725	860
15Г2СФД	0,15	0,55	1,5	0,2	0,2	0,2	0,038	0,048	0,7	720	850
16Г2АФ	0,16	0,45	1,5	0,3	0,2	0,2	0,038	0,048	0,11	723	907
18Г2АФпс	0,16	0,17	1,5	0,25	0,25	0,25	0,03	0,03	0,12	720	880
20ХГ	0,16	0,22	1,12	0,99	0,2	0,12	0,03	0,03	-	750	845
12ХН2	0,11	0,3	0,5	0,64	0,2	1,59	0,035	0,035	-	735	850
12ХН3	0,11	0,13	0,38	0,87	0,3	3,26	0,025	0,025	-	695	800
12Х1МФ	0,13	0,32	0,63	0,95	0,2	0,3	0,03	0,025	0,19	765	885

После сопоставительного анализа данных были получены обобщающие модели (12, 13), позволяющие прогнозировать величину критических точек Ac₁ и Ac₃ как для конструкционных низколегированных сталей сварных конструкций, так и для сложнолегированных низкоуглеродистых сталей:

$$Ac_1 = 5586,3 - 62464,7tg\alpha - 196,283\Delta ZY + 186,542Rol \quad (r = 0,80) \quad (12);$$

$$Ac_3 = 8073,143 - 88724,4tg\alpha - 623,025ZY + 484,948d \quad (r = 0,71) \quad (13);$$

По полученным выше моделям (12-13) для репрезентативного массива промышленных данных ПАО "ДМК" (сталь 09Г2С) рассчитаны температуры фазовых превращений Ac₁ и Ac₃. Разброс значений показал, что температура фазового превращения Ac₃ для стали 09Г2С изменяется в следующих диапазонах: 845–870°C при заявленных экспериментальных 860°C. Соответственно, для Ac₁: 721–729°C при заявленных 725°C, что свидетельствует о стабильном химическом составе.

Как следует из рис. 1, зависимости для расчета Ac₁ (1) и Ac₃ (7) обладают большей погрешностью данных и несколько завышены для Ac₃. Аналогично, несколько завышены значения Ac₁ и Ac₃ у зависимостей, предложенных J. Trzaska и Hougardy. При оценке Σпогрешн.% для объединенного массива мало- и сложнолегированных низкоуглеродистых конструкционных сталей наименьшей погрешностью при расчете величины Ac₁ обладает модель (12): 1,8016.

Σпогрешн.% по моделям Винокура (1), Trzaska (5), Hougardy (6) для Ac_1 соответственно составила: 2,1157; 2,4675; 1,9147. При аналогичной оценке Σпогрешн.% для расчета величины Ac_3 по моделям (13), Винокура (7), Trzaska (10), Hougardy (11) Σпогрешн.% соответственно составила: 2,687; 2,325; 2,440; 2,273.

В целом, все модели, представленные на рис.1, достаточно точны для практического использования. В то же время, предложенные нами модели (12,13) учитывают изменения в многокомпонентном химическом составе малоуглеродистых сталей и открывают возможность оценки влияния различных легирующих и микролегирующих добавок на величину критических точек Ac_1 и Ac_3 при модификации сталей.

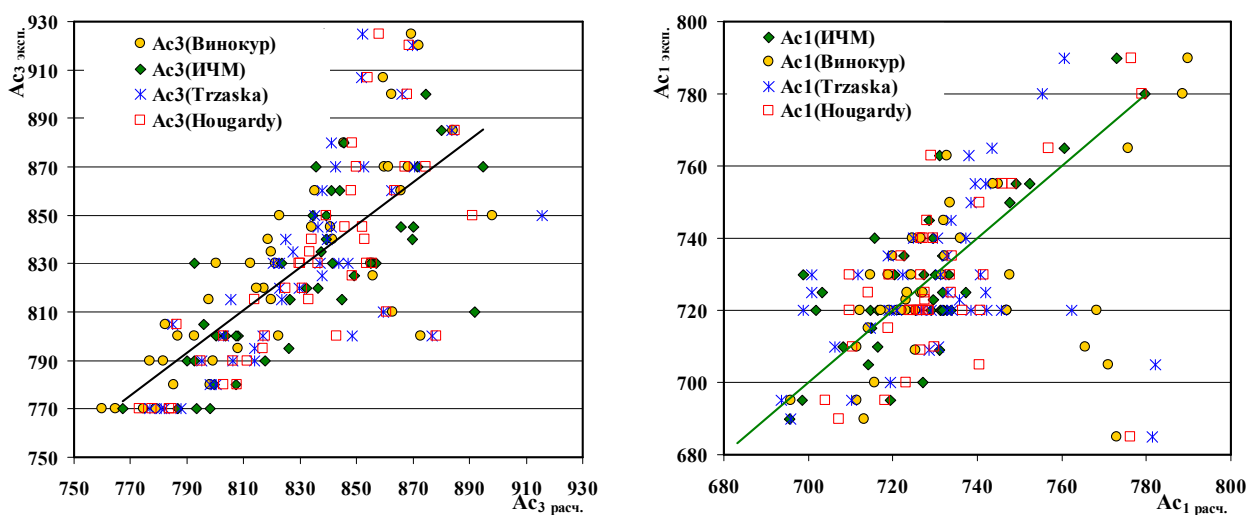


Рисунок 1 – Соотношение экспериментальных и расчетных значений Ac_1 и Ac_3 по моделям ИЧМ (12,13), Винокура (1,7), Trzaska(5,10), Hougardy(6,11), для малоуглеродистых конструкционных сталей

Выводы. На основе представительной выборки данных проведен системный анализ влияния химического состава малоуглеродистых конструкционных сталей на температуру критических точек фазовых превращений Ac_1 и Ac_3 . Высокая информативность параметров межатомного взаимодействия обеспечила высокую точность полученных моделей, которые могут быть использованы для расчета величин критических точек Ac_1 и Ac_3 . Абстрагированность моделей от конкретного химического состава и большая точность по сравнению с аналогами открывает возможность оценки влияния различных легирующих и микролегирующих добавок на величину Ac_1 и Ac_3 при моди-

фикации сталей, а также при их оперативной оценке в системах АСУ ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Винокур Б.В. Структура конструкционной легированной стали. / Б.В. Винокур, В.Л. Пилюшенко, О.Г. Касаткин // -М.: Металлургия. -1973. -215 с.
2. Andrews, K.W. Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. Journal of the Iron and Steel Institute, 203, Part 7, July 1965, 721-727.
3. Barralis, J. & Maeder, G. Мйtallurgie Tome I: Мйtallurgie Physique. Collection Scientifique ENSAM, 1982, 270 p.
4. Kariya, N. High Carbon Hot-Rolled Steel Sheet and Method for Production Thereof. European patent Application EP 2.103.697.A1, 23.09.2009, 15 p.
5. Попов А.А. Изотермические и термомеханические диаграммы распада переохлажденного аустенита /А.А. Попов, Л.Е. Попова// Справочник термиста. –М.: Металлургия. -1965. -496 с.
6. Ю.П. Солнцев, Г.А. Степанов// Конструкционные стали и сплавы для низких температур.
7. J. Trzaska Calculation of critical temperatures by empirical formulae / Arch. Metall. Mater., Vol.61(2016), №2B, p. 981–986
8. Hougardy, H.P. Werkstoffkunde Stahl Band 1: Grundlagen. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1984, p. 229.
9. Приходько Э. В. Эффективность комплексного легирования стали и сплавов / Э. В. Приходько. Киев: Наукова думка.-1995.-292 с.

B.A. Perviy, O.P. Sarychev

INFLUENCE OF THE MAGNUS EFFECT ON THE SPACECRAFT LIFETIME

A mathematical model of the dynamics of a large fragment of space debris in the form of a ball is developed and investigated. The effect of the Magnus force on the spacecraft lifetime at different angular velocity of object rotation, the apogee of the orbit, the mass of the object, and the radius of the sphere were studied. The dependence of the magnitude of this force on various parameters was studied and a conclusion was made about the insignificant effect of the Magnus effect on the orbital lifetime of the object.

Keywords: space debris, debris removal, Magnus effect

Introduction

Technogenic clogging of near-Earth space is an actual problem of modern space exploration. One of the segments of debris are large fragments of space debris: firstly, these are space vehicles that have stopped their active existence (non-functioning), and, secondly, these are the last stages of carrier rockets. One of the ways to deal with large fragments of space debris is non-contact (without mechanical capture) impact with the aim of moving them to lower orbits for further decay due to aerodynamic braking.

In addition to direct influencing in the opposite direction to the satellite's velocity vector, the incoming atmospheric flux can create an additional perturbing force acting in a plane perpendicular to the oncoming stream [1], [2]. Such an aerodynamic force is described in the literature as the Magnus effect. This phenomenon was a subject of great interest in the field of gas physics and is named after Professor Gustav Magnus, who established that there is a lifting force affecting the rotating cylinder placed in the air stream [3]. The Magnus force is a function of the shape, speed of rotation of the object, density and velocity of freestream flow. As the altitude of the orbit decreases, the density of the atmosphere increases, thereby increasing the magnitude of the force.

As a result, this effect can have a significant effect on the motion of space vehicles in the region of low Earth orbits.

In the study [4], an analysis was made of the possibility of using the Magnus effect to maintain the specified orbit of the object at an ultralow (80 km) height, which, in the opinion of the authors, can improve the quality of atmospheric studies within the ionosphere and thermosphere, and also conduct more controlled escape of objects from orbit.

The results of the study [4] showed that for a spherical object weighing 20 kg, the Magnus effect doubles its time in orbit at a perigee altitude of 80 km and an angular velocity of 5000 rpm.

Problem statement

The purpose of this study is to assess the degree of influence of the Magnus effect on the motion of space objects and to establish the possibility of using it for debris removal due to its own rotation at various characteristics of the object and orbital modes.

Major part

Magnus effect and aerodynamic lift power

The Magnus effect arises at a time when the rotating body creates an asymmetrical flow (above and below the body), thereby creating an aerodynamic rise. As the stream flows around the rotating body, a reduced pressure is created on the side where the flow direction coincides with the direction of the angular velocity of the object (Fig. 1) [5].

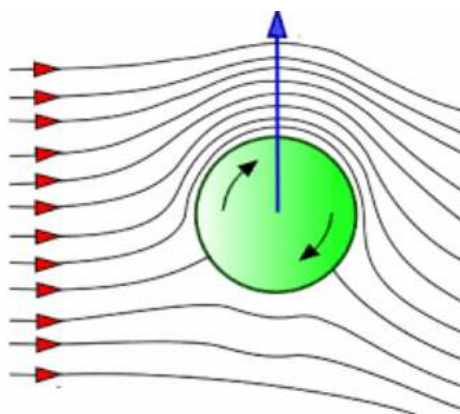


Figure 1 - Magnus force direction in the oncoming stream

The difference in pressure causes a lifting force, which causes the body to move in a direction perpendicular to the oncoming stream. The value and direction of the Magnus force depend on the flux density, and

these dependences are different for the continuum and freestream regimes.

The form of the regime depends on the mean free path of the molecules in the gas. If the mean free path is small in comparison with the dimensions of the body, then the gas can be considered a continuum. With this assumption in mind, the gas density, temperature and velocity of the gas molecules have a definite value at each point of space. In these two regimes, the physics of the flow and the interaction of molecules are different. A widely recognized parameter determining whether the flow is a continuum or a freestream flow is the Knudsen number, which is equal to the ratio of the mean free path to the macroscopic length of the physical object. In other words, the Knudsen number is a measure of the degree of rarefaction of the gas [6]. As the local Knudsen number increases, free-molecular effects become more pronounced and, ultimately, prevail over continual effects. In this study, in contrast to the study [4], the perigee altitude of various orbital regimes exceeds 200 km, so the analysis is under free-molecular conditions of the oncoming flow.

Ashenberg [7] investigated a flat satellite experiencing non-constant aerodynamic perturbations, using the Gauss method for the equations of parameter variation. He states that if the satellite has more flat surfaces, rotates at a certain insignificant speed, or has a large area-to-mass ratio, then the lifting force is not zero. The lifting force is regarded as a vector in a plane perpendicular to the velocity. Perturbations are projected in the direction of the nadir, toward the interior of the orbit, and calculations are performed under the assumption of free-molecular flow. The lift force acting in the plane of the orbit affects the eccentricity, while the orthogonal force perturbs the orbital plane orientation. The general conclusion is that the time-varying aerodynamic resistance can generate different forms of secular orbital motion.

Moore [8] also describes how stabilized satellites can be subjected to a steady or periodic aerodynamic lift, which leads to tangible changes in the parameters of their orbits. He uses Lagrange's equations of motion to study the effect of lift and resistance on orbital elements and states that the exact definition of disturbing forces requires a real experiment, with the study of the interaction of gas with the surface, or a detailed analysis of orbital disturbances and data on the rotation speed.

In [8], a hyperthermal freestream flow, in which the mean free path of molecules is very large in comparison with the dimensions of the satellite and the molecules do not have a random thermal motion (the accommodation coefficient is 1). Diffuse reflection is significant at altitudes of 200-800 km, where atomic oxygen predominates, and at high altitudes the reflection mode is close to mirror reflection.

Wong [9] determines the aerodynamic forces for a rotating sphere in a free-molecular flow. It is established that in the free-molecule regime the Magnus force exerts a negative lift on the spheres in the nadir direction. Expressions for the limiting case of a hypersonic free-molecular flow are derived. Moreover, if the temperature of the sphere is low and the reflection is completely diffusive, the velocity of the reflected molecules is so small compared to the free flow that it can be neglected.

Volkov [10] numerically investigates the behavior of a rotating sphere in a three-dimensional flow of a rarefied gas in a transient and near-continuous flow regime. It is established that in the rarefied gas flow, in the absence of intermolecular collisions, the direction of the Magnus force is opposite to the direction in the continual flow at low Reynolds numbers. The negative rise arising in the transition region is explained by the increase in the contribution of the axial stress to the Magnus force with a decrease in the Knudsen number. The difference in the direction of the Magnus force in the freestream and continual regimes means that in the regime of transient flow the Magnus force depends essentially on the Knudsen number. Moreover, for some value of the Knudsen number this force vanishes. It was shown in [10] that when the Knudsen number decreases, the coefficient in the expression for the Magnus force takes values in the range from $-4/3$ to the maximum value of $+2$ in the continuous flow regime at low Reynolds numbers, and then decreases to the limit value corresponding to large numbers Reynolds.

Rubinov and Keller [11] calculate the Magnus force in the continuum regime using the Navier-Stokes equations, and taking into account the small Reynolds numbers. It is shown that for small Reynolds numbers the rotation of the sphere does not affect its coefficient of aerodynamic resistance. In addition, the authors indicate that in the continuum regime for small Reynolds numbers the aerodynamic torque

acting on the rotating sphere does not depend on the translational velocity of the sphere relative to the gas.

Thus, it follows from this review that the coefficient in the expression for the Magnus force in the free-molecular and continual regimes varies from $-4/3$ to $+2$ with a decrease in the altitude. Since this study analyzes at altitudes in excess of 200 km, the corresponding coefficient takes negative values.

Equations of motion, perturbing factors and numerical solving methods

We will represent the motion of an artificial Earth satellite as a motion of a material particle of infinitesimal mass in the gravitational field of a central body by a mass under the action of forces determined by a potential function and a set of non-potential forces. Then the differential equations of motion of a particle in an inertial rectangular coordinate system connected with the central body can be represented in the form

$$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \frac{dU}{d\mathbf{x}} + \mathbf{F}_1, \quad U = \frac{fM}{r} + U_1, \quad (1)$$

with initial conditions

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0), \quad \dot{\mathbf{x}}_0 = \dot{\mathbf{x}}(t_0), \quad (2)$$

where $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ is the position vector of the satellite; $\frac{fM}{r}$ - potential function due to the attraction of a spherical Earth; f - gravitational constant; U_1 - potential function of disturbing forces; r - module of the position vector; t - physical time.

Methods for solving the two-body problem with perturbations include analytical and numerical methods. Numerical approaches imply the numerical integration of perturbing forces. The numerical approach is also applied to the equations of variation of parameters, and in this case the elements of the orbit are integrated numerically [12], [13].

We describe the method and the formulas by which the calculations are performed. We consider the problem of numerical integration of a system of ordinary differential equations of the first order

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

with initial conditions $x_1 = x_1^{(0)}, x_2 = x_2^{(0)}, \dots, x_n = x_n^{(0)}$ having $t = t_0$

Variables x_1, x_2, \dots, x_n for convenience we will call the coordinates, and the variable t as time.

The Runge-Kutta formulas given below allow one to determine the coordinates at a point in time $t_{k+1} = t_k + h$ if they are known at the time t_k . The formulas are compiled on the basis of the method of interpolation by polynomials with respect to the step of integration h , in which the terms of some order of smallness are neglected with respect to the step size. In this case, all members are kept up to the 4th order inclusive with respect to the step. The Runge-Kutta formulas have the form

$$\begin{aligned} x_i^{(k)} &= x_i(t_k), \\ p_i^{(k)} &= f_i(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}, t_k), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} q_i^{(k)} &= f_i(x_1^{(k)} + \frac{1}{2}h p_1^{(k)}, x_2^{(k)} + \frac{1}{2}h p_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)} + \frac{1}{2}h p_n^{(k)}, t_k + \frac{1}{2}h), \\ r_i^{(k)} &= f_i(x_1^{(k)} + \frac{1}{2}h q_1^{(k)}, x_2^{(k)} + \frac{1}{2}h q_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)} + \frac{1}{2}h q_n^{(k)}, t_k + \frac{1}{2}h), \\ s_i^{(k)} &= f_i(x_1^{(k)} + h p_1^{(k)}, x_2^{(k)} + h p_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)} + h p_n^{(k)}, t_k + h); \\ x_i^{k+1} &= x_i^{(k)} + \frac{1}{6}h(p_i^{(k)} + 2q_i^{(k)} + 2r_i^{(k)} + s_i^{(k)}), \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

Because of the presence of various perturbing forces, equation (3) can only be used as an approximation of real motion. The accuracy of the approximation decreases as the integration time increases. These perturbing forces include terrestrial gravitational harmonics (deviations from the ideal sphere), lunar-solar gravitational perturbations, atmospheric resistance, solar radiation pressure and the tides of the Earth.

As a model of the Earth's attraction, the standard form of recording the potential of the Earth's gravity was used [14].

Atmospheric drag is the main non-potential force acting on a satellite in low Earth orbit. It acts in the direction opposite to the velocity vector, and reduces the energy of the satellite. A decrease in energy leads to a decrease in the orbit altitude, until the satellite enters the atmosphere. Perturbations caused by atmospheric resistance are considered more significant than the perturbations from - the second zonal harmonic of the Earth from the contribution to the decrease in the altitude of the orbit [14].

Acceleration due to atmospheric drag can be expressed as

$$\vec{\mathcal{O}}_{drag} = -\frac{1}{2}\rho \frac{C_d A}{m} v^2 \vec{v}, \quad (6)$$

where ρ is the density of the atmosphere; C_d - drag coefficient; A - cross-sectional area; m - mass of the satellite; v - speed of the satellite relative to the atmosphere; \vec{v} - is the unit vector in the direction of the flow velocity.

Another one of the non-gravitational perturbations is the light pressure. We will assume that the power of the solar radiation flux is constant, the light pressure force is always directed along the Earth-Sun line, the Earth's orbit is circular, the satellite has a spherical shape. Under these assumptions, the acceleration of the direct light pressure of the sun onto the satellite can be given by the formula [15]

$$\vec{a} = -C_r \frac{A K \varphi}{m c} \left(\frac{1}{R_{AU}} \right)^2 \vec{r}_s, \quad (7)$$

where \vec{a} - is the acceleration vector in inertial coordinates; C_r - coefficient of reflectivity; A - the area of the satellite; K - percentage of the emitted light of the Sun, relative to the satellite, which is not eclipsed (usually equal to 1); m - mass of the satellite; φ - solar flux per 1 astronomical unit; c - speed of light; R_{AU} - the distance from the satellite to the Sun in astronomical units; \vec{r}_s is the unit vector of the position of the Sun, relative to the satellite.

The Magnus force is represented by the expression

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} C_l \pi r^3 \rho \omega \vec{v}, \quad (8)$$

where r is the radius of the spherical object; ρ - density of the oncoming stream; ω - angular velocity of the object; v is the speed of the oncoming stream.

The Magnus force coefficient C_l , according to [5], [9], [10], is negative for the free-molecular incoming flow and depends on the accommodation coefficient α_r in the form

$$C_l = -\frac{4}{3} \alpha_r. \quad (9)$$

As a potential approach, we assume the limiting case of a hypersonic free-molecular flow with total reflection, under which $\alpha_r = 1$ [9].

Modeling the motion of a rotating sphere

The rotating sphere dynamics model is implemented using the Analytical Graphics Systems Tool Kit (AGI STK) software [16]. During

developing the model of a rotating object, the Magnus force is programmed as a super efficient engine with a $2 \cdot 10^{12}$ pulse and 5 kg weight, while the amount of fuel consumed does not affect the final result of the calculations.

Numerical integration of the equation of motion of the satellite with the use of the Magnus effect is represented by Runge-Kutta-Felberg method of 4th order with accuracy control of the 5th order [12], the resistance coefficient, atmospheric density is calculated on the basis of the model of the atmosphere NRLMSISE-00 [17] model of the Earth JGM3 [18], [19].

Results of simulation modeling

The graphs and numerical values of the results of the study are shown in Fig. 2-8 and in Table. 1 to 7, respectively.

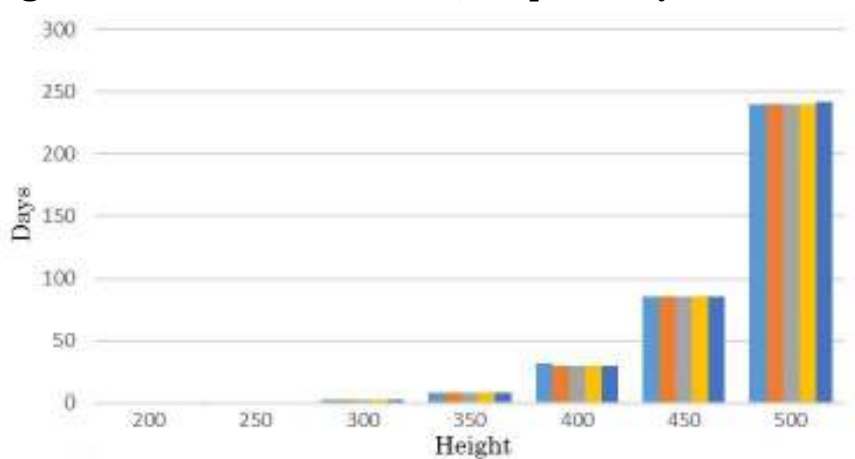


Figure 2 - Comparative histogram of the object lifetime (numerical values in Table 1)

Table 1

The object lifetime (days) on orbit at different angular velocities

Object ang. velocity, rev/min	Lifetime in days for different altitudes, km						
	200	250	300	350	400	450	500
w/o rotation	0,09	0,51	2,39	8,41	31,4	85,6	239,6
1000	0,09	0,51	2,27	8,42	29,6	85,6	239,6

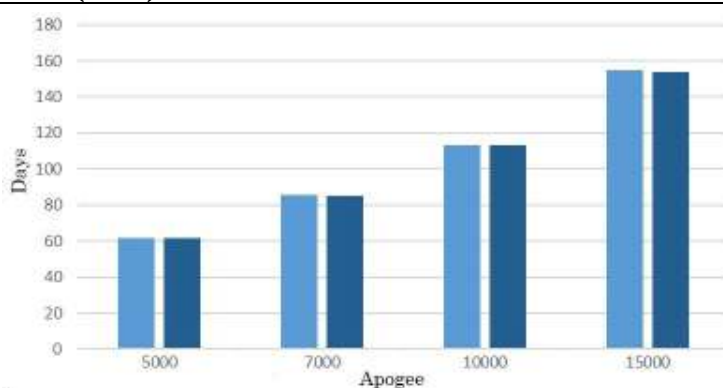


Figure 3 - Comparative histogram of the object lifetime on orbit at perigee 200 km

Table 2

The object lifetime (days) on orbit at perigee 200 km

Object ang. velocity, rev/min	Lifetime in days for different apogee altitudes, km			
	5000	7000	10000	15000
w/o rotation	61,8	85,4	113,2	154,5
1000	61,6	85,2	112,9	153,9

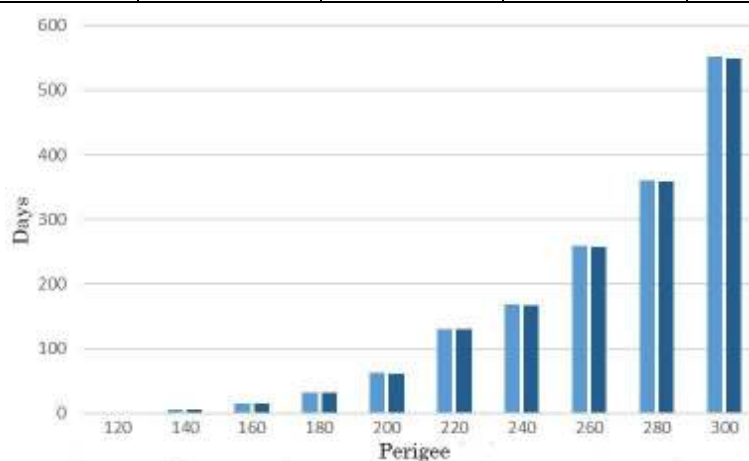


Figure 4 - Comparative histogram of the object lifetime on orbit at 5000 km apogee

Table 3

The object lifetime (days) on orbit at 5000 km apogee

Object ang. velocity, rev/min	Lifetime in days for different perigee altitudes, km					
	200	220	240	260	280	300
w/o rotation	61,8	130	168	258	360	552
1000	61,6	130	167	257	359	548

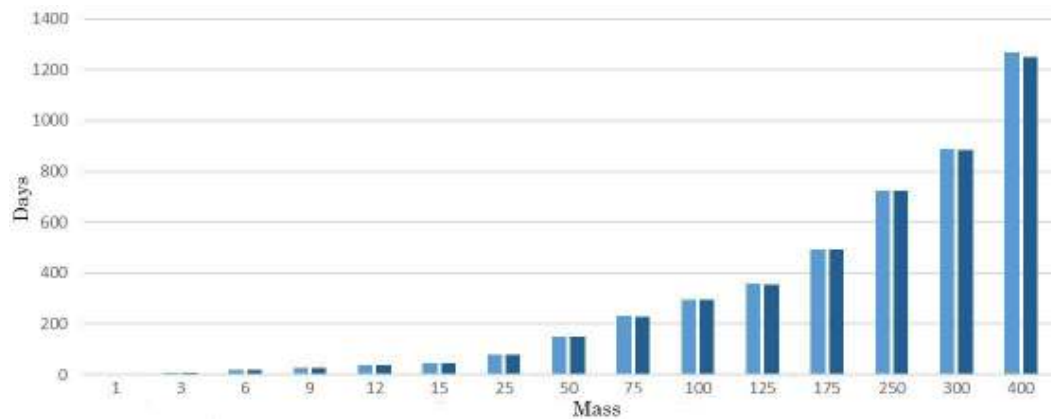


Figure 5 - Comparative histogram of the object lifetime due to different object masses on orbit at 5000 km apogee

Table 4

The object lifetime (days) at different mass on orbit at apogee 5000 km

Object ang. velocity, rev/min	Lifetime in days for different object mass, kg														
	1	3	6	9	12	15	25	50	75	100	125	175	250	300	400
w/o rotation	2,9	8,5	17,9	27,4	36,2	45,4	77,5	150	230	294	357	493	725	887	1269
1000	2,9	8,5	17,9	27,4	36,1	45,4	77,3	150	229	294	356	492	723	884	1250

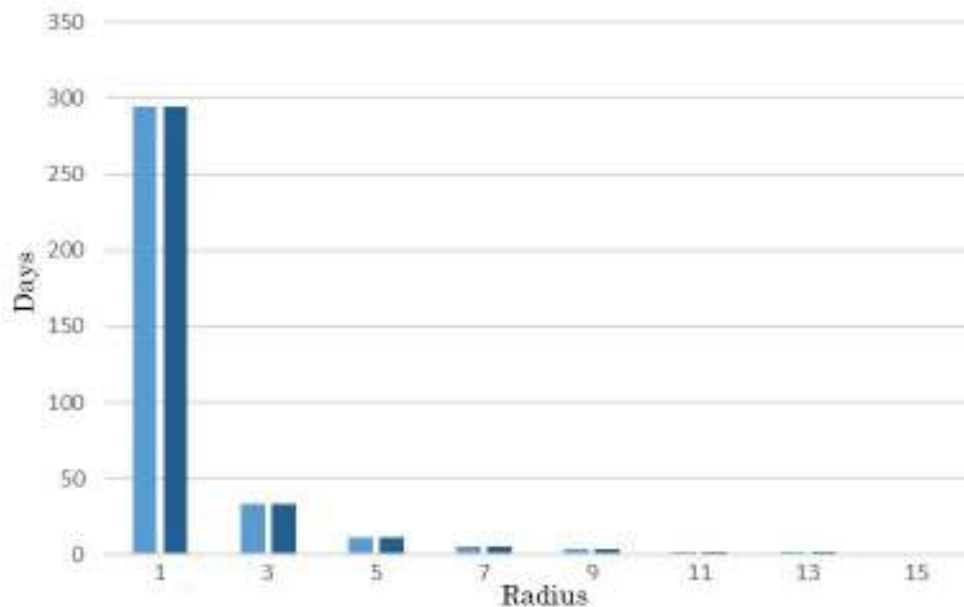


Figure 6 - Comparative histogram of the object lifetime due to different object radius at apogee 5000 km, perigee 200 km, weight 100 kg

The object lifetime (days) at different object radius at apogee 5000 km,
perigee 200 km, mass 100 kg

Object ang. velocity, rev/min	Lifetime in days depending on different object radius, m			
	1	3	5	7
w/o rotation	294,3	33,5	11,5	5,7
1000	294,1	33,3	11,4	5,6

Conclusions

A mathematical model of the dynamics of a large fragment of space debris in the form of a ball is developed and investigated, taking into account its motion relative to the center of mass. On the basis of the constructed model, the influence of the Magnus force on the time of finding a spherical object in orbit was studied. The dependence of the magnitude of this force on various parameters-the orbital regime, the angular velocity of the object's rotation, the mass, and the radius of the sphere are investigated. Taking into account the accepted height of the final removal of the object in 200 km, it is possible to state with confidence that within the framework of the model built, the Magnus effect does not significantly affect the orbital time of the object in orbit, regardless of the size of the object and the orbital mode.

REFERENCES

1. Pulido C. L. Aerodynamic Lift and Drag Effects on the Orbital Lifetime Low Earth Orbit (LEO) Satellites / C. L. Pulido. – University of Colorado Boulder, 2007.
2. Cook G. E. The Effect of Aerodynamic Lift on Satellite Orbit / G. E. Cook // Plant. Space Science. – 1964. – Vol. 12. – P. 11.
3. Borg K. I. Force on a Spinning Sphere Moving in a Rarefied Gas / K. I. Borg, L. H. Soderholm, H. Essen // Physics of Fluids. – 2003. – Vol. 15, № 3. – P. 736–741.
4. Ramjatan S. Magnus Effect on a Spinning Satellite in Low Earth Orbit / S. Ramjatan, N. Fitz-Coy, A. Yew // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. – 2016.
5. Borg J. Magnus Effect: An Overview of its Past and Future Practical Applications / J. Borg. – Washington D. C.: NAVSEA. – 1986.

6. Roy S. Modelng Gas Flow Through Microchannels and Nanopores / S. Roy, R. Raju, H. F. Chuang, B. A. Cruden, M. Meyyappan // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93, № 8. – P. 10.
7. Ashenberg J. On the Effects of Time-Varying Aerodynamics Coefficients on Satellite Orbits / J. Ashenberg // Acta Astronautica. – 1996. – Vol. 38, № 2. – P. 75–86.
8. Moore P. The Effect of Aerodynamic Lift on Near-Circular Satellite Orbits / P. Moore // Planet, Space Sciences. – 1985. – Vol. 33, № 5. – P. 479–491.
9. Wang C. T. Free Molecular Flow Over a Rotating Sphere / C.-T. Wang // AIAA. – 1972.
10. Volkov A. Aerodynamic coefficients of a Spinning Sphere in a Rarefied-Gas Flow / A. Volkov // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. – 2009. – Vol. 44, № 1. – P. 167–187.
11. Rubinow S. I. The Transverse Force on a Spinning Sphere Moving in a Viscous Fluid / S. I. Rubinow, J. B. Keller // Journal of Fluid Mechanics. – 1961. – Vol. 11, № 3. – P. 12.
12. Hall T. S. Orbit maneuver for responsive coverage using electric propulsion / T. S Hall // Air Force Institute of Technology, 2010.
13. Liu J. J. F. The Orbit Decay and Lifetime (LIFTIM) Prediction Program / J. J. F. Liu, R. L. Alford // Northrop Services, Inc., 1974.
14. Chobotov V. Orbital Mechanics / V. Chobotov // Virginia: AIAA. – 2002.
15. Довідкова система AGI STK / Solar Radiation Computation. – Режим доступу до сист. <http://help.agi.com/stk/index.htm#gator/eq-solar.htm>
16. Пакет інженерного моделювання AGI STK. – Режим доступу до сист. <http://www.agi.com/products/engineering-tools>
17. Picone J. M. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob, A. C. Aikin // Journal of geophysical research. – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1468.
18. McCarthy D. D. IERS Conventions (IERS Technical Note; 21) / Dennis D. McCarthy // Central Bureau of IERS: Paris. – 1996. – Режим доступу до ресурсу https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote21/tn21_40.pdf?__blob=publicationFile&v=1
19. Saunders A. A New Tool for Satellite Re-entry Predictions / A. Saunders // 5th European Conference of Space Debris, 2009. – Darmstadt, 2009.

Ю.В. Бабенко

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ АВТОЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ

Анотація. В роботі проводиться дослідження впливу різних законів розподілу на роботу імітаційної моделі автозаправної станції. Побудовано імітаційну модель у 3D вигляді, яка є дозволяє імітувати різну динаміку роботи автозаправної станції при деяких певних початкових умовах.

Ключові слова: закон розподілу, математична модель, імітаційна модель.

Вступ

В даний час у більшості сфер людської діяльності успішно інтегруються інформаційні технології, що поєднують в собі чіткий математичний апарат і стохастичну природу процесів. Тому створення імітаційних моделей складних об'єктів на основі теорії ймовірностей, теорії динамічних потоків та, зокрема, систем масового обслуговування (СМО) є актуальним питанням. СМО є доволі цікавим об'єктом для дослідження з точки зору впливу як початкових умов, так і внутрішніх ймовірнісних параметрів. Найбільш вивченими є СМО, в яких час між надходженням двох послідовних заявок підпорядковується закону Пуассона. Проте такі системи доволі мало зустрічаються на практиці, а отже інтерес становить дослідження параметрів СМО з іншими законами розподілу часу між надходженням двох послідовних заявок.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження ефективності системи масового обслуговування, а саме діяльності автозаправної станції, та знаходження числових значень показників, що характеризують якість обслуговування цієї системи, які в подальшому дослідженні будуть впливати на структуру СМО.

Об'єкт дослідження – автозаправна станція.

Предмет роботи – імітаційна модель автозаправної станції. Дане дослідження проведено за допомогою імітаційної моделі, побудованої в програмному пакеті Anylogic Free Release.

Дослідження імітаційної моделі

Імітаційна модель автозаправної станції для машин істотно полегшує і здешевлює збір статистичних даних, за допомогою яких можна буде оптимізувати діяльність автозаправної станції та підвищити якість обслуговування. Для досягнення даної мети необхідно розглянути об'єкт моделювання, його структуру та сфери діяльності, проаналізувати існуючі в даний час проблеми та запропонувати план їх вирішення. У даній роботі розглянуто систему, яка надає сервісне обслуговування машин на автозаправній станції. Заправка складається з двох обслуговуючих елементів, що відповідають за дві різні операції:

- розрахунок за придбане пальне (каса з касиром),
- заправка з різними типами пального (в автозаправній станції передбачається, що кожна паливна колонка містить певний тип палива).

У касу стоять відвідувачі. Після розрахунку кожна машина їде до відповідної паливної колонки.

Метою моделювання є дослідження ефективності системи масового обслуговування, оцінка ефективності системи, знаходження числових значень показників, що характеризують якість обслуговування системою потоку відвідувачів. Такими характеристиками є:

- середній час, проведений машиною в черзі на розрахунок до каси;
- довжина черги, яку він відстояв до каси;
- середній час, проведений машиною в черзі на заправку до колонки;
- довжина черги, яку він відстояв до колонки;
- середній час обслуговування автомобілів на заправці.

При побудові будемо вважати, що автозаправна станція являє собою сукупність одноканальних систем масового обслуговування, бо вона містить в собі наступні розгалуження у вигляді черг: черга на розрахунок за пальне та черги до колонок. В моделі передбачається, що якщо машина заїхала на заправку та в деякий момент змінила

своє рішення про необхідність заправки, то вона повинна покинути станцію до моменту розрахунку.

Заявки – автомобілі надходять в систему послідовно, а інтервал часу між послідовними прибуттями автомобілів є простим стаціонарним потоком, розподіл якого моделювався одним з трьох законів: трикутним, рівномірним та законом розподілу Коші.

На рис. 1 подано дискретно-подієву імітаційну модель автозаправної станції. З рис. 1 видно, що надходження заявок формується об'єктом *source*, потім заявки надходять на об'єкт *queue*, який накопичує чергу з машин до заправки, а далі об'єкт *conveyor* забезпечує розгалуження до черги у касу або на виїзд з заправки.

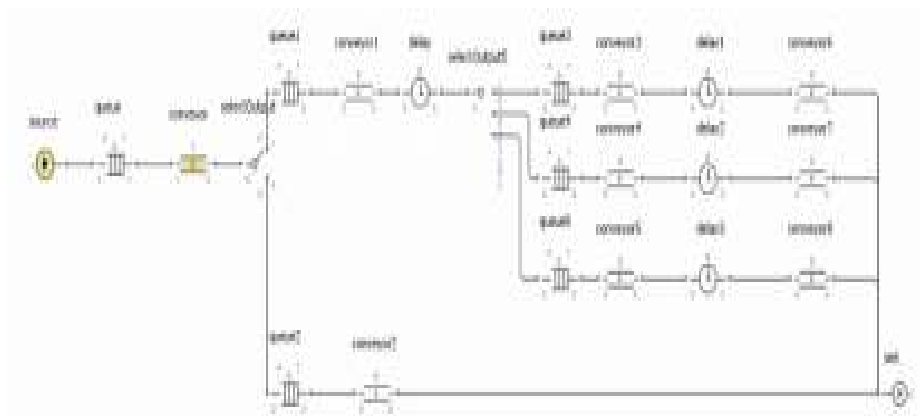


Рисунок 1 – Дискретно-подієва модель автозаправки

На рис. 2 подано 3D вигляд імітаційної моделі автозаправної станції. Зазначимо, що кожна колонка містить лише 1 один тип пального.

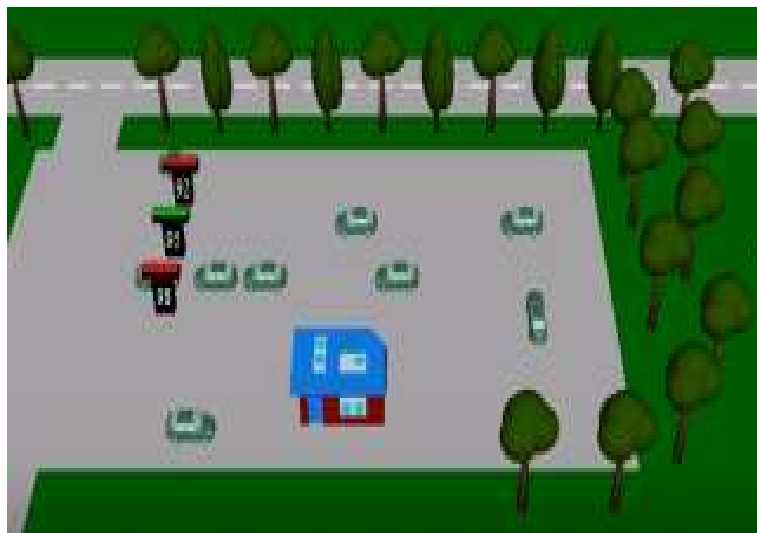


Рисунок 2 – Модель системи в 3D вигляді

Далі досліджено вплив різних законів розподілу на роботу автозаправної станції. Так, в таблицях 1-2 наведені результати роботи імітаційної моделі при трикутному законі розподілу надходження машин до автозаправної станції та до колонок.

Таблиця 1

Тестування системи «Gas_station» за трикутним законом розподілу

	Трикутний закон розподілу з параметрами (0,5, 1, 1,5)	Трикутний закон розподілу з параметрами (2,4,6)
Середній час обслуговування автомобілів на заправці, с	20	35
Середній час обслуговування в черзі на касу, с	5,5	12,5
Середній час очікування в черзі до колонки, с	4	6

Таблиця 2

Тестування системи «Gas_station» за трикутним законом розподілу

	Трикутний закон розподілу з параметрами (0,5, 1, 1,5)	Трикутний закон розподілу з параметрами (2,4,6)
Середня кількість автомобілів до каси, шт	7	11
Середня кількість автомобілів до колонки, шт	9	14

Далі було досліджено вплив двох різних законів розподілу на роботу розробленої моделі. Так в таблицях 3 та 4 вхідний потік машин генерується рівномірним законом з параметрами (2, 10), а черга до колонок – трикутним законом розподілу або законом Коші.

Таблиця 3

Тестування системи «Gas_station»
за рівномірним законом розподілу генерації черги до каси

	Трикутний закон розподілу з параметрами (0,5, 1, 1,5)	Трикутний закон розподілу з параметрами (2,4,6)	Закон розподілу Коші з параметрами (0,5, 2)	Закон розподілу Коші з параметрами (0,8, 4)
Середній час обслуговування автомобілів на заправці, с	23,6	45,1	22,5	32,9
Середній час обслуговування в черзі на касу, с	4,7	12,3	7,1	13,5
Середній час очікування в черзі до колонки, с	6,8	9,9	7,9	10,5

**Тестування системи «Gas_station»
за рівномірним законом розподілу генерації черги до каси**

	Трикутний закон розподілу з параметрами (0,5, 1, 1,5)	Трикутний закон розподілу з параметрами (2,4,6)	Закон розподілу Коші з параметрами (0,5, 2)	Закон розподілу Коші з параметрами (0,8, 4)
Середня кількість автомобілів до каси, шт	6	8	7	9
Середня кількість автомобілів до колонки, шт	12	17	14	16

Висновки

Побудована імітаційна модель надала можливість оцінити продуктивність роботи АЗС при різних початкових умовах її роботи та при різних завантаженостях, зумовлених використанням законів розподілу часу між двома послідовними надходженнями заявок. Так, саме використання рівномірного, трикутного законів розподілу, а також закону Коші дозволило отримати значення деяких характеристик СМО, які в подальшому можуть використовуватися на реальному об'єкті. За розрахунками визначено, що найбільш оптимальним варіантом для роботи АЗС є спільна робота трьох бензинових колонок. При цьому середній час клієнтів в системі не перевищує заданого обмеженням імітаційної моделі, а завантаженість колонок є оптимальною.

ЛІТЕРАТУРА

1. Киселева М.В. Имитационное моделирование систем в среде Anylogic / М.В Киселева. – Екатеринбург, 2009. – 95 с.
2. Ємельянов, А. А. Імітаційне моделювання економічних процесів: навч. посібник / А. А. Ємельянов, Є. А. Власова, Р. В. Дума; під ред. А. А. Ємельянова. - М.: Фінанст і статистика, 2002. - 368 с
3. Мезенцев К.Н. «Моделирование систем в среде AnyLogic 6.4.1». Часть 2 /Под ред. А.Б. Николаева. МАДИ. — М.: 2011. – 103 с.

В.В. Гнатушенко, О.В. Лукашевич

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ РЕДУКЦІЇ
ПРИ УПРАВЛІННІ СИСТЕМОЮ ПО ВИХОДУ**

Анотація. Розглянуто питання ефективності використання методів редукції при управлінні системою по виходу. Виявлено, що методи синтезу управління по виходу із застосуванням процедур редукції дозволяють істотно скоротити витрати на процес синтезу, при цьому зберігаючи високу точність. Для скорочення порядку регулятора по виходу можна використовувати H_2 і H_∞ -оптимізацію із застосуванням до вихідної системи скороченого регулятора, причому, невеликі порядки редукції при побудові регулятора показали більш високу точність.

Ключові слова: математична модель, система управління, редукція, оптимізація, управління по виходу.

Постановка проблеми

Одним з найбільш потужних інструментів сучасної теорії управління при вирішенні завдань аналізу і синтезу систем управління об'єктами є методи теорії лінійних динамічних систем [1-4]. В останні десятиліття бурхливий розвиток цієї теорії, який супроводжувався загальною комп'ютеризацією, дозволив вирішити практично значущі завдання управління складними багатовимірними динамічними об'єктами. Методи вдосконалення якості та надійності функціонування керованих систем, в значній мірі, визначаються математичними методами і моделями які використовуються. Це особливо проявляється в промислових об'єктах, динамічна поведінка контрольованих параметрів яких, незважаючи на управління, носить нелінійний характер. Побудова моделей, адекватних динамічній поведінці, визначає проектування якісних і надійних систем автоматичного управління.

Злиття різних напрямків і методів аналізу систем управління дозволило досягти якісно нових результатів в цій області, визначити загальні межі допустимості, ефективності та доцільності їх застосування [5,6]. Однак можливості використання законів управління в

сучасній теорії лінійних систем обмежені тим, що систематичні методи аналізу і синтезу законів управління направлені в основному на чисельні алгоритми. Якісно новий рівень розвитку теорії лінійного управління динамічними системами може бути досягнутий на основі вирішення проблеми аналітичного матричного синтезу довільних законів управління з забезпеченням заданої сукупності властивостей.

Аналіз останніх досліджень

Розвиток науки і техніки призводить до необхідності управління все більш ускладненими системами, в зв'язку з чим зростає роль надійного прогнозу їх подальшого руху. Необхідною умовою такого прогнозу є отримання математичної моделі, параметри якої відображають реальні фізичні, конструктивні, технологічні та інші фактори, що впливають на динаміку системи. Як правило, такі моделі мають досить високий порядок. До того ж сучасні технічні об'єкти функціонують в умовах мінливих впливів зовнішнього середовища, що призводить до погіршення характеристик систем автоматичного управління.

Серед існуючих підходів до вирішення завдання синтезу з урахуванням зовнішніх збурень найбільш значущими результатами є: динамічна компенсація збурень з імовірно відомою моделлю (Ш. Бхаттачарія, В. Волович, Е. Девісон, М. Уонем); лінійно-квадратична гаусівська (LQG) оптимізація при випадкових збуреннях з заданими характеристиками (Р. Бьюси, Р. Калман, Х. Квакуернаак, В.Б. Ларін, М. Уонем, Ю.П. Петров); L_1 -оптимізація при найгірших збуреннях (А.Є. Барабанов, Е.Д. Якубович, Дж. Пірсон); H_2 - та H_∞ -оптимізація для збурень з обмеженою L_2 -нормою (енергією) (Дж. Зеймс, Б. Френсіс, Дж. Дойл, К. Гловер).

Завдання управління по виходу вирішуються з використанням методів H_2 , H_∞ -оптимізації. Однак застосування цих методів в просторі станів має подвоєний порядок по відношенню до порядку об'єкта. Аналіз таких систем вимагає великих витрат часу і процесорної пам'яті, що знижує ефективність дослідження системи. У зв'язку з цим зниження розмірності або порядку регулятора, при збереженні необхідної точності є важливим завданням для моделювання таких систем. Для реалізації цієї умови необхідно виявлення характеристик моделі, які надають певний вплив на поведінку. Таким чином є актуальним і затребуваним в сучасній аналітичній теорії управління ви-

рішення завдання синтезу систем управління з урахуванням діючих на них зовнішніх збурень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета роботи полягає в дослідженні методів, які дозволяють синтезувати управління по виходу із застосуванням процедур редукції, що може істотно скоротити витрати на процес синтезу і розміри самих регуляторів.

Основна частина

Редукція системи полягає в збереженні максимального числа параметрів, інваріантних для повної системи, і які її однозначно визначають, в системі нижчого порядку з заданою точністю апроксимації повної системи. Скорочена модель повинна відображати суттєві властивості повної моделі, а саме, повинні зберегтися суттєві властивості вхідного-вихідного уявлення. Теорія редукції вже достатньо вивчена, і одними з найбільш докладних джерел по методам редукції можна назвати [7] і [8].

Серед методів редукції математичних моделей можна виділити дві основні групи: проекційні методи редукції і непроекційні методи редукції.

Проекційні методи - це клас ітераційних методів редукції, в яких вирішується завдання проектування вихідної лінійної математичної моделі на заданий підпростір відносно вихідного простору. Кожен метод, який заснований на проекції, виходячи з деяких міркувань, формує матриці вхідного V та вихідного W підпростору.

В проекційних методах можна виділити три основні класи методів редукції:

1. Методи власного ортогонального розкладання.
2. Методи підпростору Крілова.
3. Методи, засновані на зрівноважуванні.

Найбільш часто використовуються проекційні методи редукції в підпросторі Крілова. Вони засновані на побудові матриць проекції, компоненти яких обчислюються за допомогою моментів передавальної функції на різних частотах, і проектуванні системи великих розмірів на систему малих розмірів. Рішення спроектований системи буде наближенням до рішення вихідної системи.

Аналітичні методи синтезу полягають в знаходженні передавальної функції автоматичного пристрою або алгоритму управління, або

при обраній структурі вказаного пристрою встановлюються значення його параметрів, що дають екстремум критерію якості. Іншими словами, аналітичні методи синтезу полягають в знаходженні виразу, який аналітично пов'язує властивості з параметрами коригуючого пристрою, і у визначенні значення параметрів, які відповідають екстремальним значенням функції. Дана група методів дозволяє відразу знайти оптимальне рішення, але часто приводить до складних обчислень. До таких методів синтезу систем управління по виходу відносять синтез H_2 і H_∞ - оптимальних систем управління, які засновані на мінімізації H_2 і H_∞ - норм передавальних функцій, що забезпечує мінімальний вплив збуджуючих впливів на контрольований вихід об'єктів управління.

Методи синтезу управління по виходу - методи, які використовують в якості вхідної змінної керуючого пристрою вихід $y(t)$, а не стан $x(t)$, тобто забезпечують зворотний зв'язок по виходу $y(t)$. Метод синтезу H_2 -оптимального управління - метод, який спрямований на мінімізацію H_2 -норми передавальної функції, що забезпечує мінімальний вплив збуджуючих впливів на контрольований вихід об'єктів управління [5]. Метод синтезу H_∞ -оптимального управління є аналогом метода синтезу H_2 , але спрямований на мінімізацію H_∞ -норми передавальної функції.

Метод побудови H_2 - оптимальних систем

Математична модель об'єкта управління представлена моделлю в просторі станів і описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t), \\ z(t) &= C_1 x(t) + D_{12} u(t), \\ y(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{aligned} \quad (1)$$

де $x(t)$ – вектор стану об'єкта, $w(t)$ – вектор збуджуючих впливів (обмежений в L_2 -нормі), $u(t)$ – керуючий вплив, який формується регулятором, що синтезується (вихідний вектор регулятора), $z(t)$ – вектор помилки контрольованих змінних, $y(t)$ – вектор вимірюваних змінних, які використовуються для управління (вектор виходу, за яким замикається через регулятор зворотний зв'язок).

Структурна схема синтезованого об'єкта наведена на рисунку 1.

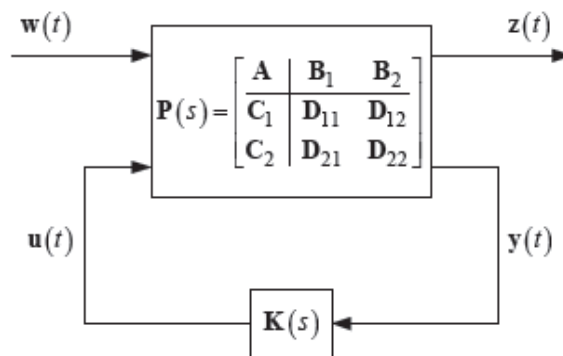


Рисунок 1 – Структурна схема системи, що синтезується

Завдання синтезу H_2 -оптимального регулятора полягає в знаходженні такого регулятора $K_2(S)$ для системи на рисунку 1, який стабілізує замкнуту систему і мінімізує оціночний функціонал:

$$J_2(K_2) = \|T_{w \rightarrow z}(P_2, K_2)\|^2 \quad (2)$$

де $P(s)$ – передавальна функція об'єкта управління за умови $D_{11}=0$ і $D_{22}=0$. Нульові значення діагональних блоків матриці D пов'язані з припущенням відсутності прямого зв'язку між векторами w і z . Відзначимо, що збурення враховуються в каналі вимірювань.

В роботі розглядається рішення задачі стабілізації лінійного безперервного стаціонарного об'єкта по виходу із застосуванням методів редукції. Математична модель об'єкта визначена наступними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Du(t), \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{aligned} \quad (3)$$

де $x(t) \in \mathbb{R}^m$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ – вектори входів, станів і виходів, відповідно. Система має три входи і три виходи, вектор стану включає в себе 256 координат стану.

Етапу синтезу систем управління передують етап аналізу властивостей математичної моделі розглянутого об'єкта. Завдання синтезу протилежно завданню аналізу. Якщо при аналізі структура і параметри задані, а шукається поведінка системи в заданих умовах, то в цьому дослідженні завдання і мета міняються місцями. До числа основних властивостей об'єктів і систем, що підлягають аналізу, відносяться керованість, спостережність і стійкість.

Як відомо, методи в підпросторах Крілова ефективно працюють з сотнями змінних стану. При низькому порядку вихідної моделі

можемо спостерігати недостатньо ефективний результат. У роботі розглядається модель в просторі станів 256 порядку.

Ця система є стійкою. Якщо система нестійка, то алгоритм будь-якого з методів в підпросторі Крилова слід застосовувати тільки до стійкої частини системи. Досягається це поділом моделі на стійку і нестійку частини. Скорочення перетворення не зберігає оригінальні власні числа вихідної системи, і йде перетворення всієї системи, а не просте видалення власних чисел. Для стійкої системи це не критично, оскільки вона стабілізується за деякий час, і власні числа скороченої системи в цілому поведуться аналогічно вихідним (з деякою погрешністю редукції). Для нестійкої системи, зміна її власного числа з позитивною дійсною частиною призведе до повної розбіжності процесів на будь-якому суттєвому проміжку часу. Тому нестійка частина системи не піддається редукції в підпросторах Крилова.

Важливою умовою для редукції є керованість і спостережність, оскільки некерована і неспостережна система скорочує свій порядок природним чином за допомогою приведення системи до мінімальної реалізації. Обрана система є керованою і спостережною.

Завдання синтезу H_2 і H_∞ -оптимальних регуляторів була вирішена за допомогою методів, які реалізовані в пакеті Robust Control Toolbox [9] системи MATLAB. Застосування методів редукції до H_2 і H_∞ -оптимальним регуляторам було реалізовано в пакеті Simulink системи MATLAB.

Обчислювальні експерименти, пов'язані з методами редукції, застосовані до моделі лінії електропередач [10].

Висновки та перспективи подальших досліджень

Побудована модель стабілізації об'єкта по виходу із застосуванням методів редукції, проведено її аналіз. Досліджено властивості розглянутої моделі лінійної стаціонарної системи і сформульовані критерії оцінки точності скороченої моделі. Під критеріями оцінки точності розуміється точність відтворення реакції системи на зовнішній поетапний вплив, збереження якості стійкості скороченої системи, точність відтворення частотних характеристик в заданій частотній області.

Методи H_2 і H_∞ -оптимізації по виходу показали результати синтезу, які не суттєво відрізняються в похибках. Однак швидкість обчислення H_2 -оптимального регулятора виявилася значно вище, ніж

при тих же вхідних даних для обчислення H_∞ -регулятора. Виявлено, що H_2 і H_∞ -оптимальні регулятори вирішують проблему високочастотних коливань. Вони перетворюються в низькочастотні резонанси і поступово згасають, що дозволяє ефективно стабілізувати систему.

Таким чином, для скорочення порядку регулятора щодо виходу можна використовувати H_2 і H_∞ -оптимізацію із застосуванням до вихідної системи скороченого регулятора. Причому, невеликі порядки редукції при побудові регулятора показали більш високу точність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Васильев А.Ю., Козлов В.Н., Куприянов В.Е. Методы редукции динамических систем (с приложениями в энергетике) / под ред. В.Н. Козлова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 109 с.
2. Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Шашихин В.Н. Управление энергетическими системами. Часть 1: Теория автоматического управления: Учеб. Пособие / под ред. В.Н. Козлова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 316 с.
3. Крылов, А.Н. О численном решении уравнения которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем. / А.Н.Крылов// ИАН, Отд. мат. и ест. наук. (7). – 1931. – с.491-539.
4. Куприянов В.Е., Васильев А.Ю. Грубые системы управления. Синтез систем управления по выходу. учеб. пособие / В.Е. Куприянов, А.Ю. Васильев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 83 с.
5. Арнольд В.И., Козлов В.В., Нейштадт А.И. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. Т.3.- М.:ВНИТИ,1985.–407 с.
6. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление/ Б.Т.Поляк, П.С. Щербаков – М.: Наука, 2002, 273 с.
7. Grimm E. Krylov projection methods for model reduction / E. Grimm.– Ph.D. Thesis, Univ. of Illinois at UrbanaChampaign, 1997
8. Athanasios C Antoulas. Approximation of large-scale dynamical systems / Siam.– 2005. – 497p.
9. Robust Control Toolbox User's Guide. MathWork Matlab 7.0.1 Release 14
10. Benchmark Examples for Model Reduction . – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://slicot.org/20-site/126-benchmark-examples>

В.М. Горячкін, О.В. Жевжик, О.Ю. Степура

**ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРІВ ТРУБОПРОВІДІВ
СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

Анотація. В статті розглянуто методика оптимізації розмірів трубопроводів систем теплопостачання по мінімуму витрат на спорудження та експлуатацію системи. Отримана залежність оптимального діаметру трубопроводів теплової мережі від витрати теплоносія з урахуванням сучасних економічних факторів.

Ключові слова: теплопостачання, тепла мережа, оптимальний діаметр, трубопровід, енергозбереження.

Вступ

Теплова енергія є одним з найпоширеніших видів енергії в Україні та світі. Так, за даними Державної служби статистики України [1], наприклад, в 2016 році в Україні було спожито 59 876 529 Гкал теплової енергії, що відповідає 8 554,8 тис тон умовного палива.

Значна частка витрат паливно-енергетичних ресурсів припадає на експлуатацію житлового фонду. Так, на одного мешканця в рік на утримання житла витрачається 1,3...1,4 т умовного палива, а на опалення 100 м² загальної площі житлових будинків в рік витрачається приблизно 5,6...8,7 т умовного палива. В розрахунку на 1 м² загальної площі на теплопостачання житла в Україні витрачається в 1,5 рази більше енергоресурсів, ніж в США і в 2,5...3,0 рази більше, ніж в Швеції [2].

На опалення будинків витрачається більше 43 % всієї теплової енергії, яка виробляється, що в 2...3 рази перевищує відповідні витрати у західних країнах. Зокрема, на опалення багатоповерхових будинків в Україні витрачається 300...600 кВт·год/м² в рік, в той час як в Німеччині – не більше 260 кВт·год/м² в рік, Швеції та Фінляндії – 135 кВт·год/м² в рік. Непродуктивні витрати теплової енергії при транспортуванні її від виробника до опалювального приладу житлової кімнати в деяких регіонах сягають 40 %, а вартість транспортування складає близько 10...15 % від відпускної ціни.

Потреби житлово-комунального сектора та промисловості в тепловій енергії забезпечуються системами теплопостачання від теплоелектроцентралей (ТЕЦ), районних, групових і місцевих котелень. Найпоширеніше в Україні – централізоване теплопостачання від ТЕЦ і великих котелень, для якого потрібна розгалужена теплова мережа, що пов'язує джерело теплопостачання з споживачем. Економічність, надійність і довговічність цих систем залежить від правильно прийнятих проектних рішень і якості їх технічної експлуатації. Враховуючи стан більшості систем теплопостачання в Україні, їх суттєва модернізації є не тільки економічно доцільною, а, в багатьох випадках, невідкладною через неможливість подальшої нормальної експлуатації.

Виходячи з цього, будь-які роботи, що направлені на енергозбереження в системах виробництва, транспортування та використання енергоносіїв і, зокрема, теплової енергії, є дуже актуальними.

Існують три базових напрямки енергозбереження для економії теплової енергії:

- економія палива за рахунок використання теплоти з низьким потенціалом, вторинних енергоресурсів та відновлюваних джерел енергії, що включає в себе використання геліоустановок у системах опалення та гарячого водопостачання, впровадження сонячних пасивних систем опалення, теплових pomp, що використовують низькотемпературний потенціал для теплопостачання (прикладом застосування такого підходу є роботи [3, 4, 5]);

- впровадження заходів з енергозбереження під час транспортування виробленої теплової енергії, зокрема, оптимізація теплових мереж за рахунок раціонального вибору способів і маршрутів прокладки трубопроводів, оптимального вибору їх розмірів з точки зору мінімізації поверхонь, через які відбуваються втрати теплоти в навколишнє середовище, та витрат енергії на транспортування теплоносія, покращення ізоляції трубопроводів;

- впровадження заходів з енергозбереження на етапі споживання, що включає утеплення огорожувальних конструкцій (стін, даху, підлоги, суміщеного покриття та перекриття над підвалами тощо), утеплення конструкцій, що відкриваються (вікна, квартирки, двері, балкони), встановлення індивідуальних теплових пунктів з регулюванням кількості теплоносія, що подається, встановлення квар-

тирних теплових лічильників, які стимулюють індивідуальне економічне теплоспоживання, встановлення термостатичних вентилів на радіаторах (такий підхід розглянутий, наприклад, в роботах [2, 6, 7]).

Додатковою перевагою впровадження енергозберігаючих заходів є скорочення споживання палива і, як наслідок, зниження викидів у навколишнє середовище забруднюючих речовин, що утворюються при виробництві теплової та електричної енергії.

Постановка задачі і мета досліджень

На сьогоднішній день проектування теплових мереж систем теплопостачання здійснюється відповідно норм ДБН В.2.5-39:2008, прокладання внутрішніх трубопроводів систем опалення – відповідно ДБН В.2.5-67:2013. Згідно першого з цих нормативних документів встановлені вимоги до проектування систем теплопостачання, надійності їх функціонування, безпечної експлуатації, екології, енергозбереження, другого – вимоги до труб, обладнання, арматури, що використовується в системах опалення.

Виходячи з цього, вирішення задачі про вибір розмірів і конфігурації конкретного трубопроводу доцільно супроводжувати економічно обґрунтованою оцінкою варіантів, що розглядаються. Для розробки методики вибору трубопроводів, що передбачає мінімізацію втрат теплоти в навколишнє середовище і витрат енергії на транспортування теплоносія, була розглянута задача оптимізації розмірів трубопроводу по мінімуму витрат на спорудження та експлуатацію системи.

В літературі відомі роботи присвячені оптимізації трубопроводів систем теплопостачання. Так, в роботі [8] розглянуто складання та розв'язок рівнянь при оптимізації обладнання системи теплопостачання. Зокрема при виборі оптимальних розмірів і конфігурації трубопроводів пропонується виходити з мінімуму приведених видатків, які визначаються як віднесена до терміну експлуатації сума капітальних та експлуатаційних витрат. Однак, використана при цьому залежність вартості трубопроводу від діаметру не відображає сучасні тенденції. Аналогічний підхід для оптимізації гідросистем включно з вибором обладнання насосних станцій запропоновано в роботі [9].

В роботі [10] розглянуті принципи оптимізації при проектуванні розвідних трубопроводів при прокладанні нових сучасних систем теплопостачання. В ній розглянуті і проаналізовані різні варіанти

сумісного прокладання кількох трубопроводів разом, наведені методи проектування таких систем, включаючи комбінацію сумісного ізолювання з асиметрією розташування труб і застосування труб кількох різних діаметрів.

Оптимізація систем опалення, незважаючи на те, що існують рекомендації по пошуку найбільш енергоефективних варіантів прокладки трубопроводів [11], на практиці зазвичай проводиться за умовою мінімуму капітальних витрат на спорудження системи.

Разом з тим, останнім часом з'явилися нові технології і матеріали, які використовуються при виготовленні і прокладанні трубопроводів, зросла вартість енергоносіїв. Це вимагає того, щоб при оптимізації розмірів трубопроводів розглядалось також питання скорочення витрат на експлуатацію систем тепlopостачання, зокрема на транспортування теплоносія в них, оскільки, як показує практика, вона є суттєвою складовою собівартості теплової енергії, що відпускається споживачам.

Виходячи з цього, метою роботи є формулювання і розв'язок задачі оптимізації розмірів трубопроводів систем тепlopостачання і, в тому числі, систем опалення та розробка рекомендацій по зниженню витрат енергії на транспортування теплоносіїв в нових та існуючих системах.

Методика досліджень

Оптимізацію розмірів трубопроводу проводили виходячи з мінімуму фінансових видатків на спорудження і експлуатацію системи тепlopостачання протягом всього терміну експлуатації, включно з втратами теплоти в навколишнє середовище.

Цільовою функцією задачі оптимізації є приведені видатки на спорудження та експлуатацію системи

$$S = K + ET, \quad (1)$$

де K – капітальні витрати на спорудження системи тепlopостачання, грн; E – витрати на експлуатацію, грн/рік; T – термін експлуатації системи тепlopостачання, рік.

Капітальні витрати при прокладанні трубопроводів складаються з вартості труб та допоміжного обладнання, що використовується при прокладці (наприклад, залізобетонні елементи при підземній, опори при надземній прокладці трубопроводів тощо). Разом з тим, вартість допоміжного обладнання, хоча і залежить від розмірів тру-

бопроводу, при оптимізації діаметру труби не буде мати суттєвого впливу. Зважаючи на це, до цільової функції з капітальних витрат можна включити тільки вартість труб, умовно знехтувавши в подальшому похідною від вартості допоміжного обладнання. Тоді капітальні витрати будуть визначатися залежністю

$$K = B_m l, \quad (2)$$

де B_m – вартість погонного метра труби, грн/м; l – довжина трубопроводу, м.

Витрати при експлуатації трубопроводів складаються з видатків, пов'язаних з витратою енергії на транспортування теплоносія, втратами теплоти в навколишнє середовище, витрат на ремонт трубопроводів тощо. З цих витрат безпосередньо від діаметру трубопроводу будуть залежати тільки витрати на транспортування теплоносія та витрати, пов'язані з втратами теплоти, які, на відміну від інших витрат, що не залежать від діаметру трубопроводу, були враховані при складанні цільової функції. Таким чином, витрати на експлуатацію

$$E = E_m + E_{\text{втр}}, \quad (3)$$

де E_m – витрати на електроенергію при транспортуванні теплоносія, грн/рік; $E_{\text{втр}}$ – витрати пов'язані з втратами теплоти в навколишнє середовище, грн/рік.

Витрати на електроенергію при транспортуванні теплоносія

$$E_m = \frac{0,001Q(P_{\text{тр}} + P_{\text{мс}})C_e T_p}{\eta}, \quad (4)$$

де $Q = \frac{\pi d^2}{4} V$ – витрата теплоносія, м³/с; $P_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2}$ і $P_{\text{мс}} = \Sigma \zeta \frac{\rho V^2}{2}$ – втрати тиску на тертя і на місцеві опори, Па; V – швидкість теплоносія, м/с; C_e – ціна електроенергії, грн/(кВт·год); T_p – тривалість роботи системи протягом року, год; η – коефіцієнт корисної дії насосів.

Коефіцієнт тертя для шорстких труб визначали за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

де d – внутрішній діаметр труби; k – шорсткість, м; $Re = \frac{Vd}{\nu}$ – число Рейнольдса, ν – кінематична в'язкість, m^2/s .

Витрати, пов'язані з втратами тепла в навколишнє середовище, визначаються як

$$E_{\text{втр}} = \pi q d \Pi_m T_p,$$

де q – питомі втрати тепла з поверхні трубопроводу, що залежать від характеру теплообміну з навколишнім середовищем, $Вт/м^2$; Π_m – ціна теплової енергії, $грн/(кВт \cdot год)$.

Мінімуму приведених видатків буде відповідати значення похідної

$$\frac{dS}{dd} = 0. \quad (6)$$

яка, відповідно формули (1), в загальному випадку має вигляд

$$\frac{dS}{dd} = \frac{dK}{dd} + T \frac{dE}{dd},$$

де, враховуючи (2)-(5),

$$\frac{dK}{dd} = l \frac{dB_m}{dd};$$

$$\frac{dB_m}{dd} = 16592d + 3020;$$

$$\frac{dE}{dd} = \frac{dE_m}{dd} + \frac{dE_{\text{втр}}}{dd};$$

$$\frac{dE_{\text{втр}}}{dd} = \pi q l \Pi_m T_p$$

$$\frac{dE_m}{dd} = \frac{0,001 Q \Pi_e T_p \left(\frac{dP_{mp}}{dd} + \frac{dP_{mc}}{dd} \right)}{\eta};$$

$$\frac{dP_{mp}}{dd} = \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2} \frac{d\lambda}{dd} - \lambda \frac{l}{d^2} \frac{\rho V^2}{2} + \lambda \frac{l}{d} \rho V \frac{dV}{dd};$$

$$\frac{dP_{mc}}{dd} = \Sigma \zeta \rho V \frac{dV}{dd};$$

$$\frac{d\lambda}{dd} = 0,0275 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{-0,75} \left(-\frac{K}{d^2} - \frac{68}{Re^2} \frac{dRe}{dd} \right);$$

$$\frac{dRe}{dd} = \frac{V}{\nu} + \frac{d}{\nu} \frac{dV}{dd};$$

$$\frac{dV}{dd} = -\frac{8Q}{\pi d^3}.$$

Результати досліджень

Вартість погонного метра труб ДСТУ Б В.2.5-31:2007, що використовуються для прокладання теплових мереж, за даними моніторингу цін взятих з [12], яка була використана при подальших розрахунках, в залежності від їх внутрішнього діаметру (умовний прохід) показана на рис. 1.

На рис. 2, в якості прикладу, показані витрати на експлуатацію теплової мережі, що включають в себе витрати на транспортування теплоносія і витрати, пов'язані з втратою теплоти в навколишнє середовище при наступних умовах: $l=1000$ м, $k=1\cdot 10^{-4}$ м, $\Sigma\zeta=25$, $\rho=950$ кг/м³, $\nu=2,65\cdot 10^{-7}$ м²/с, $q=10$ Вт/(м²·К), $\Delta t=150$ К, $C_e=1,5$ грн/(кВт·год), $C_m=1,893$ грн/(кВт·год) (2200 грн/Гкал), $T_p=4200$ год, $T=10$ років. Як впливає з графіка, положення мінімуму витрат на експлуатацію залежить від витрати теплоносія. При цьому, як і слід було очікувати, для забезпечення мінімуму витрат теплові мережі з більшою витратою теплоносія мають прокладатися з трубопроводами більшого діаметру.

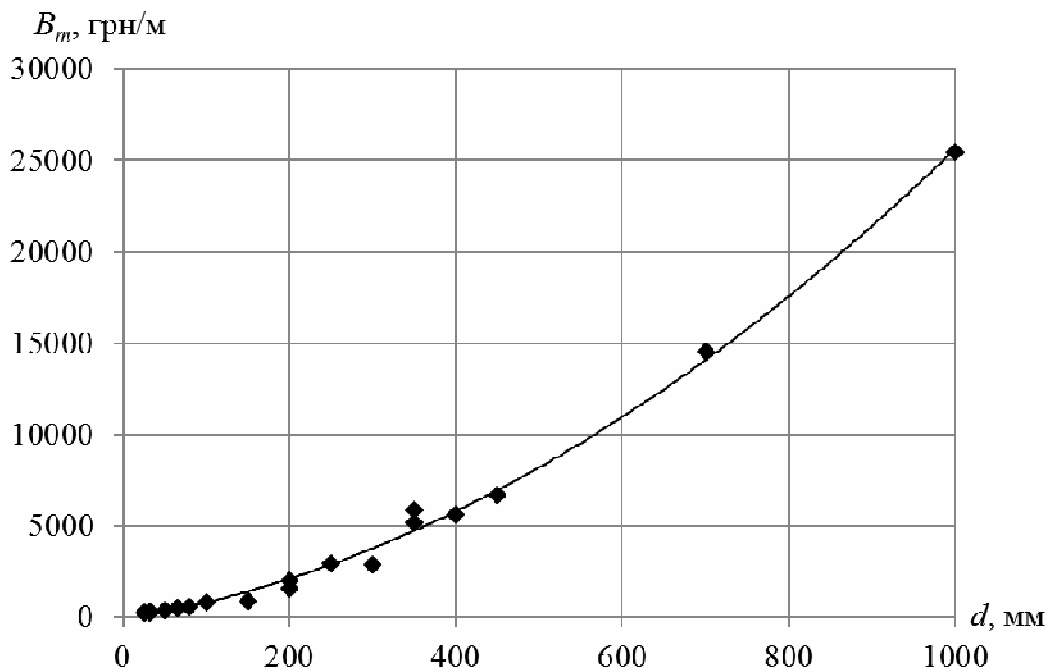


Рисунок 1 – Вартість погонного метра труб ДСТУ Б В.2.5-31:2007

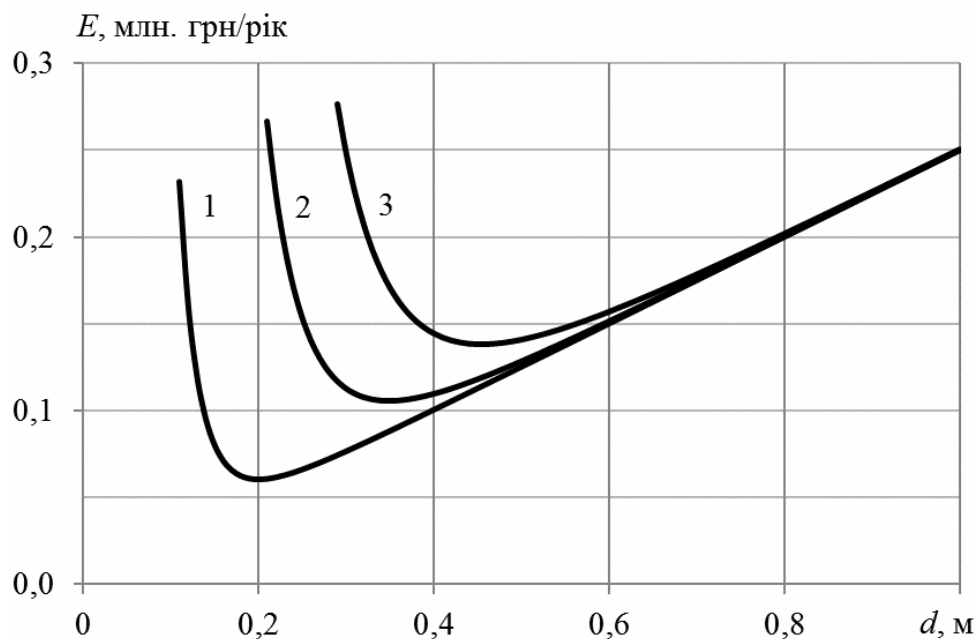


Рисунок 2 – Витрати на експлуатацію теплової мережі:
1 – $Q=100$ м³/год, 2 – 300 м³/год, 3 – 500 м³/год

Оптимальний внутрішній діаметр трубопроводу для теплової мережі, при якому сума капітальних витрат на спорудження системи теплопостачання та витрат на її експлуатацію буде мінімальною для наведених вихідних даних, показаний на рис. 3.

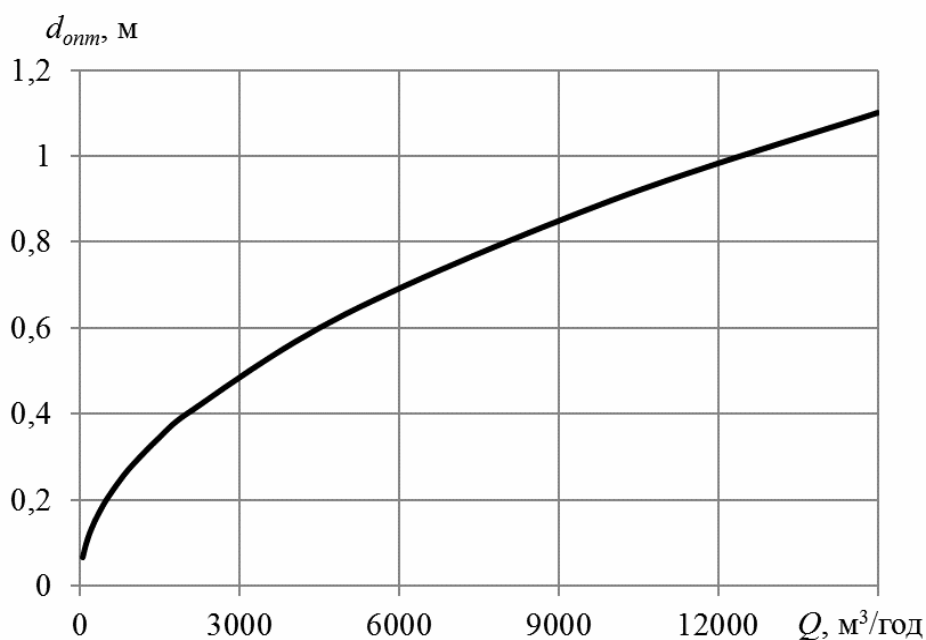


Рисунок 3 – Оптимальний діаметр трубопроводу в залежності від витрати теплоносія

Висновки

Наведена в роботі методика розрахунку оптимального діаметру трубопроводу теплової мережі дозволяє визначити розміри трубопроводів, що відповідають мінімуму витрат на її спорудження і експлуатацію, і може використовуватись при проектуванні систем теплопостачання. Застосування цієї методики, як очікується, дозволить знизити приведені видатки на 5...10 %.

ЛІТЕРАТУРА

1. Статистичний бюлетень «Постачання та використання енергії за 2016 рік» / Державна служба статистики України. – 2017. – 23 с.
2. Ратушняк Г.С. Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання / Г.С. Ратушняк, Г.С. Попова // Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 120 с.
3. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железна, Ю.Б. Матвеев, М.М. Жовмір / Промышленная теплотехника. – Т. 28, № 2. – 2006. – С. 85-93.
4. Крижанівський Є.І. Зниження обсягів споживання природного газу для теплопостачання шляхом використання теплових насосів. / Є.І. Крижанівський, Ф.В. Козак, Л.Ю. Козак // Нафтогазова енергетика. – № 1(10). – 2009. – С. 88-93.
5. Олексюк А.О. Створення енергоресурсозберігаючих систем геотермального теплопостачання з використанням сонячної енергії та теплових насосів / А.О. Олексюк, С.О. Челапко, А.А.Горделюк // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – № 1(12). – 2011. – С. 143-150.
6. Пшінько О. М. Аналіз ефективності системи теплопостачання студмістечка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту / О.М. Пшінько, В.О. Габрінець, В.М. Горячкін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 2 (50). – С. 74 –82.
7. Демченко В.В. Методи підвищення енергоефективності будівлі. // В.В. Демченко, Х.М. Чуприна, О.В. Невмержицький – Управління розвитком складних систем. – 2013. – № 16. – С. 138-143.
8. Ионин А.А. Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая. – М., Стройиздат, 1982. – 336 с.
9. Коваль В.П. Гидрогазодинамика трубопроводов. / В.П. Коваль, Ф.И. Аврахов. – Днепропетровск, ДГУ, 1972. – 123 с.
10. Боом Б. Принципы оптимизации при проектировании разводящих трубопроводов / Б. Боом, Х. Кристенсен // Энергосбережение – №4. – 2007. – С.66-71.
11. Дмитриев А.Н. Руководство по оценке экономической эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия/ А.Н. Дмитриев, Ю.А. Табунщиков, И.Н. Ковалев, Н.В. Шилкин. – М.:АВОК-ПРЕСС, 2005, 120 с.
12. Стальные изолированные трубы в Украине. [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://prom.ua/ua/Stalnye-izolirovannyye-truby.html> (дата звернення 01.11.2017) – Назва з екрана.

Ю.Ф. Даниев, В.П. Пошивалов, Л.В. Резниченко
**ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ СРЕДНЕГО ОСТАТОЧНОГО
РЕСУРСА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Аннотация. Рассмотрены вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием. Получены выражения для среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием и экспоненциальным распределением наработки до отказа. Показано, что интенсивность отказов таких систем возрастает с течением времени, хотя интенсивность отказов нерезервированной системы от времени не зависит, из чего следует, что наступает такой момент времени, после которого использование резервированной системы себя не оправдывает.

Ключевые слова: модель, остаточный ресурс, резервирование, техническая система

Постановка проблемы. Решение проблемы обеспечения надёжности технических систем в известной мере определяется уровнем разработки моделей и методов оценки их ресурса. В дальнейшем под термином ресурс будем понимать период, который увязывается с наработкой технической системы (ТС) от начала его эксплуатации до перехода в предельное состояние. Далее будем считать, что исследуемая система работает без перерывов, т.е. наработка непрерывна. Применительно к эксплуатационным условиям ТС основным понятием ресурса является индивидуальный остаточный ресурс, т.е. продолжительность эксплуатации от конкретного момента времени до достижения некоторого предельного состояния. С этим понятием тесно связано и другое понятие - ресурсный отказ. Под ресурсным подразумевается отказ, в результате которого техническая система достигает предельного состояния. Следует отметить, что характеристики предельных состояний технических систем могут иметь различную природу и количественные параметры. Поэтому были введены следующие категории: назначенный, технический, экономический, маркет-ресурс, экологический и морально-эстетический ресурс [1-3, 5, 6].

Рассмотрим технический ресурс, который регламентируется предельным износом или ухудшением физических свойств материалов базовых конструктивных элементов технической системы до предельно допустимых значений, а также отказом одного или нескольких элементов, восстановление которых не предусмотрено нормативной документацией.

Из принципа стохастичности ресурса следует, что ресурс любой ТС является случайной величиной, которая описывается соответствующим видом распределения. Средний ресурс невосстанавливаемых систем T_c (математическое ожидание случайной наработки до первого отказа) можно представить в виде [1]

$$T_c = \int_0^{\infty} t g(t) dt, \quad (1)$$

где $g(t)$ – плотность распределения наработки до отказа.

При этом справедливо следующее выражение

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $G(t)$ – функция распределения наработки до отказа;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы (ВБР) на заданном интервале времени.

Известно, что остаточный ресурс – наработка ТС с момента времени τ – до перехода его в предельное состояние при установленных режимах применения и условиях эксплуатации. Если ς – наработка объекта от начала эксплуатации до перехода его в предельное состояние, то остаточная наработка ς_τ после времени τ – определяется по формуле

$$\varsigma_\tau = \varsigma - \tau,$$

где $\varsigma > \tau$.

Величина ς_τ является случайной, а значит, можно говорить о её числовых характеристиках. Одной из её характеристик является средний остаточный ресурс

$$R(\tau) = M(\varsigma_\tau),$$

где $M(\cdot)$ – символ математического ожидания.

Для оценки остаточного ресурса технического объекта по истечению времени τ вводится показатель «средний остаточный ресурс» в виде [3]

$$R(\tau) = \frac{\int_{\tau}^{\infty} P(t) dt}{P(\tau)}. \quad (3)$$

При этом $R(0) = T_c$ – средний ресурс системы.

Современный уровень развития сложных ТС, поставили перед разработчиками ряд проблем, связанных с обеспечением высокой надежности. Для обеспечения высокой надежности ТС применяют резервирование – метод повышения надежности объекта путем введения избыточности. В свою очередь, избыточность — это дополнительные средства и (или) возможности сверхминимально необходимых для выполнения объектом заданных функций. Резервирование широко используется в информационных системах для повышения надежности функционирования аппаратуры и программного обеспечения. В настоящее время мало исследованными являются вопросы, связанные с остаточным ресурсом резервированных систем.

Цель данной работы – разработка вероятностных моделей среднего остаточного ресурса систем с резервированием.

Основная часть. Существующие методы резервирования целесообразно разделять по следующим признакам: вид резервирования, способ соединения элементов, способ включения резерва, кратность резервирования, режим работы резерва, восстанавливаемость резерва. В дальнейшем рассмотрим структурное резервирование – один из видов резервирования, предусматривающее использование избыточных элементов, входящих в физическую структуру объекта. Суть структурного резервирования заключается в том, что в минимально необходимый вариант объекта вводятся дополнительные элементы.

Целесообразность применения резервирования определяется следующими факторами:

- исходным уровнем надёжности комплектующих изделий;
- заданным временем эксплуатации;
- наличием эффективной системы контроля и периодичностью проведения профилактики;

– возможностями использования менее избыточных методов повышения надёжности.

В настоящее время для повышения надёжности систем широкое применение в практике проектирования ТС получило резервирование путем параллельного соединения элементов, когда все элементы находятся под нагрузением (нагруженный резерв). Тогда при кратности резервирования m системы равнонадёжных элементов с параллельным резервированием ВБР будет равна

$$P_c(t) = \left[1 - (1 - P(t))^{m+1} \right]. \quad (4)$$

где $P(t)$ – ВБР элемента.

Учитывая, что

$$(1 - b)^n = \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k b^k,$$

где $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$, выражение (1) можно записать в виде

$$P_c(t) = \sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k P^k(t), \quad (5)$$

где

$$C_{m+1}^k = \frac{(m+1)!}{k!(m+1-k)!}.$$

Отметим, что справедливы соотношения [4]

$$\sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k+1} C_n^k}{k} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, \quad (6)$$

$$\sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k = 0,$$

$$C_n^0 = 1.$$

Пусть наработка до отказа элемента описывается распределением Вейбулла. Тогда функция, плотность распределения и интенсивность отказов будут равны

$$G(t) = 1 - e^{-\lambda t^\beta}, \quad (7)$$

$$g(t) = \beta \lambda t^{\beta-1} e^{-\lambda t^\beta},$$

$$\lambda(t) = \lambda k t^{\beta-1},$$

где λ и β – параметры распределения.

В этом случае ВБР будет равна

$$P(t) = e^{-\lambda t^\beta}. \quad (8)$$

Пусть $\lambda t^\beta = a^\beta$ и учитывая [4], что

$$\int_0^\infty e^{-x^\mu} dx = \frac{1}{\mu} \Gamma\left(\frac{1}{\mu}\right), [\operatorname{Re} \mu > 0]$$

можно получить, используя (1) и (8), средний ресурс элемента T определится по формуле

$$T = \int_0^\infty P(t) dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t^\beta} dt = \int_0^\infty \frac{e^{-a^\beta}}{\lambda \frac{1}{\beta} a^{\frac{1}{\beta}-1}} da = \frac{1}{\beta \lambda^{\frac{1}{\beta}}} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right).$$

Здесь $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$ – гамма-функция, а $\Gamma(1) = 1$ и

$$\int_0^\infty t^{\nu-1} e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu^\nu} \Gamma(\nu).$$

Пусть $P^k(t) = e^{-k\lambda t^\beta}$, тогда

$$\int_0^\infty P^k(t) dt = \int_0^\infty e^{-k\lambda t^\beta} dt = \frac{1}{\beta (k\lambda)^{\frac{1}{\beta}}} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right). \quad (9)$$

Учитывая (8) и (9), средний ресурс системы определится вы-

ражением
$$T_C = \int_0^\infty P_C(t) dt = \int_0^\infty \sum_{i=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k P^k(t) dt = \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)}{\beta \lambda^{\frac{1}{\beta}}} \sum_{k=1}^{m+1} \frac{(-1)^{k+1} C_{m+1}^k}{k^{\frac{1}{\beta}}}.$$

При $\beta = 1$ имеет место экспоненциальное распределение, то ВБР системы с одинаковыми параметрами λ примет вид

$$P_C(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1} = \sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda t}. \quad (10)$$

Тогда, учитывая (5) и (6) средний ресурс ТС определится так

$$T_C = \int_0^\infty P_C(t) dt = \int_0^\infty \left[\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda t} \right] dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{m+1} \frac{(-1)^{k+1} C_{m+1}^k}{k} = \frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{m+1} \frac{1}{k}. \quad (11)$$

Отметим, что соотношение (12) можно получить иначе, выполнив замену $1 - e^{-\lambda t} = x$ или $t = -\lambda^{-1} \ln(1 - x)$. Тогда

$$T_C = \int_0^\infty P_C(t) dt = \int_0^1 \left[1 - (1 - x)^{m+1} \right] dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^1 \frac{1 - x^{m+1}}{1 - x} dx = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i}.$$

Учитывая (2) и (11) получим выражение для интенсивности отказов

$$\begin{aligned}\lambda_c(t) &= \frac{g_c(t)}{P_c(t)} = -\frac{1}{P_c(t)} \frac{dP_c(t)}{dt} = \\ &= \frac{\lambda(m+1)e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^m}{1-(1-e^{-\lambda t})^{m+1}} = \\ &= \frac{\lambda \sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k k e^{-k\lambda t}}{\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda t}}.\end{aligned}\quad (12)$$

Для высоконадёжных систем, удовлетворяющих условию $\lambda t \leq 0,01$, функцию $e^{-\lambda t}$ можно представить в виде разложения $e^{-\lambda t} = 1 - \lambda t$. В этом случае выражения для основных показателей надёжности могут быть с достаточной для практики точностью представлены в виде

$$\begin{aligned}P_c(t) &= 1 - (\lambda t)^{m+1}. \\ \lambda_c(t) &= \frac{\lambda^{m+1}(m+1)(1-\lambda t)t^m}{1-(\lambda t)^{m+1}}.\end{aligned}\quad (13)$$

Для экспоненциального распределения можно получить выражение для среднего остаточного ресурса системы с параллельным резервированием (формула (3))

$$\begin{aligned}R_c(\tau) &= \frac{\int_{\tau}^{\infty} P_c(t) dt}{P_c(\tau)} = \frac{\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k \int_{\tau}^{\infty} e^{-k\lambda t} dt}{\sum_{k=1}^n (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda \tau}} = \\ &= \frac{1}{\lambda} \frac{\sum_{k=1}^{m+1} \frac{(-1)^{k+1} C_{m+1}^k \Gamma(1, k\lambda \tau)}{k}}{\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda \tau}}.\end{aligned}\quad (14)$$

Здесь $\Gamma(\alpha, u) = \int_u^{\infty} e^{-t} t^{\alpha-1} dt$ – неполная гамма – функция [4] и уч-

тено, что $\int_u^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-\mu t} dt = \mu^{-\alpha} \Gamma(\alpha, \mu u)$.

Пусть $\gamma(\alpha, u) = \int_0^u t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ – неполная гамма – функция [4], то-

гда можно получить другое выражение для среднего остаточного ресурса системы

$$\begin{aligned}
 R_c(\tau) &= \frac{\int_{\tau}^{\infty} P_c(t) dt}{P_c(\tau)} = \frac{T_c - \int_0^{\tau} P_c(t) dt}{P_c(\tau)} = \\
 &= \frac{\frac{1}{\lambda} \sum_{k=1}^{m+1} \frac{(-1)^{k+1} C_{m+1}^k}{k} - \sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k \int_0^{\tau} e^{-k\lambda t} dt}{\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda \tau}} = \\
 &= \frac{1}{\lambda} \frac{\sum_{k=1}^{m+1} \left\{ \frac{(-1)^{k+1} C_{m+1}^k [1 - \gamma(1, k\lambda \tau)]}{k} \right\}}{\sum_{k=1}^{m+1} (-1)^{k+1} C_{m+1}^k e^{-k\lambda \tau}}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Как из (14), так из (15) нетрудно видеть что при $\tau = 0, R_c(0) = T_c = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{k}$.

Выводы

Рассмотрены вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием. Получены выражения для среднего остаточного ресурса ТС с резервированием и экспоненциальным распределением наработки до отказа. Анализ этих систем показывает, что интенсивность отказов резервированной системы возрастает с течением времени, хотя интенсивность отказов нерезервированной системы от времени не зависит, из чего следует, что наступает такой момент времени, после которого использование резервированной системы себя не оправдывает. Поэтому, резервирование выгодно применять для систем кратковременного использования, а для критически важных систем и систем длительного использования использовать другие методы повышения надёжности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М. : Высш. Шк., 2003. – 483 с.
2. Сухорученков Б. И. Методы контроля безопасности / Б. И. Сухорученков – М : Вузовская книга, 2017. – 330 с.
3. Бигус Г. А. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. – 445с.
4. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Наука, 1971. – 1108 с.
5. Пошивалов В. П. Системный подход к обеспечению надежности сложных систем / В. П. Пошивалов, Ю. Ф. Даниев, Л. В. Резниченко. // Системні технології : Регіональний міжвуз. сб. наук. праць. – Дніпро : НМАУ, 2017. – Вип. 2 (109). – С. 27 – 34.
6. Даниев Ю. Ф. Прогнозирование ресурса технических систем на основе вероятностных подходов и механики разрушения / Ю. Ф. Даниев, В. П. Пошивалов. // Математические проблемы технической механики – 2016 : Матеріали Міжнар. наук. конф. : (13–15 квітня 2016 р., Дніпродзержинськ – Дніпропетровськ). – Дніпродзержинськ, Дніпропетровськ: Днепродзерж. держ. техн. ун-т, Нац. металлург. академія України, 2016. – С.46.
7. Переверзев Е.С. Обслуживание технических систем с заданным ресурсом / Е.С. Переверзев, Ю.Ф. Даниев //Сучасні технології в аерокосмічному комплексі. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 40-річчю польоту людини в космос, 4-6 вересня 2001 року, – Житомир, 2001.-с. 67

А.И. Михалев, А.А. Стенин, М.А. Солдатова, А.С. Стенин

МОДАЛЬНАЯ РОБАСТНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Аннотация. Основная идея предложенной в статье модальной робастной стабилизации технологических процессов с параметрической неопределенностью состоит в том, что при возможных допустимых вариациях параметров технологического процесса, переходные процессы в системе робастной стабилизации должны оставаться в пределах заданных допустимых областей (множеств) гарантированным образом. Границы этих множеств задаются соответствующим расположением корней замкнутой системы стабилизации.

Ключевые слова: технологические процессы, параметрическая неопределенность, робастная стабилизация, принцип гарантированной динамики, модальный синтез

Введение

В настоящее время большой интерес вызывают задачи оптимальной стабилизации заданных режимов работы различных объектов управления с параметрической неопределенностью. Особенно остро эта задача касается технологических процессов в различных отраслях производства, в частности, в машиностроении.

В большинстве случаев это связано, в первую очередь, с невозможностью точно определить параметры технологических процессов, упрощением описания математической модели, снижением степени сложности, пренебрежением существующих нелинейностей. Кроме того, параметры могут изменяться под действием внешних неконтролируемых возмущений и т.д. В этих случаях для обеспечения выполнения заданных режимов работы технологических процессов, а, следовательно, и обеспечения качества выпускаемой продукции, требуется постоянная коррекция параметров управляющего устройства, что не всегда удобно с практической точки зрения. Именно поэтому возникает необходимость создания робастных систем управления, кото-

рые обеспечивали бы требуемое качество функционирования в этих условиях. Созданию робастных систем управления посвящен целый ряд работ, в частности [1-6].

В работе [1] параметры управляющего устройства выбираются таким образом, чтобы обеспечить нечувствительность системы к произвольным неизвестным возмущениям. В работе [2] рассмотрены некоторые способы динамической компенсации ограниченных по величине возмущений. В работе [3] выделяется сигнал, несущий информацию о внешних и параметрических возмущениях системы с целью компенсации их влияния на регулируемую переменную. В работах [4-6] рассматривается задача выбора среди множества стабилизирующих регуляторов такого, который оптимизирует некоторый критерий, характеризующий качество управления. Наиболее распространенным ее решением является метод H_∞ -оптимизации, который заключается в построении стабилизирующего регулятора для систем с возмущениями [4]. Регуляторы, синтезированные с использованием этого критерия оптимальности, обеспечивают устойчивость замкнутой системы и минимальную чувствительность к возмущениям. В работах [5,6] для конструирования субоптимального регулятора управляющее воздействие разложено на две составляющие: оптимальное управление, которое позволяет минимизировать заданный интегральный функционал качества, а компенсация неопределенностей в объекте базируется на подходе, предложенном в [2].

Данная статья является развитием указанных работ и посвящена разработке модального подхода к обеспечению робастной устойчивости функционирования технологических процессов в режимах стабилизации с одновременным обеспечением заданных показателей качества переходных процессов. Синтез статического робастного линейно-квадратичного регулятора с гарантированной динамикой переходных процессов в режимах стабилизации осуществляется на основе предложенного авторами в работе [10] модального синтеза линейных динамических систем и принципа гарантированной динамики [9].

Постановка задачи

Пусть динамика отклонений от заданных значений управляемого и наблюдаемого технологического процесса с неопределенностью в параметрах описывается в режимах стабилизации системой линейных дифференциальных уравнений вида:

$$\dot{x}(t) = (A + \Lambda)x(t) + Bu(t); \quad (1)$$

где x – n -мерный вектор отклонений переменных состояния технологического процесса от заданных значений; $u(t)$ – m -мерный вектор коррекции основного управления; A , B – матрицы коэффициентов размерностью $(n \times n)$ и $(n \times m)$ соответственно; Λ – неизвестная вещественная матричная функция неопределенностей размерности $(n \times n)$.

Необходимо определить оптимальное управление $\bar{u}(t)$, переводящее систему (1) из заданного начального состояния $x(t_0) = x_0$ в конечное $x(\infty) = 0$ и минимизирующее квадратичный функционал вида:

$$I_\sigma = \int_{t_0}^{t_k} [\bar{x}^T(t) Q \bar{x}(t) + \bar{u}^T(t) R \bar{u}(t)] dt, \quad (2)$$

где $t_0 = 0$; $t_k = \infty$, а Q и R – положительно определенные матрицы размерностью $(n \times n)$ и $(m \times m)$ соответственно.

Обзор существующих решений

В приведенной выше постановке задача стабилизации заданных режимов работы технологических процессов с неопределенностью в параметрах относится к линейно-квадратичным задачам оптимизации, которая сводится к решению нелинейного алгебраического уравнения Риккати, решение которого дает искомые значения неизвестных коэффициентов в законе оптимального управления, представляющего собой линейную комбинацию переменных состояния технологического процесса. В зависимости от вида матрицы неопределенностей Λ , существует два основных подхода к решению поставленной задачи стабилизации, связанные с решением уравнения Риккати [7].

В первом случае рассматривается система вида

$$\dot{x}(t) = [A + \Lambda(\mu)]x(t) + Bu(t), \quad (3)$$

где $\lim_{\mu \rightarrow 0} \Lambda(\mu) = 0$, а μ – параметрическая неопределенность, удовлетворяющая неравенству

$$\|\Lambda(\mu)\| \leq I_A \|\mu\|. \quad (4)$$

Тогда, согласно [7], оптимальное управление можно представить в виде:

$$\bar{u}(t) = -(K + k)\bar{x}(t), \quad (5)$$

где K – матрица коэффициентов оптимального закона стабилизации системы (1) при отсутствии матрицы неопределенностей Λ , а k – матрица коэффициентов компенсации влияния неопределенностей на параметры системы (1), определяемая как

$$k = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} B^T P(\varepsilon) = 0, \quad P(\varepsilon) \geq 0. \quad (6)$$

В формуле (6) $P(\varepsilon)$ определяется из уравнения Лурье-Риккати $A^T P(\varepsilon) + P(\varepsilon) A - \varepsilon^{-1} B B^T P(\varepsilon) + I = 0$. (7)

Здесь $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} P(\varepsilon) = P$, где P – решение уравнения Риккати для системы (1) при отсутствии матрицы неопределенностей Λ .

Во втором случае считается, что матрица параметрических возмущений принадлежит некоторому множеству параметризации E при фиксированных матрицах Q и R и определяется как

$$E(A + \Lambda(\mu))_m = 1/2 B R^{-1} B^T P - 1/2 P^{-1} Q - mP, \quad (8)$$

где

$$m^T = \begin{bmatrix} 0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ -m_1 & 0 & m_4 & m_5 \\ -m_2 & -m_4 & 0 & m_6 \\ -m_3 & -m_5 & -m_6 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

кососимметрическая матрица, элементы которой m_i определяются по теореме Харитонова [8] о робастности линейных динамических систем. Формула (9) осуществляет канонизацию матрицы и используется в дальнейшем для определения компенсационного управления k в законе оптимальной стабилизации (5).

Обозначив канонизированную матрицу $A + \Lambda(\mu)$ через A^* , определим все множество компенсационных регуляторов k согласно работе [8] как

$$\{E(k)\}_{\beta\pi} = B^* (A^* - 1/2 B R^{-1} (-1) B^T P Q + (\beta)_k P + B^* R \pi, \quad (10)$$

где B^* и A^* – канонизированные матрицы; π – произвольная матрица подходящего размера; β – кососимметрическая матрица; B^R – правый делитель нуля максимального ранга [8]. В результате, можно утверждать, что синтезированный таким образом регулятор (5) являет-

ся робастным на множестве параметризации (8) и минимизирует функционал (2).

Рассмотренные подходы к синтезу оптимального закона стабилизации технологических процессов с неопределенностью в параметрах достаточно сложны в реализации и не могут обеспечить требуемые динамические показатели переходных процессов в режимах стабилизации. Этих недостатков лишена предлагаемая в данной статье модальная робастная стабилизация.

Модальная робастная стабилизация

С учетом (1) и (5) запишем уравнение замкнутой оптимальной системы в виде:

$$\dot{\bar{x}}(t) = [A + K]\bar{x}(t) + [\Lambda + k]\bar{x}(0). \quad (11)$$

Пусть из технологических соображений известны ограничения на элементы матрицы параметрической неопределенности Λ , связанные с погрешностью идентификации, т.е.

$$|\lambda_{ij}| \leq \Lambda_{ij}^0, \quad (12)$$

а также показатели качества на переходные процессы для переменных состояния в виде:

$$|x_i(t)| \leq \sigma_i^0. \quad (13)$$

Требуется синтезировать закон управления (5) при условиях (12) и обеспечить заданные показатели качества переходных процессов (13) в системе стабилизации технологических процессов с параметрической неопределенностью.

Предлагаемая ниже модальная робастная стабилизация базируется на модальном синтезе, предложенным авторами в работе [10], и принципе гарантированной динамики [9]. В основу принципа гарантированной динамики положена концепция допустимости, использующая в качестве оценки первичные показатели качества переходных процессов, таких как время переходного процесса, динамическая и статическая точность и др..

Запишем уравнение (11) в координатной форме

$$|\dot{x}_i(t)| = \sum_{j=1}^n [(a_{ij} + K_{ij} + k_{ij}) + \lambda_{ij}] x_j(t). \quad (14)$$

В соответствии с работой [9] условия (13) выполняются, если

$$\int_0^t x_i(\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau \leq \int_0^t \sigma_i(\tau) \sigma_i(\tau) d\tau, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [0, \infty]. \quad (15)$$

Подставляя выражение (14) в (15) получим

$$\int_0^t \left[\sum_{j=1}^n \left[(a_{ij} + K_{ij} + k_{ij}) + \lambda_{ij} \right] x_j(\tau) \right] x_i(\tau) d\tau \leq \int_0^t \sigma_i(\tau) \sigma_i(\tau) d\tau, \quad (16)$$

где $i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [0, \infty]$.

Зададим $\sigma_i^0(t)$ в виде

$$\sigma_i^0(t) = \sigma_i^0 e^{\alpha t}. \quad (17)$$

где σ_i^0 выбираются как оценки максимально возможных отклонений $x_i(t)$ в начальный момент времени, а α определяется из условия заданной степени затухания β_i переходного процесса (рис.1) и одинаково для всех переменных состояния, т.е.

$$e^{\alpha t_k} \leq \beta_i, \quad (18)$$

где $\alpha \leq 0, t_k$ – заданное время переходного процесса.

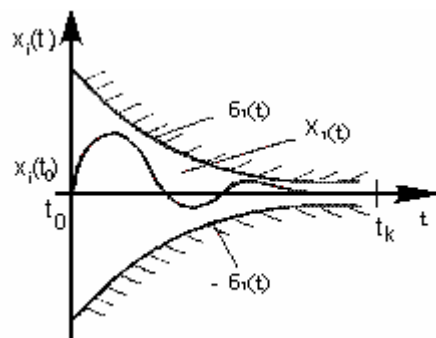


Рисунок 1 - Границы допустимой области изменения i-го параметра

Указанные динамические показатели переходных процессов обеспечиваются соответствующим выбором спектра корней замкнутой оптимальной системы согласно работе авторов [10].

С учетом (13), (17) и (18) уравнение (16) примет вид:

$$\int_0^t \left[\sum_{j=1}^n \left[(a_{ij} + K_{ij} + k_{ij}) + \lambda_{ij}^0 \right] \sigma_j^0 \right] \sigma_i^0 e^{2\alpha \tau} d\tau \leq \int_0^t \alpha (\sigma_i^0)^2 d\tau, \quad (19)$$

где $i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [0, \infty]$.

Интегрируя неравенство (19) на интервале $t \in [0, \infty]$, получим систему линейных алгебраических неравенств

$$\int_0^t \left[\sum_{j=1}^n \left[(a_{ij} + K_{ij} + k_{ij}) + \lambda_{ij}^0 \right] \sigma_j^0 \right] \sigma_i^0 e^{2\alpha\tau} d\tau \leq \alpha \sigma_i^0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (20)$$

Неравенства (20) гарантируют принадлежность переходных процессов к заданным допустимым множествам, что в свою очередь гарантирует не только устойчивость синтезированной робастной системы автоматического оптимального управления технологическим процессом с параметрической неопределенностью, но и обеспечение заданного качества их переходных процессов в режиме стабилизации

Отсюда следует, что множество значений k_{ij} , удовлетворяющее системе неравенств (20), обеспечивает робастность системы (1) к параметрическим возмущениям (12) на основе закона управления (5), полученного на основе принципа гарантированной динамики [9] и процедуры модального синтеза [10]. Одним из вариантов практического определения значений компенсационных регуляторов k_{ij} является решение системы равенств (20) на границах допустимых областей $+\alpha\sigma_i^0$ и $-\alpha\sigma_i^0$ с помощью известных численных методов [11].

Заключение

В работе предложен один из подходов к синтезу робастных систем оптимальной стабилизации технологических процессов в условиях неопределенности их параметров. Процедура модального робастного синтеза базируется на принципе гарантируемой динамики, что позволяет решить проблему не только устойчивости, но и требуемого качества управления, и состоит в том, что при возможных допустимых вариациях параметров объекта, переходные процессы в системе стабилизации должны оставаться в пределах заданных допустимых областей (множеств) гарантированным образом. Границы этих множеств задаются соответствующим расположением корней проектируемой системы и заданной допустимой погрешностью идентификации параметров системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
2. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 7. – с. 103–115.
3. Бобцов А. А., Пыркин А. А. Компенсация гармонического возмущения в условиях запаздывания по управлению // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 4. – с. 19–23.
4. Методы классической и современной теории автоматического управления. Теория оптимизации автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2004. – Т. 4. – 744 с.
5. Atassi A. N., Khalil H. K. Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, N 9. – P. 1672–1687.
6. Галяув Е. Р., Фуртат И. Б. Робастное субоптимальное управление линейными объектами по выходу // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2010. – № 8. – с. 24–31.
7. Буков В.Н. Аналитический синтез робастных регуляторов на основе параметризации уравнения Лурье-Риккати / В.Н. Буков, Н.И. Сельвесюк // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №2. – с. 6-16.
8. Буков В.Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, В.В. Косъянчук, Е.Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та : Сер. Физ.-мат. науки.– К.: Изд-во Киевского нац. ун-та, 2002. – Вып. 1. – с. 19-28.
9. Оморев Т.Т. Принцип гарантированной динамики в теории систем управления. Кн.1.Бишкек.-Илим.2001.-150с.
10. А.А.Стенин, О.И.Лисовиченко, М.М.Ткач, В.П.Пасько. Модальный синтез оптимальных законов стабилизации линейных стационарных систем Bulgarian Journal for Engineering Design, issue. Mechanical Engineering Faculty, Technical University-Sofia. № 30, 2016.pp.11-16.
11. Самарский А.А. Введение в численные методы: Учебное пособие для вузов. 3-е изд.-СПб.: Изд-во «Лань», 2005. -288 с.

В.Н. Пилипчук, С.А. Волкова

АНАЛІЗ ОДНІЄЇ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ЕКОЛОГІЧНОЇ КОНКУРЕНЦІЇ

Анотація. Розглядається нелінійна динамічна система з імпульсною дією. Складність математичного формулювання проблеми для аналітичного дослідження систем з імпульсними впливами обумовлена не гладкістю відповідних динамічних процесів. Це призводить до необхідності розглядати замість однієї системи рівнянь цілої серії систем (в проміжках між імпульсами). Альтернативний шлях полягає у введенні в рівняння сингулярного функцій, що моделюють імпульси, і розгляду рівнянь як інтегральних тотожностей в рамках теорії розподілу. А це вимагає додаткових математичних обґрунтувань в нелінійному випадку.

Ключові слова: нелінійні системи, імпульсні впливи, негладке перетворення аргументу, функція Дірака.

Вступ

Традиційні підходи до моделювання імпульсних впливів так чи інакше зводяться до двох напрямків. Відповідно до першого, імпульсні дії моделюють так, що координати і швидкості підкоряються додатковим умовам в околиці точок локалізації імпульсів. Наприклад, завданням стрибка швидкостей в момент дії імпульсів

Другий напрямок спирається на теорію узагальнених функцій. В цьому випадку імпульсні дії моделюються за допомогою введення в рівняння сингулярного членів типу δ -функцій Дірака.

Основна перевага першого способу моделювання полягає в тому, що описують систему диференціальні рівняння такі ж, як і при відсутності імпульсів (Самойленко А.М., Перестюк М.О., Ахметов М.У.). Однак ці рівняння розглядаються окремо на кожному з інтервалів між імпульсами і, таким чином, замість однієї системи доводиться вирішувати цілу послідовність систем.

Другий спосіб моделювання дає єдину систему рівнянь на всьому часовому інтервалі без введення згаданих вище умов на

змінні, але відповідний аналіз повинен бути виконаний коректно в рамках теорії узагальнених функцій (Владиміров В.С., Кеч В., Омелянов Г.А., Іванов В.К., Маслов В.П.), що вимагає у нелінійних випадках додаткового математичного обґрунтування.

У даній роботі для моделювання імпульсних процесів застосовується метод, сформульований Пилипчуком В.М. [1-3] і заснований на негладку перетворенні аргументу (часу). Такий похід дозволяє, з одного боку, побудувати математичну модель, яка містить δ -функцій Дірака, а з іншого, отримати її рішення у вигляді єдиного аналітичного вираження на всьому часовому інтервалі.

Слід зазначити, що виключення «внутрішніх» ударів за допомогою негладких перетворень просторових координат застосовував Журавльов В.Ф. Цей метод, по-видимому, безпосередньо застосуємо тільки до віброударних систем і систем з жорсткими не утримується зв'язками. При цьому, перетворенню піддається просторова координата, а не час. У використаному в роботі методі (метод Пилипчука В.М.), основному об'єкт перетворення - час, а не шукана функція.

Моделювання нелінійних систем

за допомогою негладкого перетворення часу

Ідея методу негладкого перетворення аргументу, сформульованого Пилипчуком В.Н. [1-4] полягає в тому, що дія імпульсів на систему моделюються за допомогою другої узагальненої похідної функції $\tau(t; \Theta)$.

$$\tau(t) = \begin{cases} \frac{t}{1+\Theta} & -1-\Theta+4k \leq t \leq 1+\Theta+4k \\ \frac{-t+2}{1-\Theta} & 1+\Theta+4k \leq t \leq 3-\Theta+4k \end{cases}$$

$$\tau(t+4) = \tau(t)$$

де Θ - параметр, що дозволяє моделювати різного типу імпульсні дії. Тобто моделюються два види імпульсних впливів: рівновіддалених ($\Theta = 0$) і не рівновіддалених ($\Theta \neq 0$). При $\Theta = 0$ функція $\tau(t; \Theta)$ стає симетричною, її графік складається із склеєних відрізків (рис.1).

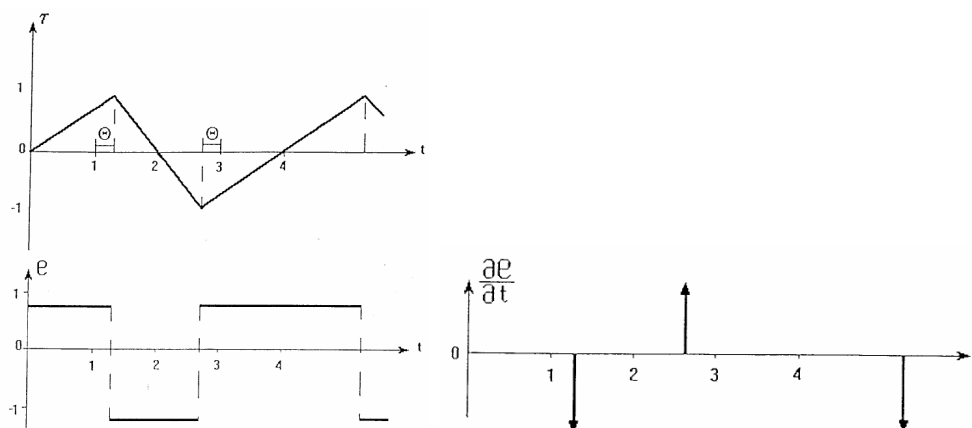


Рисунок 1 - Графік пилоподібної функції $\tau(t; \Theta)$ та її похідних

Перша похідна має вигляд:

$$e(t; \Theta) = \frac{d\tau(t; \Theta)}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{1+\Theta}, & -1-\Theta+4k \leq t \leq 1+\Theta+4k \\ \frac{-1}{1-\Theta}, & 1+\Theta+4k \leq t \leq 3-\Theta+4k \end{cases}$$

Друга похідна:

$$\frac{d^2 \tau(t)}{dt^2} = \frac{de(t)}{dt} = \frac{2}{1-\Theta^2} \sum_{k=0}^n [\delta(t+1+\Theta-4k) - \delta(t-1-\Theta-4k)]$$

Квадрат похідної від функції $\tau(t; \Theta)$ є кускове - постійна функція з періодичною серією розривів першого роду. Тобто має місце співвідношення [1]

$$e^2 = \alpha + \beta e, \quad e \frac{de(t)}{dt} = \frac{1}{2} \beta \frac{de}{dt} \quad \alpha = 1/(1-\Theta^2) \quad \beta = -2\Theta/(1-\Theta^2) \quad (1)$$

Отже, перший етап розробки моделей для нелінійних систем з періодичними миттєвими діями полягає в спеціальному описі

імпульсів за допомогою функції $\frac{de(t; \Theta)}{dt}$.

Другий етап полягає в побудові математичної моделі, що враховує тимчасову локалізацію імпульсів, але що не містить сингулярних членів. Йдеться про створенні єдиної, "компактної" моделі, тобто моделі, що описує динаміку системи на всьому тимчасовому інтервалі. Розробка такої моделі заснована на методі негладкого перетворення часу $\{t \rightarrow \tau\}$:

$$x = X(\tau) + Y(\tau) e, \quad (2)$$

Таким чином, нерівне перетворення аргументу дозволяє побудувати математичну модель у вигляді крайової умови на стандартному інтервалі, в ході розв'язання якої визначаються невідомі функції X, Y . Функції $X(\tau)$ та $Y(\tau)$ є неперервними. Перевага побудованої моделі в порівнянні з вихідним рівнянням, полягає в тому, що воно не містить функцій Діраку. Крім того, оскільки нова змінна τ є не лише обмеженою ($-1 \leq \tau \leq 1$), але і періодичною по t , то розв'язок крайової задачі можна продовжити на всю числову вісь.

Побудова узагальненої математичної моделі екологічної конкуренції

Розглянемо математичну модель конкуренції однієї ізольованої популяції

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -px - \frac{2q}{1-\Theta^2} \sum_{k=0}^n [\delta(t-t_k^+) + \delta(t-t_k^-)] x - \varepsilon x^3 \end{cases}.$$

Її розв'язок будуємо у вигляді (2).

Перша похідна функції $x(t)$ має вигляд

$$\dot{x} = \alpha Y' + (X' + \beta Y')e + Y' \frac{de}{dt}.$$

Друга похідна функції $x(t)$ має вигляд

$$\ddot{x} = \frac{d}{dt} (X' + \beta Y') + \alpha (X'' + \beta Y'') + (\beta X'' + (\beta^2 + \alpha) Y'')e + Y' \frac{d^2 e}{dt^2}.$$

Наявність функції $\frac{de}{dt}$ у останньому виразі і в рівнянні загальної моделі дозволяє виключити цей член і побудувати математичну модель у вигляді крайової задачі, що не містить δ -функцію, відносно X, Y -компонент.

Введемо наступні позначення:

$$I_f = (1-\theta^2)^2 X^3 + 3(1-\theta^2)XY^2 - 2\theta Y^3.$$

$$R_f = (1-\theta^2)^2 3X^2 Y - 6\theta(1-\theta^2)XY^2 + (1+3\theta^2)Y^3.$$

Прирівнюючи нулю окремо коефіцієнти при τ та e , отримуємо математичну модель, що описує поведінку системи в загальному випадку

$$(1-\theta^2)X''' - 2\theta Y''' + (1-\theta^2)^2 pX = -\varepsilon(1-\theta^2)^2 R_f \quad (4)$$

$$(1 + 3\theta^2)Y'' - 2\theta(1 - \theta^2) X'' + (1 - \theta^2)^2 pY$$

Разом з умовами

$$Y|_{\tau=\pm 1} = 0 \quad (5)$$

$$(X' + qX)_{\tau=\pm 1} = [2\theta Y' + \theta^2(X' + qX)]_{\tau=\pm 1}$$

Співвідношення (4)–(5) утворюють крайову задачу для визначення функцій X і Y .

Не дивлячись на формально складніший вигляд, отримана модель (4)–(5) не містить сингулярних членів, і в цьому її основна перевага. Дія імпульсного збудження виявляється в крайових умовах з параметром q . При $q=0$ імпульси на систему не діють. Розв'язок задачі (4)–(5) може бути знайдено в класичному вигляді.

Висновки

1. Побудована математична модель внутрішньої конкуренції у залежності від народжуваності, загибелі особин популяції, обмеженості природних ресурсів та структури популяції [5],[6]. Модель містить функції Дірака, які описують миттєву зміну чисельності популяції (у момент часу $t_k^+ = 3 - \theta + 4k, k = 1, 2, \dots, n$, відбувається збільшення чисельності популяції; при $t_k^- = 1 + \theta + 4k, k = 1, 2, \dots, n$ – її зменшення).

2. За допомогою негладкого перетворення аргументу виконано перехід від моделі, що містить δ - функції до крайової задачі без функцій Дірака. Виключення функцій Дірака проведено за рахунок крайових умов.

Розглянуто два випадки:

- «малого дефіциту» природних ресурсів ($\varepsilon < 1$);
- “жорсткої” внутрішньовидової конкуренції ($\varepsilon > 1$).

У першому випадку розв'язок знайдено за допомогою асимптотичних методів. У другому – використано чисельний метод Рунге-Кутта.

3. Проведено аналіз і порівняння результатів точного ($\theta \neq 0, \varepsilon$ - будь-яке), асимптотичного ($\theta \neq 0, \varepsilon < 1$) і чисельного розв'язку ($\theta \neq 0, \varepsilon$ - будь-яке).

4. В результаті чисельного розрахунку встановлено три типи руху: періодичні, квазіперіодичні і хаотичні. При цьому визначальними параметрами системи є параметри ε (коефіцієнт загибелі особин) і параметр θ (відношення між народжуваністю і загибеллю особин популяції).

5. При Θ близькому до нуля (маємо природжену швидкість росту популяції) і $\Theta=1$ (кількість загиблих та народжених особин однакова) спостерігаються періодичні режими, тобто чисельність популяції не зменшується.

6. Результати чисельного дослідження моделі показали, що підвищена інтенсивність загибелі ε істотно змінює динаміку чисельності популяції. Модель допускає існування хаотичних режимів, які неможливі при досить «високій» пристосованості ($p=(2\pi)^2$) особин популяції. Хаотичні режими виникають при досить «низькій» пристосованості ($p=\pi^2$) особин популяції.

Підводячи підсумок приведенного аналізу різних режимів, породжених нелінійною моделлю динаміки популяції, можна зробити висновки. Одна група явищ пов'язана з існуванням регулярних і впорядкованих процесів типу граничних точок або циклів. У таких системах є порядок, що дозволяє передбачати майбутнє. Іншу групу складають хаотичні процеси, можливості, передбачення яких обмежені.

Крім того,

- взаємодія особин (наприклад, знаходження «шлюбних» пар) може привести до коливань чисельності популяції.
- при невеликому значенні коефіцієнта Мальтуса q (величина імпульсної дії не велика) існують періодичні і квазіперіодичні розв'язки. Із зростанням коефіцієнта Мальтуса (амплітуди імпульсної дії q) система втрачає стійкість, періодичні і квазіперіодичні режими зникають, і виникають складні процеси.

ЛІТЕРАТУРА

1. V. Pilipchuk Closed-form solutions for oscillators with inelastic impacts. // Journal of Sound and Vibration. – No. 359. – 2015. - p 154-167.
2. V. Pilipchuk Effective Hamiltonians for resonance interaction dynamics and interdisciplinary analogies // Procedia IUTAM 19, - 2016. pp. - 27-34
3. M Kovaleva, L Manevitch, V Pilipchuk Non-conventional phase attractors and repellers in weakly coupled autogenerators with hard excitation // EPL (Europhysics Letters). - 120 (3), 30007 – 2018.
4. Volkova S. A non-linear system using a non-smooth temporal transformation//Актуальные проблемы современных наук.Польша.-2012.–Т.42.-С.24-26
5. Pertseva T.A., Kireeva T.V., Bielosludtseva K.O, Volkova S.A. Immune and inflammatory predictors of survival in patients with severe community-acquired pneumonia//The pharma innovation journal.-Vol.3, No.3.–2014.– pp.21-26.

О.Ю. Потап, М.Д. Зінченко, М.А. Рибальченко, М.О. Потап
**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ
СИСТЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ
ПРОКАТНИХ ВАЛКІВ**

Анотація. Створено комп'ютерну модель автоматизованої системи компенсації ексцентриситету валків (АСКЕ), робота якої базується на активному пошуковому алгоритмі визначення параметрів ексцентриситету. Результати проведеного імітаційного моделювання підтвердили ефективність АСКЕ та її спроможність одночасно компенсувати ексцентриситет опорних та робочих валків з високою точністю.

Ключові слова. Ексцентриситет, автоматизована система, комп'ютерна модель, вузькосмуговий фільтр Бесселя, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Формування товщини листового прокату під час прокатки має низку особливостей, які пов'язані зі впливом різних технологічних факторів. Лише компенсація цього впливу може забезпечити стабілізацію товщини з необхідною точністю. З огляду на складність компенсації найбільш «неприємним» є вплив ексцентриситету прокатних валків, який виникає через неточності їхнього виготовлення. Неконтрольовані гармонічні коливання зазору між валками, що виникають через наявність ексцентриситету призводять до відповідних змін товщини прокату, створюючи загрозу виникнення браку.

Довгий час роботи зі зменшення впливу ексцентриситету валків на точність прокату стримувались низькою швидкістю електромеханічних натискних пристроїв, які використовувались на прокатних клітках. Дослідження методів компенсації ексцентриситету отримали суттєвого розвитку з появою гідравлічних натискних пристроїв, яким властива на порядок вища за електромеханічні пристрої швидкодія [1-3]. Проте остаточного вирішення задача так і не дістала й досі зберігає свою актуальність.

Аналіз патентної активності щодо розробки методів компенсації ексцентриситету та створення відповідних систем автоматизації (див. рис. 1.), що спостерігалась у світі з 1960 року по теперішній час, дозволив виявити близько 80-ти оригінальних технічних рішень, які були створені у колишньому СРСР, США, Німеччині, Великій Британії, Франції, Японії тощо. Як впливає з рис. 1, найбільша активність винахідників припадає на період з 1970р. по 1990 р.

Проте, суттєве зниження кількості патентів після 1990 року свідчить скоріш не про вирішення зазначеної технічної проблеми, а про її складність і вичерпання можливостей для її вирішення, що містились у залучених на той час підходах.

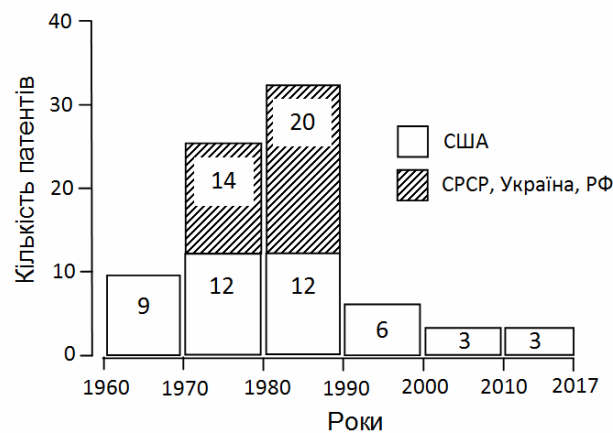


Рисунок 1 – Патентна активність
в галузі компенсації ексцентриситету

Анализ публикаций за темой исследования. Розгляд за суттю відомих технічних рішень щодо компенсації ексцентриситету прокатних валків на станах гарячої і холодної прокатки свідчить про перспективність підходу, який передбачає виділення змінних складових зусилля прокатки та/або товщини прокату, що обумовлені ексцентриситетом валків, та використання отриманої інформації для корекції міжвалкового зазору. Цей підхід (рис. 2) передбачає здійснення за допомогою системи 1 управління гідронатискним пристроєм примусових гармонічних коливань $\Delta S(t)$ міжвалкового зазору у протифазі до неконтрольованих коливань зазору, спричинених ексцентриситетом валків. При цьому уставка на примусові коливання формується генератором 2, а їхні параметри: амплітуда ΔS_e та фаза ϕ , визначаються у блоці 3 за різними алгоритмами, які, власне, і

відрізняють відповідні патенти. Зокрема, в роботі [4] було опрацьовано алгоритм активного пошуку, який передбачає уведення «пробних» примусових гармонічних коливань міжвалкового зазору. В технічному рішенні [5] цей алгоритм було деталізовано і реалізовано в автоматизованій системі компенсації ексцентриситету (АСКЕ), яка:

1) вимірює частоту ω обертання опорних валків, зусилля P прокатки та товщину h смуги на виході прокатної кліті;

2) виділяє змінні складові зусилля прокатки та товщини смуги, які мають частоту, що дорівнює частоті обертання опорних валків;

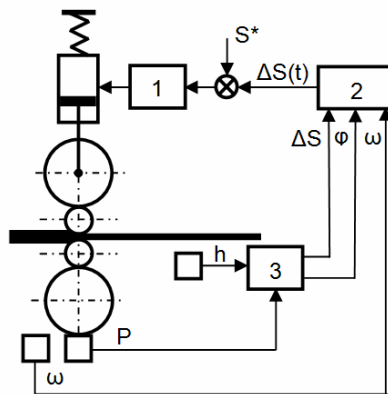


Рисунок 2 – Узагальнена схема компенсації ексцентриситету

3) при прокатці початкової ділянки смуги визначає амплітуди виділених змінних складових зусилля прокатки ΔP_e та товщини смуги Δh_e ;

4) по визначенні зазначених у п. 3 амплітуд обчислює амплітуду ΔS_e неконтрольованого змінення міжвалкового зазору через ексцентриситет валків за формулою

$$\Delta S_e = \Delta h_e + \frac{\Delta P_e}{M_K}, \quad (1)$$

де M_K – модуль жорсткості кліті;

5) здійснює примусове гармонічне змінення міжвалкового зазору з частотою ω , амплітудою ΔS_e та довільною фазою ϕ ;

6) після уведення за п. 5 примусових гармонічних коливань міжвалкового зазору вимірює амплітуду Δh_{\max} змінної складової товщини на відповідній ділянці смуги і обчислює зсув фази $\Delta \phi$ за формулою

$$\Delta\varphi = \pi - 2 \arccos\left(\frac{\Delta h_{max}}{2\Delta h_e}\right); \quad (2)$$

7) змінює фазу φ примусового гармонічного змінення міжвалкового зазору на величину $\Delta\varphi$ обчисленого за п. 6 зсуву фази.

Для одночасної компенсації ексцентриситету робочих валків АСКЕ діє в аналогічний спосіб, здійснюючи виділення змінних складових зусилля прокатки та товщини смуги, які мають частоту, що дорівнює частоті обертання робочих валків.

Мета роботи. Метою дослідження є доведення шляхом імітаційного моделювання на комп'ютерній моделі практичної можливості запропонованої АСКЕ бути реалізованою та її спроможності одночасно компенсувати ексцентриситет опорних та робочих валків, а також визначення ефективності АСКЕ як показника зменшення спричинених ексцентриситетом валків відхилень товщини прокату.

Модель процесу прокатки та САКЕ. Створена комп'ютерна модель, яка дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання процесу з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності роботи системи. Її можна розглядати як сукупність пов'язаних функціонально завершених блоків, які імітують власне ексцентриситет, процес прокатки у чотиривалковій кліті, вузькосмугові фільтри, що виділяють змінні складові технологічних параметрів, та окремі функціональні вузли АСКЕ (рис. 3).

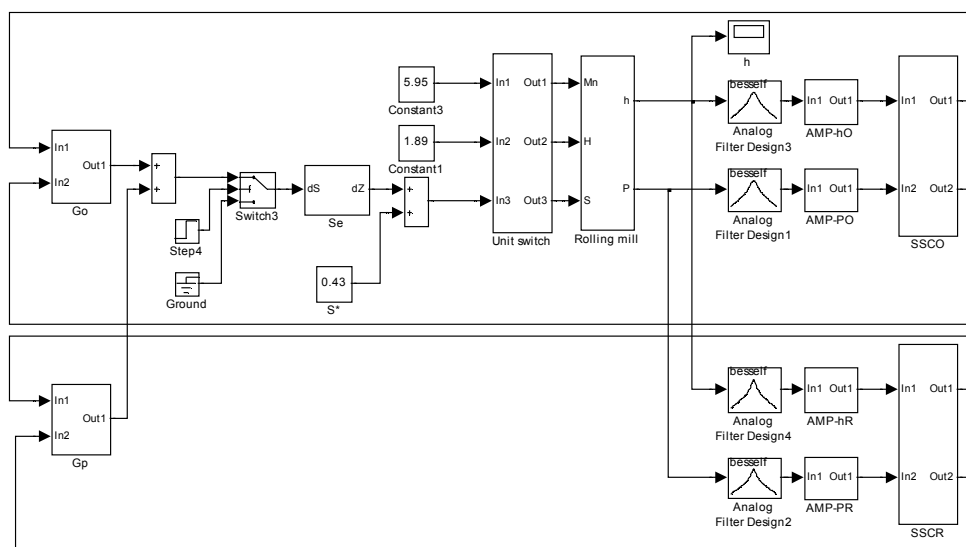


Рисунок 3 – Структурна схема моделі АСКЕ

Центральне місце в моделі посідає блок Rolling mill моделювання процесів, що протікають у прокатній кліті. На входи цього блоку подаються поточні значення технологічних змінних: товщини підкату $H(t)$, жорсткості смуги $MP(t)$ та міжвалкового зазору $S_0(t)$, а на його виходи видаються поточні значення зусилля прокатки $P(t)$ та вихідної товщини прокату $h(t)$.

Зусилля прокатки розраховується за формулою

$$P(t) = \frac{M_{II} M_K}{(M_{II} + M_K)} [H(t) - S_0(t)], \quad (3)$$

Товщина прокату легко визначається за рівнянням Сімса-Головина

$$h(t) = S_0(t) + \frac{P(t)}{M_K} \quad (4)$$

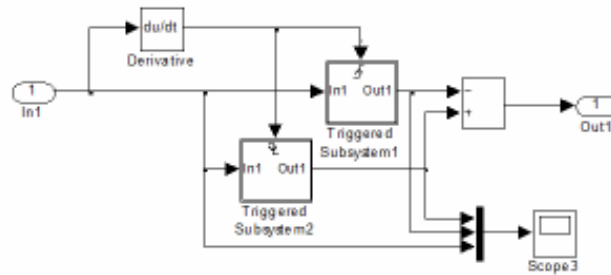
Поточні значення міжвалкового зазору з урахуванням ексцентриситету генеруються у блоці Se та надсилаються разом із сигналами товщини підкату $H(t)$ та жорсткості смуги $MP(t)$ на входи блоку Rolling mill крізь блок комутації Unit switch, що імітує завантаження заготовки до прокатної кліті.

Поточні значення зусилля прокатки $P(t)$ та товщини $h(t)$ з виходу блоку Rolling mill надходять до чотирьох вузькосмугових аналогових фільтрів Analog Filter Design, які виділяють змінні складові цих сигналів для подальшої обробки у чотирьох блоках визначення амплітуд AMP.

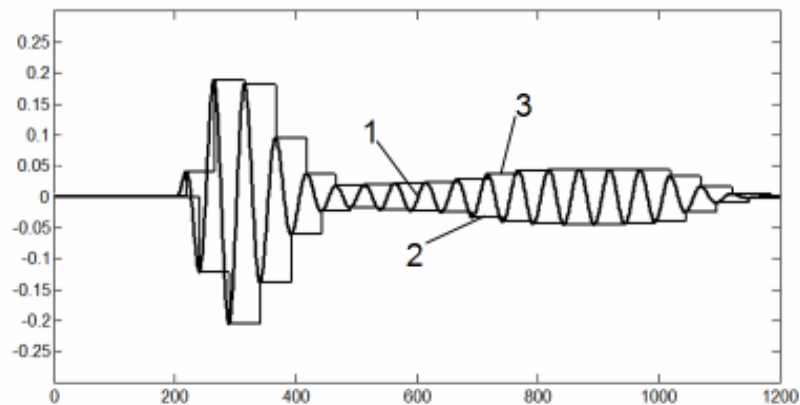
Кожний з цих блоків містить два тригери Triggered, що виконують функцію запам'ятовування вхідного сигналу в момент появи сигналу на керуючому вході (рис. 4,а). Ідея визначення амплітуди гармонічного сигналу полягає у запам'ятовуванні його максимального та мінімального значень та подальшого визначення різниці між ними (рис. 4,б).

Ознакою того, що сигнал набув екстремального значення є відповідність нулю його похідної. Отже для визначення моменту часу, що відповідає екстремуму застосовано блок диференціювання Dervativ. Сигнал з виходу цього блоку поступає на керуючі входи тригерів, перший з яких налаштований на спрацювання за наявності переднього фронту (перехід гармонічного сигналу через мінімальне значення), а другий – на спрацювання за наявності

заднього фронту (перехід гармонічного сигналу через максимальне значення).



а)



б)

Рисунок 4 – Схема (а) та осцилограма роботи (б) блоку AMP визначення амплітуд: 1- гармонічний сигнал на вході блоку; 2 – мінімальне та 3- максимальне визначені значення сигналу

Обчислення параметрів примусових коливань зазору відбувається у блоках, що моделюють роботу підсистеми SSCR компенсації ексцентриситету робочих та підсистеми SSCO компенсації ексцентриситету опорних валків.

Обчислені параметри примусових коливань зазору з виходів блоків SSCO та SSCR надходять до блоків генерації примусових коливань G_p та G_o (див. рис. 3) для компенсації ексцентриситету робочих та опорних валків відповідно.

Згенеровані примусові коливання додаються у блоці Se до коливань зазору, спричинених власне ексцентриситетом, після чого поступають на відповідний вхід блоку Rolling mill моделювання процесів у прокатній кліті.

Вибір типу та параметрів вузькосмугових фільтрів. Для виділення з сигналів зусилля прокатки та товщини прокату змінних складових, що мають частоту, яка відповідає частоті обертання опор-

них та робочих валків у складі АСКЕ використовували відповідні вузькосмугові фільтри.

Вибір оптимального типу фільтрів та їхніх параметрів здійснювали шляхом моделювання процесу фільтрації суміші чотирьох синусоїдальних сигналів, амплітуди та частоти яких відповідали аналогічним параметрам ексцентриситету опорних та робочих валків. За результатами проведеного дослідження найкращу точність та швидкодію продемонстрували фільтри Бесселя третього порядку (рис. 5). Для цього типу фільтрів відфільтровані сигнали на частоті опорних (крива 2) та робочих (крива 4) валків практично ідеально співпадають з відповідними змінними складовими (крива 1 та крива 3), що у змішаному вигляді подавались на вхід фільтру. Відмінність амплітуди відфільтрованого сигналу від вихідного початкового не перевищує 0,001 мм. Усталення сигналу на виході фільтру відбувається за 2-2,5 с.

Методика та результати моделювання

Моделювання виконувалось для умов холодної прокатки смуги товщиною $h = 1,47$ мм з підкату товщиною $H = 1,89$ мм на реверсивному стані 800 ПАТ «Запоріжсталь». Технологічні параметри та параметри обладнання кліті визначались за даними роботи [6]: діаметр опорних валків – 800 мм; діаметр робочих валків – 400 мм; ексцентриситети опорних валків – 0,04 мм та 0,05 мм; ексцентриситети робочих валків – 0,02 мм та 0,03 мм; жорсткість кліті – 2,4 МН/мм; швидкість прокатки – 5 м/с; частота обертання опорних валків – 12,5 с⁻¹; частота обертання робочих валків – 25 с⁻¹; зусилля прокатки – 2,5 МН; жорсткість смуги – 5,95 МН/мм.

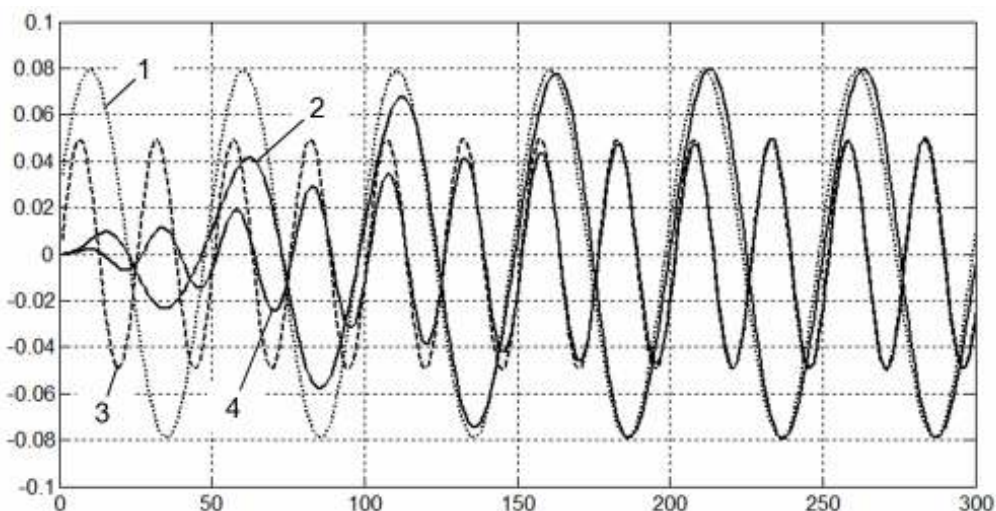


Рисунок 5 – До вибору фільтрів

Моделювання здійснювали у два етапи. На першому етапі досліджували прокатку без втручання АСКЕ.

На рис. 6 наведені осцилограми змінення міжвалкового зазору через ексцентриситет опорних та робочих валків (крива S_0 рис. 6,а) та товщини прокату (крива h на рис. 6,а) за відсутності компенсації ексцентриситету. Як випливає з цих осцилограм коливання зазору носять характер биття у діапазоні $\pm 0,124$ мм, а спричинена ними різнотовщинність Δh становить $\pm 0,06$ мм, що свідчить про наявність ефекту згладжування прокатної кліті.

На другому етапі дослідження здійснювали моделювання процесу в умовах функціонування АСКЕ. Результати моделювання наведені на рис. 6,б.

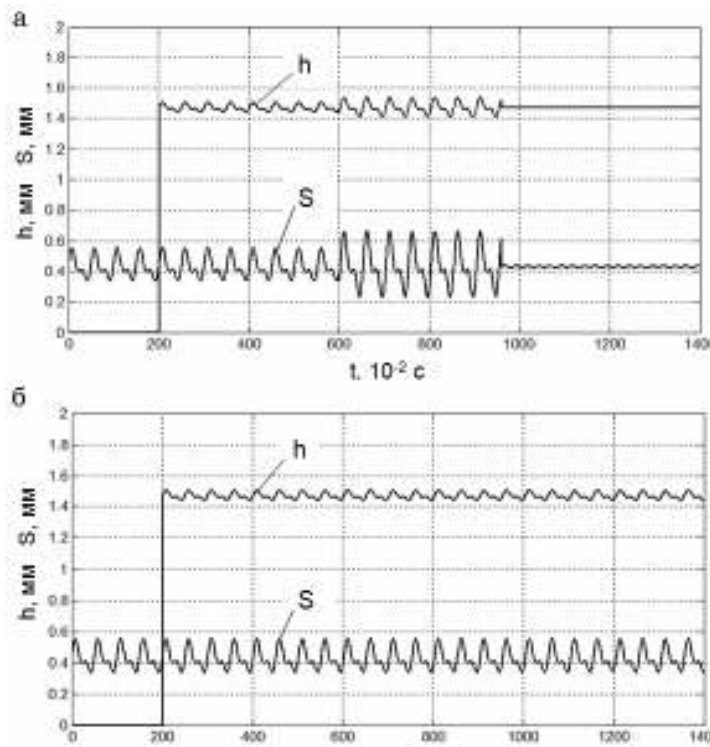


Рисунок 6 – Результати моделювання процесу за відсутності АСКЕ (а) та в умовах її роботи (б)

Процес прокатки починається на другій секунді моделювання, після чого впродовж 4-х секунд прокатка відбувається без впливу АСКЕ. При цьому товщина смуги змінюється через ексцентриситет у тих самих межах, що й під час попереднього моделювання: від $h = 1,469$ мм до $h = 1,472$ мм. Різнотовщинність становить $\Delta h = 0,003$ мм.

На шостій секунді моделювання АСКЕ розпочинає коригування міжвалкового зазору з визначеною амплітудою до довільною фазою. На цьому етапі моделювання фаза примусових коливань зазору майже співпадає з фазою ексцентриситету, що призводить до збільшення різновтовщинності до $\Delta h = 0,125$ мм.

На 9,6 секунді моделювання система коригує фазу примусових коливань, після чого різновтовщинність зменшується до значення $\Delta h = 0,003$ мм. Таким чином, використання створеної системи дозволяє зменшити різновтовщинність прокату, спричинену ексцентриситетом опорних і робочих валків майже у 20 разів з 0,06 мм до 0,003 мм. Така точність дозволяє говорити про майже повну компенсацію системою впливу ексцентриситету.

Висновки. Створена комп'ютерна модель АСКЕ дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання процесу прокатки з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності роботи системи. Результати моделювання свідчать про здатність АСКЕ одночасно компенсувати вплив ексцентриситету опорних та робочих валків на товщину прокату.

ЛІТЕРАТУРА

1. Фомин Г.Г. Механизация и автоматизация станов горячей прокатки / Г.Г. Фомин, А.В.Дубейковский, П.С.Гринчук. – М.: Металлургия, 1979 – 232 с.
2. Филатов А.С. Автоматические системы стабилизации толщины поло-сы/ А.С. Филатов, А.П. Зайцев, А.А. Смирнов. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.
3. Борисов А.А. Моделирование эксцентриситета валков прокатной клетки и оценка способов его уменьшения САУ. [Електронний ресурс] // Наукові праці ДонНТУ. – 2011. – Вип. 20 (182). С. 6–11. – Режим доступу до журн.: <http://ea.donntu.edu.ua/bitstream>.
4. Потап О.Е. Компенсация эксцентриситета валков при холодной прокатке листа/ О.Е. Потап, А.П. Егоров, В.Г. Кисляков // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т.5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: “Системні технології”. – 2002. – С. 269 – 272.
5. Заявка на патент України. Спосіб компенсації впливу ексцентриситету прокатних валків на товщину смуги / О. Ю. Потап, С. В. Бейцун, М. Д. Зінченко та ін., МПК В21В 37/66. Заявка № а201703611 від 13.04.2017.
6. Меерович И.М. Повышение точности листового проката/ И.М. Меерович, А.И. Герцев, В.С. Горелик. – М.: Металлургия, 1969. – 264 с.

V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.V. Ivaschenko, V.V. Busygin
**IMPROVING THE EFFICIENCY OF MULTIPROCESSOR SYSTEM
THROUGH IN-LINE INTERFACE NETWORK AGGREGATION**

This paper outlines ways to increase the efficiency of a multiprocessor system by changing the architecture of its network interface. It is established that the undoubted advantage of channels aggregation mode is a significant increase of data interchange between computing nodes of a multiprocessor system and a significant decrease in deceleration rate. The analytical ratios for the computations deceleration coefficient are derived. There was executed the stage of computations deceleration factor simulation and the regularity of its change depending on the applied computing platforms executed. It is shown that due to the mode of network interface channels aggregation, the multiprocessor system operation reliability increases. The current operating mode of the multiprocessor system network interface provides greater possibilities for implementation of data interchange procedure between the computing nodes, significantly improving the characteristics of its efficiency, performance and reliability of its operation.

Keywords: network interface, multiprocessor system, aggregation of channels, deceleration of computation, computing platform.transfer.

Introduction

Nowadays, there are many different options for building cluster computing systems. This paper considers so-called "blade" server solutions of multiprocessor systems [1,2]. However, one of the main differences in their design is in the network technology used, which selection is determined, first of all, by a class of problems that are solved by such systems.

For instance, in the metallurgy problems in mathematical simulation of long-length products thermal treatment, one of the main problems can be formulated as follows: there is a difference mesh of dimension M ; the problem computation time in a single-processor system is determined by the t value. This parameter is not determinative. Here it is essential to increase the grid size, moreover, make it greater than the one that can be processed in a single processor memory. This procedure

is crucial for a more detailed computation of the corresponding processes, or for obtaining some new effects of the researched processes. In this regard, the issue of efficiency, performance and productivity focuses on the design of cluster systems. Thus, there considered the research problem of the network interface usage specifics in multiprocessor computing systems in solving tasks related to the computational area expansion. Thus, today, the theme of constructing clustered multiprocessor systems is relevant, interesting and experiencing the stage of its rapid development.

It is also clear that by high-performance clusters there was discovered an effective way of solving a wide range of topical problems. In our opinion, the new qualitative stage of multiprocessor cluster systems development is in the new modern network technologies. In this case, the efficiency of parallelizing computations depends on many factors, with the defining one that is the network interface organization selection. That is explained in such way. The cluster computing system network is fundamentally different from the workstations network, although for cluster construction requires ordinary network cards and hubs / switches that are used to organize the workstations network. However, in the case of a clustered computing system, there is one fundamental feature. The cluster network, if first of all, is not intended for computers communication, but for computational processes connection. In this respect, the higher the cluster network bandwidth, the faster the user-defined parallel problems on the cluster are solved. Thus, the computing network technical characteristics are of primary importance for multiprocessor cluster systems.

Until today, the problem of selecting and analyzing network technologies for modular multiprocessor cluster systems has not been properly developed. In addition, there are practically no papers devoted to the research of the network technologies impact on the parallelization efficiency in modular multiprocessor cluster systems. In this regard, the researches considered in this paper are relevant and of an interest kind to the relevant specialists.

Statement of the research problem, the research purpose and problems

The network interface operation modes analysis of a multiprocessor system allowed to reveal such a problem: how, due to the design fea-

tures of computer networks architecture in multiprocessor systems, can one achieve an increase in its efficiency and performance?

This problem can be solved by the fact that data interchange between computing nodes of a multiprocessor system can be referred to a separate network that works on the channel (second) level using channel bonding technology. This allows you to increase the speed of data exchange between the nodes of the system and reduce the download of the channel that connects them [3]. This network interface architecture implements high-speed node access memory. Generally, we note that the use of the reconfigurable network can improve the efficiency of the multiprocessor system, adapting the structure of its means to solve each specific type of task. Hence, the network architecture of a multiprocessor system should ensure, firstly, an increase in the speed of computing when solving tight tasks, and secondly, high-speed access to the memory of the nodes, reducing the download of the channel that connects them. In order to increase the bandwidth of the network system, it is recommended to apply the aggregation procedure or channel bonding technology. Such technology allows to combine several network adapters into one high-speed channel.

The purpose of the research is to provide the network interface channels aggregation mode in such a way that several computing networks that operate symmetrically, on the basis of the corresponding switching matrices, get configured in the data interchange network of the multiprocessor computer system.

At the same time it is necessary to solve the following problems:

1. Identify the basic rules regarding the problem computation time, depending on the change in the computing area of a multiprocessor system, based on the aggregation mode application of network interface channels.

2. Run the simulation stage of the basic time characteristics of the solved problem by applying a multiprocessor computing system, based on of the network interface channels aggregation. Identify the main regularities of the problem solution time depending on the computing area expansion.

3. Perform research aimed at determining the deceleration factor associated with the implementation of the network interface aggregation mode.

4. Run the simulation phase of deceleration computation and reveal conformity of its change, depending on the network interface channels number.

Presentation of the main research material

It is known [3] that multi-channel operation modes of a multiprocessor system computer network allow not only to improve the efficiency of parallelization, but also significantly reduce the computation time, as well as significantly accelerate them. Such results can be achieved by reducing the time boundary interchange between the computing nodes of the cluster system. At the first stage of the research, the main analytical relationships were drawn to determine the performance evaluation of a multiprocessor system.

So, let's consider the issue of determining the deceleration factor (K) associated with the computing area increase in the multiprocessor system, distributed over its nodes, compared with the version of the computer with an unlimited computing area. It is obvious that such a deceleration value is determined by the ratio of the form:

$$K = \frac{T_c^N}{T_c^1} \quad (1)$$

Here, T_c^N is the computation time of a single iteration with the use of N computing nodes, seconds, and T_c^1 is count time of a single iteration for a single-processor computing system. The ratio (1) shows that such a coefficient is determined taking into account the increase of the computing area, distributed over the nodes of the multiprocessor system. Then, when using a multiprocessor system, the total computation time of a single iteration is determined on the basis of the following ratio:

$$T_{it} = T_c^N + T_{ex}. \quad (2)$$

Under these conditions, T_{ex} is the boundary time of the data interchange between the cluster nodes, seconds. It should be noted that if the time of iteration computation only depends on the processor power, the time of the boundary data interchange is determined by grid size, number of cluster system nodes and the computer network bandwidth. Consequently, the value can be defined as follows:

$$T_{ex} = \frac{m \cdot N \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}}{k \cdot d \cdot V_p} . \quad (3)$$

The value of m can be equal to one for unilateral mode of boundary data interchange or to two for two-way, V_p is the network interface port throughput (Gbit/s), N is the multiprocessor system nodes number, S is the total volume of the multiprocessor system computing area, k is the communication channels number of the computer networks working simultaneously (number of computing networks), d - half-duplex ($d = 1$) or duplex ($d = 2$) mode of the cluster system's computing network.

Taking into account the relation (2), we obtain:

$$K = \frac{T_c^N + T_{ex}}{T_c^1(S)} . \quad (4)$$

Taking into account the relation (3.4), the deceleration factor (K) value can be presented in an analytic-friendly form:

$$K = \frac{1}{N} \left(1 + \frac{T_{ex}}{T_c^N} \right) . \quad (5)$$

For analyzing convenience of obtained results, the relation (5) is represented as:

$$K = \frac{1}{N} (1 + K_1) . \quad (6)$$

In the relation (6), K_1 is defined as:

$$K_1 = \frac{T_{ex}}{T_c^N} . \quad (7)$$

Such a coefficient can be interpreted as the calculations factor of the active deceleration. This is due to the fact that this value mainly affects the computation deceleration coefficient as a whole. Finally, based on the relations (5 - 7) there can be determined the multiprocessor system nodes number (N_{id}), which corresponds to the minimum computation deceleration. So, we have:

$$N_{id} = \sqrt[3]{\left(\frac{k \cdot d \cdot V_p \cdot \sqrt{\pi \cdot R}}{m \cdot V_c} \right)^2} . \quad (8)$$

In the relation (8) R represents the available node RAM of the multiprocessor system R (Gbits). In accordance with the above relations, computing experiments were carried out for a computer platform with

an Intel E8400 3 GHz processor. Here, as the initial ones, there were corresponding characteristics of the class of problems solved by a cluster system. These parameters are given in table 1

Table 1

Data for computing the system characteristics with an *Intel E8400 3 GHz* processor computer platform

V_p	10(8) Gbps
T_C^1	100 s
V_c	14 . 10 ⁹ bit/s
R	24 Gbit
m	2
d	2
k	2

At the first stage, there was performed the simulation procedure of the time dependence of a single iteration calculation on the size of multiprocessor system computing area. The simulation results are presented as graphic dependencies (Fig. 1).

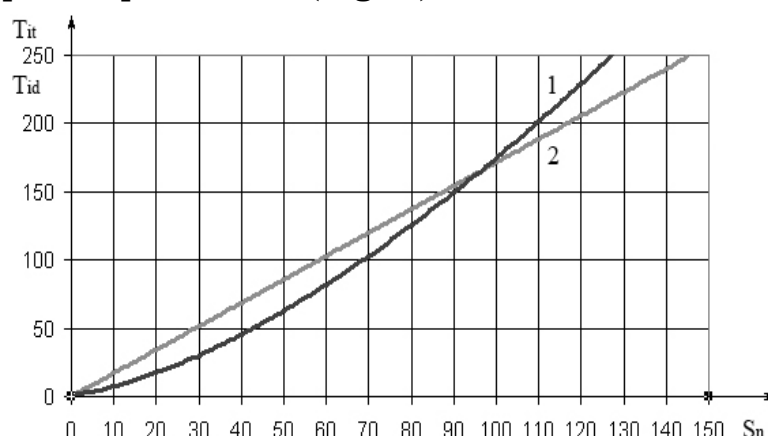


Figure 1 - The curves of the time dependence of a single iteration computation on the size of the multiprocessor system computing area for the of the network interface channels aggregation mode

It is quite obvious that the network aggregation mode allows the network equilibrium point to be substantially moved towards an increase in the computation area S_n . This becomes possible by increasing the speed of data interchange between the system nodes and reducing the channels download that connect them [4-6]. It is obvious that this network interface mode is implemented when $S_n < S_{id}$, and under such conditions the multiprocessor system computing time becomes less than the

time computed by ideal computer. This is due to the increase in processors number of the multiprocessor system.

At the second stage of the research, a procedure was performed to simulate the computations deceleration rate, depending on the nodes number of the multiprocessor system when the aggregation process of the network interface channel was implemented. The simulation results are presented as graphical dependencies (Fig. 2).

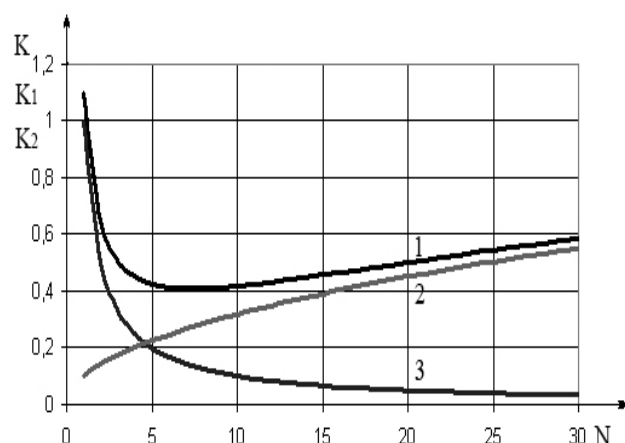


Figure 2 – The curves of the deceleration rate dependence on the multiprocessor system nodes number for the aggregation mode of the network interface channels

Figure 2 shows the general trend of decreasing the deceleration rate. Against the background of noted features, significant reduction in the time limit data interchange and the deceleration rate value. By means of the defined, we get that in this case $N_{id} = 5$, while the smallest computations deceleration value corresponds to $K = 0.4$.

The simulation specifics of the computations deceleration rate, depending on the number of network interface channels, are summarized in Table 2

Table 2

The simulation specifics of the computations deceleration rate, depending on the number of network interface channels

<i>Number of network interface channels, k</i>	<i>Optimal number of nodes in a multiprocessor system, N</i>	<i>The computation deceleration ratio, K</i>
<i>1</i>	<i>3</i>	<i>0.65</i>
<i>2</i>	<i>5</i>	<i>0.4</i>
<i>4</i>	<i>8</i>	<i>0.22</i>

The given data testify to the perspective of the research chosen direction. The proposed approach provides a uniform load distribution between the corresponding nodes in the multiprocessor system, and also helps to increase the data interchange speed between its nodes. Obviously, the higher the network bandwidth, the faster the parallel problems will be solved and the lower the deceleration rate will be.

Conclusions

1. This paper outlines ways to improve the multiprocessor system's efficiency by changing the network interface architecture. It is established that the undoubted advantage of the channels aggregation mode is in a significant increase in data interchange between computing nodes of a multiprocessor system, and a significant decrease in deceleration rate.

2. The main feature of the proposed network interface operation mode is that the reliability of the operation of the multiprocessor system increases. So, in the event of adapter failure, the traffic is sent to the next valid adapter without interrupting the computing process. If the adapter starts working again, the data transfer through it restores again.

3. The basic regularities regarding the problem computation time are revealed, depending on the calculations area change of the multiprocessor system in the network interface channels aggregation mode. It is shown that this approach allows to increase the system network interface bandwidth and significantly reduce the deceleration rate.

4. The current operating mode of the multiprocessor system network interface provides greater possibilities for implementation procedure for data interchange between computing nodes, significantly improving the characteristics of efficiency, performance and reliability of its operation.

REFERENCES

1. Ivaschenko V.P., Latest technologies based on use of high-efficient multiprocessing computer systems. / V.P. Ivaschenko, N.I. Alishov N.I., G.G. Shvachych // Journal of Qafqaz University. Mathematics and Computer Science. Baku, Azerbaijan. – 2013. – Vol. 1, Numb. 1. – P. 44–51.
2. Shvachych G.G. Osobennosti primeneniya selevogo interfeysa INFINIBAND v mnogoprotsessornykh sistemakh s raspredelennoy oblast'yu vychisleniy / G.G. Shvachych, Ye.G. Kholod, M.A. Tkach // Sistemi obrobki informatsii. – Vipusk 3(140), Kharkiv. – 2016. – S. 175-181.
3. Shvachych G.G. Mnogokanal'nyy rezhim setevogo interfeysa klasternykh vyichislitel'nykh sistem / G.G. Shvachych // Vos'ma Vseukraïns'ka naukova konferentsiya «Znachennya suchasnoï nauki dlya dinamichnogo rozvitku Ukraïni». – Ternopil', 2011. – S. 16 – 19.
4. Sovremennyye kommunikatsionnyye tekhnologii v modul'nikh mnogoprotsessornykh sistemakh: opyt ispol'zovaniya, issledovaniye otsenok effektivnosti, perspektivy primeneniya: monografiya / V.P. Ivaschenko, Ye.A. Bashkov, G.G. Shvachych, M.A. Tkach; M-vo nauki i obrazovaniya Ukrainy, Nats. met. akad. Ukrainy. – D.: NMetAU, 2012. – 140 s.
5. Issledovaniye vliyaniya setevogo interfeysa na effektivnost' modul'noy mnogoprotsessornoy sistemy / Ye.A. Bashkov, V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // Naukoviy pratsy Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu (Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika). – Vip. 14 (188). – Donets'k, 2011. – S. 89–99.
6. Perspektivy primeneniya sovremennykh kommunikatsionnykh tekhnologiy i issledovaniye ikh vliyaniya na effektivnost' mnogoprotsessornykh klasternykh sistem / Ye.A. Bashkov, V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // Naukoviy pratsy Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu (Informatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika). – Vip. 14 (188). – Donets'k, 2011. – S. 100–111.

В.А. Болтенков, В.И. Куваева, П.П. Червоненко

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СОЦИАЛЬНОГО ВЫБОРА
В ЗАДАЧАХ АГРЕГИРОВАНИЯ
ОЦЕНОК В РАНГОВЫХ ШКАЛАХ**

Аннотация. Исследованы возможности применения методов социального выбора для агрегирования коллективных оценок в ранговых шкалах. Рассмотрены и систематизированы 12 протоколов голосования: Борда, Кондорсе, Симпсона, Доджсона, Коупленда, Фишберна, Блэка, Шульце, Нансона, Кумбса, Болдуина, Хэара. Перечисленные правила голосования применены для построения консенсусной ранговой оценки при коллективной экспертизе для выбора программируемого логического контроллера для автоматизации работы воздухоразделительных установок. Показана перспективность применения методов голосования для построения коллективных оценок в ранговых шкалах.

Ключевые слова: социальный выбор, протоколы голосования, ранговая шкала, коллективное принятие решений.

Вступление и постановка задачи

Теория социального выбора – область научных исследований, связанных с разработкой и анализом методов коллективного принятия решений. Вопросы социального выбора стимулировали научную мысль на протяжении веков [1]. В первую очередь это было связано с исследованием методов «справедливого» голосования. Классическими работами в этой области считаются труды Ж.Ш. Борда и маркиза Кондорсе [2,3]. Вычислительный социальный выбор (COMputer SOcial Choise – COMSOC) является молодой междисциплинарной областью знаний, которая образовалась только в начале 2000-х годов на стыке теории социального выбора и компьютерных наук [4,5]. Одно из его направлений связано с импортом понятий и методов из компьютерных наук для решения вопросов, связанных с вычислительной сложностью теории социального выбора. Сюда, в частности, относятся задачи исследования протоколов голосования, их реализации в Интернете, манипулируемости результатов коллективного выбора. Другое

направление связано с применением «классических» методов голосования в современных системах принятия решений, задачах метапоиска, работе с BigData. К этому направлению относится и тема настоящего исследования. Она связана с применением методов голосования в задачах агрегирования индивидуальных предпочтений, выраженных в ранговых шкалах. Применение методов голосования в задачах консенсусного агрегирования предпочтений, выраженных в ранговых шкалах, в частности при коллективных экспертизах, является перспективным, но исследовано недостаточно полно. Этой проблеме посвящено данное исследование.

Формулировка целей исследования

Цели исследования – систематизация и анализ методов голосования как социального выбора и применимости их в задаче консенсусного агрегирования ранговых предпочтений, в частности, в задачах коллективного экспертного оценивания.

Основная часть

Анализ протоколов голосования. Многочисленные правила (или протоколы голосования) изложены в литературе [6-10]. Однако их рассмотрение и классификация недостаточно формализованы. Сформулируем задачу голосования следующим образом. Имеется множество из m альтернатив $\{A_1, \dots, A_m\}$, которые предъявляются t агентам, которые в теории социального выбора называются участниками голосования. Каждый из участников голосования должен сформировать профиль индивидуальных предпочтений, располагая альтернативы по степени предпочтения. При этом каждая альтернатива должна получить ранговую оценку $r_i, i = 1, \dots, m$. В результате применения одного из протоколов голосования необходимо построить агрегированное консенсусное ранжирование альтернатив, т.е. такое ранжирование, которое наилучшим образом отражает индивидуальные предпочтения всех участников голосования. Агрегированное консенсусное ранжирование должно выявить наилучшую альтернативу A^* и упорядочить остальные альтернативы по степени их коллективной предпочтительности.

Анализ протоколов голосования согласно [6,7] позволил установить, что все они могут быть разделены на три класса:

- протоколы, основанные на подсчете баллов,
- протоколы, основанные на парных сравнениях альтернатив,

– рекуррентные протоколы или протоколы с последовательным удалением альтернатив.

Протоколы, основанные на подсчете баллов.

Протокол Борда. (Здесь и далее при необходимости нумеруем цифрами шаги протокола). 1) Каждый участник ранжирует все альтернативы A_1, \dots, A_m по предпочтительности. 2) В каждом s -м индивидуальном строге упорядочении первая альтернатива получает $m-1$ баллов, вторая альтернатива – $m-2$ баллов, последняя альтернатива – 0 баллов. Очевидно, что в s -м упорядочении балл Борда $b^{<s>}(A_i)$ каждой альтернативы A_i равен числу $\sum_{i \neq j} r^{<s>}(A_i, A_j)$ альтернатив A_j , уступающих альтернативе A_i .

Здесь величина $r^{<s>}(A_i, A_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } A_i \succ A_j \\ 0, & \text{если } A_i \prec A_j \end{cases}$. 3) Для каждой

альтернативы A_i вычисляется значение функции Борда

$f_{\text{БОРДА}}(A_i) = \sum_{s=1}^t b^{<s>}(A_i)$, равное сумме баллов Борда $b^{<s>}(A_i)$, присвоенных

альтернативе A_i во всех индивидуальных упорядочениях. 4) Упорядочение альтернатив строится по убыванию значения функции Борда $f_{\text{БОРДА}}(A_i)$. Лучшая альтернатива A^* определяется максимальным значением функции Борда $A^* \in \arg \max_{1 \leq i \leq m} f_{\text{БОРДА}}(A_i)$.

Поскольку балл Борда $b^{<s>}(A_i)$ связан с рангом $r_i^{<s>}$ альтернативы A_i соотношением $b^{<s>}(A_i) + r_i^{<s>} = m$, убывающая последовательность баллов Борда $m-1 > m-2 > \dots > 0$ эквивалентна возрастающей последовательности рангов альтернатив $r_1 < r_2 < \dots < m$.

Протоколы, основанные на парных сравнениях альтернатив.

Протокол Кондорсе основан на парных сравнениях альтернатив. 1) Каждый участник ранжирует все альтернативы A_1, \dots, A_m по предпочтительности. 2) Подсчитывается количество индивидуальных строгих упорядочений одного и того же вида. 3) Для каждой альтернативы A_i подсчитывается общее число $g(A_i, A_j)$ участников, предпочитающих данную альтернативу A_i всем остальным альтернативам A_j при парных сравнениях во всех полученных упорядочениях. 4) Лучшая альтернатива при парном сравнении вариантов определяется по правилу простого большинства голосов.

Протокол Симпсона. Шаги 1-3 совпадают с шагами процедуры Кондорсе. 4) Для каждой альтернативы A_i определяется значение функции Симпсона $f_{SIMPSON}(A_i) = \min_{1 \leq j \leq m} g(A_i, A_j)$, равное минимальному числу участников, предпочитающих данную альтернативу A_i всем остальным альтернативам A_j ($i \neq j$) при всех парных сравнениях. Упорядочение альтернатив строится по убыванию значения функции Симпсона $f_{SIMPSON}(A_i)$. Лучшая альтернатива определяется максимальным значением функции $f_{SIMPSON}(A_i)$ или правилом максимина:

$$A^* \in \arg \max_{1 \leq i \leq m} f_{SIMPSON}(A_i) = \arg \max_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq m} g(A_i, A_j).$$

Протокол Доджсона. Шаги 1–3 совпадают с шагами 1 – 3 процедуры Кондорсе. 4) Строится вспомогательная матрица $H = (h_{ij})_{m \times m}$ где $h_{ij} = g(A_i, A_j) / g(A_j, A_i)$ – групповая матрица парных сравнений альтернатив по числу поданных голосов. Для каждой альтернативы A_i по строке матрицы H находятся альтернативы A_j для которых $h_{ij} < 1$. Это будут те альтернативы, в сравнении с которыми альтернатива A_i получила меньше половины общего числа голосов. Обозначим совокупность таких альтернатив через $A_{1/2}$. Для каждой альтернативы A_i вычисляется значение функции Доджсона $f_{DODGSON} = \sum_{j \in A_{1/2}} [g_{1/2} - g(A_i, A_j)]$, где $g_{1/2} = t / 2$, если число t избирателей четно, и $g_{1/2} = (t + 1) / 2$ при нечетном t . Упорядочение альтернатив строится по возрастанию значения функции Доджсона $f_{DODGSON}(A_i)$. Лучшая альтернатива A^* определяется минимальным значением функции Доджсона $A^* \in \arg \max_{1 \leq i \leq m} f_{DODGSON}(A_i)$.

Протокол Коупленда. Каждый участник сравнивает все альтернативы A_1, \dots, A_m попарно друг с другом независимо от сравнений других пар вариантов. Для каждой альтернативы A_i подсчитывается число $n(A_i, A_j)$ альтернатив A_j , уступающих альтернативе A_i , и число $n(A_j, A_i)$ альтернатив A_j , превосходящих альтернативу A_i по простому большинству голосов. Для каждой альтернативы вычисляется

значение функции Коупленда $f_{COPELAND}(A_i) = n(A_i, A_j) - n(A_j, A_i)$, равное разности числа «побед» альтернативы A_i над A_j и числа «поражений» A_i от A_j по простому большинству голосов. Упорядочение альтернатив строится по убыванию значения функции Коупленда $f_{COPELAND}(A_i)$. Лучшая альтернатива A^* определяется максимальным значением функции Коупленда $A^* \in \arg \max_{1 \leq i \leq m} f_{COPELAND}(A_i)$.

Протокол Фишберна. Шаг1 совпадает с шагом 1 процедуры Коупленда. 2) Для каждой альтернативы A_i вычисляется значение функции Фишберна $f_{FISHBERN}(A_i) = n(A_i, A_j)$, равное числу альтернатив A_j , которые уступают альтернативе A_i по простому большинству голосов. Упорядочение альтернатив строится по убыванию значения функции Фишберна $f_{FISHBERN}(A_i)$. Лучшая альтернатива A^* определяется максимальным значением функции Фишберна.

Протокол Блэка описывается следующим образом: если существует победитель по Кондорсе, то это победитель по Блэку, иначе в качестве победителя по Блэку выбирается победитель по Борда.

Протокол Шульце – самый «молодой» протокол голосования, предложенный М. Шульце в 1997 г. [11,12]. Этот протокол позволяет определить альтернативу победителя, когда избиратели при голосовании упорядочивают кандидатуры по предпочтению. Основная идея метода Шульце – концепция не прямых побед: если альтернатива A_1 предпочтительнее альтернативы A_2 , а та в свою очередь предпочтительнее A_3 и т.д. до A_n , говорят, что есть путь от альтернативы A_1 до альтернативы A_n и имеет место косвенная победа A_1 над A_n . Силой такого пути (непрямой победы) будет слабейшая прямая победа одного кандидата над другим на данном пути. Силой прочнейшего пути (по терминологии автора – англ. *beatpath* – «разъезженный» путь) от альтернативы A_i до альтернативы A_j будет максимальное значение из сил всех возможных путей от A_i до A_j , т.е. всех сил не прямых побед. Если пути из A_i в A_j нет, то сила прочнейшего пути считается равной 0. Если сила прочнейшего пути из A_i до A_j

больше силы прочнейшего пути из A_j до A_i , считают что A_i побеждает A_j . Победитель по Шульце – альтернатива, побеждающая любую другую альтернативу. Отметим [12], что задача нахождения прочнейшего пути возникает и в других областях. В компьютерных сетях это то же самое, что нахождение пропускной способности между двумя компьютерами в сети, когда соединение между двумя любыми машинами или маршрутизаторами в сети имеет ограниченную пропускную способность. Задачу иногда называют задачей о широчайшем пути, так как «сила пути» здесь является синонимом ширины, и задачей о максимальной пропускной способности пути, потому что она упрощает нахождение максимальной пропускной способности пути на графе. Задача поиска прочнейшего пути обычно решается по алгоритму Флойда — Уоршелла.

Протоколы с последовательным исключением альтернатив.

Протокол Нансона. Шаги 1–3 совпадают с шагами 1 –3 процедуры Борда. 4) Определяется альтернатива A_1^- , соответствующая минимальному значению функции Борда, $A_1^- = \arg \min_{1 \leq i \leq m} f_{BORDA}(A_i)$. Эта альтернатива A_1^- исключается из множества альтернатив. Повторяются шаги 1–4, и на суженном множестве альтернатив $A \setminus \{A_1^-\}$ находится следующая альтернатива A_2^- , имеющая минимальное число голосов, которая исключается из рассмотрения. Шаги 1 – 4 повторяются, пока не останется одна или несколько альтернатив, которые дальше нельзя исключить. Оставшиеся наиболее предпочтительные альтернативы составляют множество A^* , определяемое функцией Нансона:

$$f_{NANSON}(A^*) = \lim_{k \rightarrow \infty} A_k = A_{k-1} \setminus \{A_k^-\}.$$

Протокол Кумбса аналогичен протоколу Нансона, но в нем последовательно исключаются из рассмотрения альтернативы, которые считаются худшими по большинству голосов.

Протокол Болдуина. На каждом этапе отбрасывается из рассмотрения альтернатива, имеющая наименьшую сумму рангов в упорядочениях избирателей.

Протокол Хэара: каждый участник указывает альтернативу, которой он выставляет наивысший рейтинг среди m альтернатив.

Удаляется из списка альтернатив та, которая получила наивысший рейтинг у наименьшего количества избирателей. Процедура повторяется для оставшихся $(m-1)$ альтернатив. Процесс продолжается до тех пор, пока не останется одна альтернатива A^* . Она объявляется победителем.

Для применения протоколов голосования в системах агрегирования ранговых оценок реального времени важным параметром является вычислительная сложность алгоритма. Анализ показывает, что все протоколы, за исключением алгоритма Доджсона, для которого доказана его NP сложность, являются процедурами полиномиальной сложности, которая оценивается как $O(m^2)$ для остальных протоколов и $O(m^3)$ для протокола Шульце.

Применение методов голосования для коллективной экспертизы.

Перед приобретением крупной партии программируемых логических контроллеров (ПЛК) для промышленной автоматизации серии воздухоразделительных установок (ВРУ) были выбраны пять альтернативных вариантов ПЛК:

- Siemens SIMATIC S7-300/200 (альтернатива а);
- Moeller XC-100/200 (альтернатива b);
- Advantech ADAM-5000/ APAX-500 (альтернатива c);
- Schneider Modicon M340/Modicon Quantum (альтернатива d);
- ICPDAS XPAC-8000/ LinPAC-8000/ WinPAC-8000 (альтернатива e).

Для коллективной консенсусной оценки лучшего варианта была сформирована группа из девяти экспертов – ведущих специалистов предприятия ПКФ «Криопром» (г. Одесса) и ведущих преподавателей Института компьютерных систем Одесского национального политехнического университета. Экспертам было предложено составить профили индивидуальных предпочтений альтернатив, принимая во внимание специфику автоматизации ВРУ, а также такие характеристики ПЛК как цена, быстродействие, диапазон средств для программирования ПЛК, определяющий универсальность его применения. В результате экспертного оценивания был получен профиль, приведенный в таблице 1. Полученная коллективная ранговая оценка обрабатывалась всеми выше перечисленными методами. Для протоколов с исключением альтернатив экспертам были предложены многоэтапные процедуры оценивания, соответствующие протоколам. Кроме того, в

качестве «истинного» консенсусного коллективного ранжирования была рассчитана медиана Кемени (МК) для данного профиля. МК на сегодняшний день считается наилучшей консенсусной оценкой при поиске коллективного ранжирования, поскольку она является аксиоматически обоснованной [4-6], в отличие от приведенных выше методов голосования, которые представляют собой эвристики. Однако расчет МК является NP-задачей, и уже для мощности множества альтернатив $m > 5$ задача требует больших затрат счетного времени. Поэтому для расчета МК предложен ряд методов, приводящих ее к задаче полиномиальной сложности, в частности, приведение к задаче целочисленного линейного программирования и решение методом ветвей и границ. Таким методом, реализованным в виде комплекса Matlab-функций [13], была рассчитана МК для профиля экспертизы.

Таблица 1

Профиль индивидуальных предпочтений экспертов

Эксперты	Индивидуальные предпочтения	Эксперты	Индивидуальные предпочтения	Эксперты	Индивидуальные предпочтения
Э1	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$	Э4	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$	Э7	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
Э2	$c \succ e \succ d \succ b \succ a$	Э5	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$	Э8	$b \succ e \succ d \succ c \succ a$
Э3	$c \succ e \succ b \succ d \succ a$	Э6	$e \succ d \succ c \succ a \succ b$	Э9	$d \succ b \succ e \succ c \succ a$

Для расчетов по перечисленным протоколам голосования производились как с помощью on-line калькуляторов, достаточно полно представленных в Интернете, так и с помощью оригинального программного обеспечения, составленного в системе компьютерной алгебры Scilab для отдельных протоколов голосования. В частности, был использован калькулятор [14], в котором нестандартным образом рассчитываются протоколы Борда, Болдуина и Нансона. Указанные процедуры также были промоделированы в Scilab.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 позволяет установить следующие факты. Однозначной консенсусной альтернативой-победителем является альтернатива е. Поэтому в результате коллективной экспертизы для закупки был рекомендован ПЛК ICPDAS XPAC-8000/ LinPAC-8000/ WinPAC-8000.

**Результаты расчета результатов коллективного экспертного
оценивания различными протоколами голосования**

Протокол голосования	Индивидуальные предпочтения	Протокол голосования	Индивидуальные предпочтения
1 Борда	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$	7 Блэк	$e \succ c \succ d \succ a \succ b$
2 Кондорсе	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$	8 Шульце	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$
3 Симпсон	$c \succ e \succ b \succ d \succ a$	9 Нансон	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$
4 Доджсон	$e \succ d \succ c \succ a \succ b$	10 Кумбс	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$
5 Коупленд	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$	11 Болдуин	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$
6 Фишберн	$e \succ d \succ c \succ a \succ b$	12 Хэар	$e \succ c \succ d \succ b \succ a$
Медиана Кемени: $e \succ c \succ d \succ b \succ a$			

Как показывают результаты моделирования практически все протоколы голосования приводят к одинаковым итоговым ранжированиям, совпадающим с ранжированием по МК. Исключение составляют отдельные протоколы (Доджсона, Фишберна, Блэка), которые дают отличные от остальных результаты в области «замыкающих» альтернатив, имеющих минимальную ранговую оценку. При указанном числе альтернатив и экспертов все протоколы голосования работают в реальном времени с временем счета на программно-аппаратной платформе – CPU: Intel Core i5 2450M 2.5 ГГц; RAM: 6 ГБ DDR3 1300 МГц; ОС: Win7 не более 45-90 мс.

Выводы

Проанализированы и систематизированы протоколы голосования как процедуры социального выбора для решения задач консенсусного агрегирования ранговых предпочтений. Моделирование 12-ти различных протоколов голосования для получения коллективной экспертной оценки показало, что все они дают близкие результаты консенсусной ранговой оценки. Моделирование проведено в процессе реальной экспертизы по выбору программируемого контроллера для автоматизации воздухоразделительных установок.

Одним из дальнейших направлений исследования является сравнительный анализ систем голосования при большом числе альтернатив и агентов, в частности в задачах сетевой экспертизы. Перспективность применения методов голосования для задач агрегирования ранговых оценок позволило сформулировать как задачу дальнейших исследований разработку системы поддержки принятия решений реального времени на основе теории социального выбора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Procaccia A.D. Computational Social Choice: The First Four Centuries/ A.D. Procaccia//The ACM Magazine for Students.–2011–Vol.18, No.2.– Pp.31-34
2. Borda, J. C. M’emoire sur les ‘elections au scrutin [Electronic resource] // Histoire de l’Acad’emie Royale des Sciences. – Paris, 1781. – Mode of access: http://gerardgreco.free.fr/IMG/pdf/MA_c_moire-Borda-1781.pdf
3. Condorcet, M. J. A. N. Essai sur L’Application de L’Analyse a la Probabilite des Decisions Rendues a la Pluralite des Voix [Electronic resource] // A Paris : de l’Imprimerie royale, 1785. – Mode of access: <http://www.e-rara.ch/zut/content/titleinfo/1175327/>
4. H. Aziz H. Computational social choice: The first ten years and beyond / H. Aziz H., F. Brandt, E. Elkind, and P. Skowron// In: B. Steffen and G. Woeginger(eds.) Computer Science Today, volume 10000 of Lecture Notes in Computer Science (LNCS). – Springer-Verlag, 2017. – Pp.1-19.
5. Endriss U. (ed.) Trends in Computational Social Choice. – ILLC, University of Amsterdam, 2017 – 402 p.
6. Петровский А. Б. Теория принятия решений. / А. Б. Петровский. – М.: Академия, 2009. – 400 с.
7. Cha S.-H. Taxonomy and Nomenclature of Preferential Voting Methods / S.-H. Cha, Y. J. An // In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. Vol.I. WCECS 2012 – San Francisco, 2012.-Pp.173-178.
8. Smith D.W. Descriptions of Single-winner Voting Systems.
9. Heckelman J.C. Handbook of Social Choice and Voting / J.C. Heckelman, N. R. Miller. – Edward Elgar Publishing, 2016. – 420 p.
10. Brandt F. Handbook of Computational Social Choice/F. Brandt ,V.Conitzer, U. Endriss, A.D. Procaccia.– N.-Y.:Cambridge University Press,2016.–535 p.
11. Shulze M. A New Monotonic, Clone-Independent, Reversal Symmetric, and Condorcet-Consistent Single-Winner Election Method/ M. Shulze// Social-Choice and Welfare.– 2011. – Vol. 26. – Pp. 267–303.
12. Луридас П.. Алгоритмы для начинающих. Теория и практика для разработчика / П. Луридас.– М.: Эксмо, 2018. – 608 с.
13. Compute the median ranking according to the Kemeny axiomatic approach [Electronic resource]: – Mode of access: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52235-compute-the-median-ranking-according-to-the-kemeny-axiomatic-approach?focused=3889946&tab=function&requestedDomain=true>
14. R. LeGrand.Descriptions of ranked-ballot voting methods [Electronic resource] Mode of access <http://www.cs.wustl.edu/~legrand/rbvote/desc.html>

О.В. Золотухин, Т.В. Коваленко

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ВЫБОРУ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ
СЕГМЕНТАЦИИ ТЕКСТУРНЫХ ОБЛАСТЕЙ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

Аннотация. В статье рассматриваются модели описания и обработки цифровых текстурных изображений. Проведен обзор современного состояния технологии автоматизированной обработки изображений в системах воздушного мониторинга. Рассмотрены два основных подхода к выбору признаков сегментации изображений: статистический и метод на основе дискретного ортогонального преобразования. Проведенный анализ позволяет обоснованно осуществлять выбор признаков для сегментации изображений в зависимости от свойств исходного изображения в целях оперативной обработки визуальных данных в системах аэрокосмического мониторинга.

Введение. Дистанционное зондирование Земли обеспечивает уникальные возможности оперативного сбора данных в глобальном масштабе с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением, что и определяет большие информационные возможности этих систем и потенциальную экономическую эффективность [1]. Обработка изображений земной поверхности позволяет эффективно решать научные и прикладные задачи в области картографии, исследования природной среды, океанологии, поиска и освоения полезных ископаемых, сельского и лесного хозяйства и многих других областях [2]. Автоматический анализ изображений наблюдения широко применяется в системах дистанционного зондирования при анализе местности, в лесном хозяйстве, например, для автоматического подсчета площади вырубок, для наблюдения за созреванием урожая, при разведке, в системах противопожарной безопасности, проведении воздушного мониторинга окружающей среды.

Использование изображений аэрокосмического мониторинга в различных сферах деятельности человека ставит задачи не только по

созданию средств и способов их получения, но и разработке и применению новых методов и алгоритмов для компьютерной обработки изображений, приведения их к виду, удобному для анализа. Одной из задач, обеспечивающих извлечение из изображений воздушного мониторинга полезной информации, является задача сегментации или выделения однородных областей природных объектов. Текстура (от лат. *texture* – ткань, строение) – участок поверхности, состоящий из элементарных участков, характеризующихся определенными признаками и связанных друг с другом некоторой связью, параметры которой постоянны и определяют характер данной текстуры [3, 4].

Одной из наиболее сложных и актуальных проблем компьютерной обработки изображений является решение задачи сегментации таких текстурных областей изображения, как природные объекты, в частности областей растительности, которые, как правило, занимают значительную часть аэрофотоснимка (рис. 1).



Рисунок 1 - Изображения воздушного мониторинга, содержащие природные объекты

Текстурные области природных объектов относятся к классу нерегулярных текстур (рис. 2 и 3).

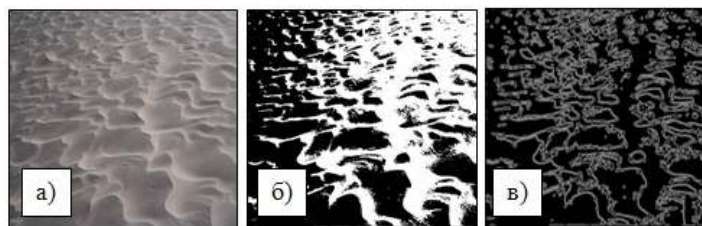


Рисунок 2 - Изображение песчаной поверхности: а) – изображение песчаной поверхности; б) – бинаризированное изображение песчаной поверхности; в) – текстура изображения песчаной поверхности

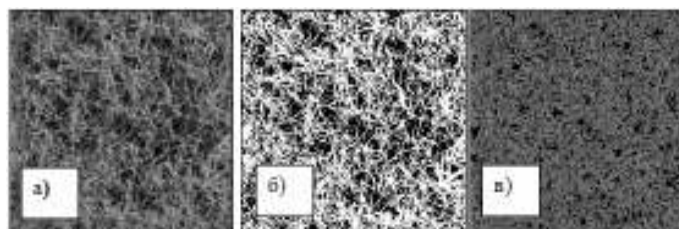


Рисунок 3 - Изображение травяной поверхности: а) – изображение травяной поверхности; б) – бинаризированное изображение травяной поверхности; в) – текстура изображения травяной поверхности

Анализ современного состояния автоматизированной обработки изображений в системах воздушного мониторинга

К основным задачам анализа текстурных областей относятся: выбор и формирование признаков, описывающих текстурные различия; выделение и сегментация текстурных областей; классификация текстурных областей; идентификация объекта по текстуре. Для выделения текстурных областей решается задача сегментации текстуры, которая состоит в разбиении изображения на области с постоянной текстурой, т.е. выделение областей, в пределах которых значения тех или иных текстурных признаков относительно постоянны [4]. Сегментация текстуры – это задача, которая состоит в разбиении изображения на участки с постоянной текстурой. Сегментация является наиболее критической процедурой процесса автоматизации анализа изображений, поскольку ее результаты влияют в дальнейшем на все последующие действия, связанные с анализом изображения: представление выделенных объектов и их текстовое описание, измерение признаков, а также другие задачи более высокого уровня.

В настоящее время существует большой опыт автоматизированной обработки и анализа цифровых изображений. Часть автоматизированных методов реализована и успешно применяется в процессе интерактивного дешифрирования аэрокосмической информации. Ав-

томатизация обработки текстурных изображений является сложным методическим и трудоемким вычислительным процессом, что препятствует разработке универсального метода их распознавания.

В теорию и практику обработки и распознавания текстурных изображений значительный вклад внесли Haralick, Gonzalez, Rosenfeld, Shapiro, Hawkins, Zhang J. и др. Тем не менее, в настоящее время не создано теоретических основ и алгоритмических решений в области обработки текстурных изображений, которые бы удовлетворяли требованиям практики. Иными словами, под любой вид текстурного изображения можно подобрать метод распознавания, который, при качественной настройке будет выдавать практически стопроцентный результат, тогда как на другом виде текстурного изображения этот метод работать не будет [5]. Применяемые в настоящее время технологии обработки аэрофотоснимков не обеспечивают получения результатов извлечения полезной информации с заданными требованиями точности и достоверности, сопряжены с дополнительными расходами, отличаются низкой производительностью, и кроме того не соответствует современному уровню информационных технологий. В первую очередь это связано со сложностью разработки универсальных алгоритмов автоматического анализа аэрофотоснимков [6]. Таким образом, несмотря на повсеместное присутствие в изображениях и важность текстуры, формального подхода к описанию текстуры и строгого ее определения пока не существует, и методы различения текстур, как правило, разрабатываются отдельно для каждого конкретного случая [5-8]. Из проведенного выше анализа можно сделать вывод: задача автоматизированного выделения областей растительности, близких по значениям цвета и структуре, на аэрофотоизображениях является важной частью в решении задачи автоматической интерпретации данных, получаемых из систем аэрокосмического мониторинга Земли.

Обзор существующих методов анализа текстурных областей изображений

Наиболее распространены методы сегментации, основанные на определении однородных яркостей (цветов) или однородностей типа текстур. Методы текстурной сегментации разрабатываются на основе двух основных подходов: анализ областей и анализ границ. В зависимости от используемых признаков текстурных областей изображений

методы сегментации на основе анализа областей делят на статистические, структурные, фрактальные, спектральные и комбинированные методы (рис.4).

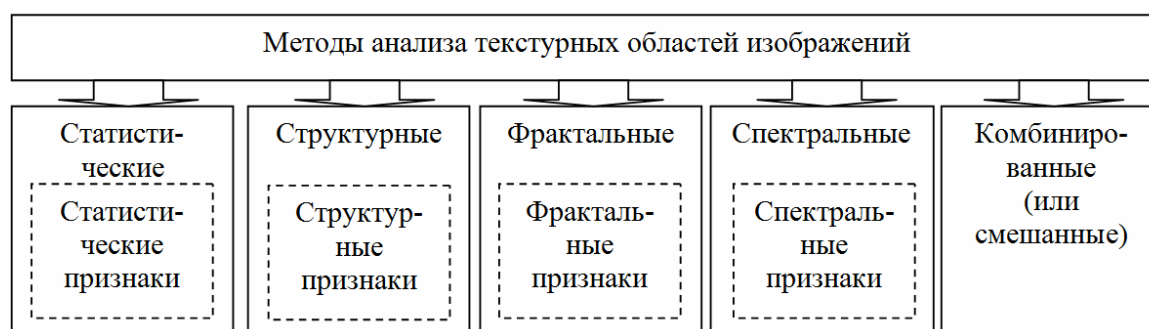


Рисунок 4 - Методы анализа текстурных областей изображений

Статистический текстурный анализ основан на вычислении матриц смежности, которые учитывают как уровни яркости отсчётов, так и относительное расположение отсчетов с определенной яркостью на изображении. Отсчеты двумерной матрицы смежности для изображения показывают оценку вероятности совместного появления на изображении на расстояния друг от друга, задаваемом определенным вектором смещения отсчетов, с соответствующими значениями уровней яркости. Аналогично, отсчеты трехмерной матрицы показывают оценку вероятности совместного появления на изображении на заданном расстоянии друг от друга тройки отсчётов с соответствующими значениями уровней яркости.

С использованием матриц смежности вычисляются текстурные признаки, такие как угловой момент, корреляция, контраст, инерция, энтропия, затенение, и др. Матрица смежности обеспечивает инвариантность признаков к повороту, сдвигу и масштабированию. Признаки, вычисленные на основе двумерной матрицы – 2D признаки, их трёхмерные аналоги – 3D признаки. Таким образом, для каждого изображения можно вычислить вектор признаков – статистическую сигнатуру текстуры. Недостатками методов сегментации по статистическим признакам являются:

- высокая детальность сегментации, что приводит к необходимости использования алгоритмов уменьшения детальности; задача снижения детальности сегментации состоит в снижении числа исходных сегментов путем их слияния. В результате на сегментированном изображении должно остаться небольшое число крупных сегментов, разделенных хорошо заметными границами;

- высокая вычислительная сложность;

- большое разнообразие статистических признаков текстур вызывает необходимость предварительного исследования наиболее информативных признаков в зависимости от типа текстур.

Структурные методы анализа текстурных областей изображений. Структурные методы анализа текстурных областей изображений основаны на том, что текстура состоит из регулярно или почти регулярно повторяющейся совокупности хорошо разделяемых примитивов (микротекстуры), которые расположены согласно некоторому правилу размещения и иерархически объединяются в пространственные упорядоченные структуры (макротекстуры).

Для описания текстуры структурными методами необходимо определить примитивы и правила их объединения [8]. Возможно применение двух основных подходов к анализу текстуры. При первом подходе вычисляют статистические признаки извлеченных элементов текстуры и используют их как элементарные текстурные признаки. При втором подходе необходимо выделить принцип расположения примитивов, который описывает текстуру. Последний подход может включать в себя геометрический или синтаксические методы анализа текстуры, например анализ диаграмм полигонов Вороного. Метод анализа обычно зависит от геометрических свойств текстурных элементов. Достоинство данных методов состоит в том, что структурные методы хорошо подходят для анализа регулярных текстур, состоящих из простых регулярных примитивов. Недостатком структурных методов является то, что они применимы только для регулярных искусственных образов.

При фрактальном подходе объект представляют фракталом. Большинство естественных поверхностей (облака, земная поверхность) являются пространственно-изотропными фракталами, и двумерные поля интенсивностей от таких поверхностей также являются фракталами. Фрактальные методы анализа текстурных областей изображений основаны на том, что текстура представляет собой фрактал – структуру, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Таким образом, при определении фрактала используется свойство самоподобия фрактала. Многие кривые и поверхности статистически самоподобны, то есть каждая часть может считаться изображением целого в уменьшенном виде [9]. Основной особенностью

фрактальных характеристик является то, что изображения искусственных и природных объектов имеют сильно различающиеся фрактальные размерности.

Требования к алгоритмам обработки изображений для оперативной обработки визуальных данных в системах воздушного мониторинга

Под сегментацией текстурных областей изображения понимается процесс пространственного разбиения изображения на области, однородные относительно некоторого набора характеристик или признаков. Процессу сегментации предшествует процесс формирования пространства признаков, основанный на исследовании текстур и, в свою очередь, опирающийся на описание текстур. Под текстурными признаками, как правило, понимают характерные признаки, общие для текстур одного класса.

Основной вопрос при выборе признаков заключается в том, чтобы определить какие и сколько признаков необходимо выделить для надежной сегментации текстурных областей с близкими значениями цвета и текстуры на изображении. Известно, что чрезмерное увеличение исходной системы признаков не приносит положительного эффекта из-за того, что степень представительности выборки одного и того же объема обратно пропорциональна размерности пространства признаков. Наиболее важные требования к признакам, используемым для решения задачи сегментации областей изображений, могут быть сформулированы следующим образом.

Признак должен быть информативным, т.е. содержать информацию, существенную для данного изображения в контексте решаемой задачи, и способствовать точной сегментации объектов.

Признак должен допускать обработку алгоритмом сегментации изображений, т.е. иметь формат, приемлемый для выбранного алгоритма сегментации.

Признак должен входить в минимальный набор признаков (или модель изображения), отражающий специфику сегментируемого объекта в контексте задачи.

Временная сложность вычисления признака не должна превышать выгоды от его использования для решения данной проблемы.

Таким образом, решение задачи построения минимального множества наиболее информативных признаков является одним из главных факторов при разработке алгоритмов и информационной

технологии сегментации текстурных областей изображений. Тектурные признаки можно разделить на четыре основных класса: признаки, основанные на статистических характеристиках текстурных изображений; признаки, основанные на измерении спектральных свойствах; модельные признаки, основанные на случайных марковских фрактальных полях; геометрические признаки, основанные на структурных характеристиках.

Исследование статистических признаков для сегментации текстурных областей с близкими значениями цвета и структуре

Статистические свойства текстурных фрагментов изображений, визуально близких по своим свойствам, проанализированы в [9]. Группа статистических признаков базируется на использовании инструментов статистики для описания характеристик структуры текстурной области. При вычислении статистических признаков предполагается, что исследуемое изображение является реализацией некоторого поля случайных чисел. Статистический анализ текстур основан на статистических свойствах гистограмм яркости. Класс таких признаков строится по статистическим моментам.

Выражение для нахождения n -го момента для нахождения относительного статистического среднего имеет вид (1):

$$\mu_n = \sum_{i=0}^{L-1} (Z_i - m)^n p(Z_i), \quad (1)$$

где Z_i – это случайная величина, обозначающая яркость, $p(Z_i)$ – гистограмма распределения уровней яркости в данной области, L – обозначает число различных значений яркости, а m задается выражением (2):

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} Z_i p(Z_i) \quad (2)$$

и является средней яркостью области.

При подготовке материалов статьи были проанализированы гистограммы 40 изображений земной поверхности четырех классов (травы, грунта, снега и песка). На рисунке 5 представлены примеры изображений и анализируемых гистограмм. Как видно из рисунка, изображения являются достаточно однородными, что позволяет сделать вывод о том, что свойство однородности можно использовать в качестве признака для отделения текстуры травы от фона. Наличие характерных пиков на

гистограммах изображений говорит о том, что изображения отличаются наличием контуров различного направления.

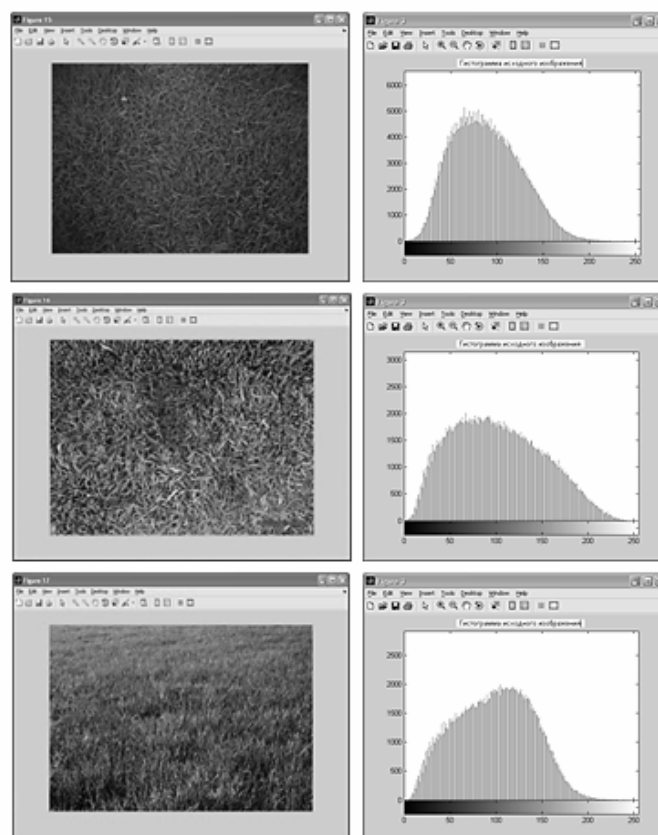


Рисунок 5 - Гистограммы распределения яркостей текстурных изображений одного класса (травы), близких по значениям цвета и структуре

В связи с этим, для первичной сегментации текстурных фрагментов проанализированы статистические признаки текстур, а именно энтропия (3), однородность (4) и средняя яркость. Энтропия является статистической характеристикой случайного процесса. Энтропия выражает неравномерность распределения яркостных свойств элементов изображения. В качестве текстурного признака энтропия как мера случайности имеет вид (3):

$$e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(Z_i) \log_2 p(Z_i) \quad (3)$$

Однородность представляет собой меру равномерности. Эта величина максимальна для постоянной яркости (максимальная однородность) (4):

$$U = \sum_{i=0}^{L-1} p^2(Z_i) \quad (4)$$

При расчетах были использованы изображения одинаковых размеров с глубиной цвета 8 бит на пиксель (полутонные изображения с 256 градациями яркости). В таблице представлены результаты расчетов статистических свойств текстурных фрагментов изображений (100×100 пикселей), визуально близких по характеристикам яркости и структуре, для пяти изображений.

Таблица 1

Статистические свойства текстурных фрагментов изображений, визуально близких по характеристикам яркости и структуры

№	Фрагмент 1	Фрагмент 2	Энтропия		Разн.	Яркость		Разн.	Однородность		Разн.
			Ф.1	Ф.2		Ф.1	Ф.2		Ф.1	Ф.2	
1.			5,06	5,17	0,11	0,42	0,58	0,16	0,03	0,03	0,00
2.			6,53	7,06	0,53	0,24	0,46	0,22	0,01	0,00	0,01
3.			6,17	5,54	0,63	0,51	0,45	0,06	0,01	0,22	0,21
4.			6,14	6,14	0,00	0,40	0,25	0,15	0,01	0,01	0,00
5.			5,04	5,60	0,56	0,46	0,40	0,06	0,03	0,02	0,01

Анализ таблицы 1 показывает, что чем больше визуально отличаются текстурные фрагменты, тем разница между значениями их свойств больше. Так, например, если фрагмент 1 и фрагмент 2 изображения 1 находятся в одном цветовом диапазоне, то значения их энтропии отличаются на 0,11, в отличие от фрагментов изображения 2, цвет которых заметно различается, и значения энтропии отличаются на 0,56. Аналогичная ситуация наблюдается и в разнице между яркостью и однородностью фрагментов. Чем более отличаются фрагменты, тем более отличаются и их свойства. Очевидно, разница в значениях статистических признаков фрагментов текстуры, близких по цвету и структуре, не является существенно большой величиной (варьируется в диапазоне от 0,0005 до 0,6), которую можно было бы использовать для четкого различения границ текстурных областей.

Анализ текстурных областей**на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП)**

В последние годы значительно возрос интерес к изучению ортогональных преобразований [10]. Теоретические исследования ортогональных преобразований проводятся в области обработки изображений и речевых сигналов, отбора признаков при распознавании образов. В связи с этим, в статье для анализа текстурных областей на аэрофотоснимках исследованы методы дискретного косинусного преобразования (ДКП).

Известно, что дискретное косинусное преобразование представляет собой разновидность преобразования Фурье и представляет изображение в виде суммы синусоид с различной амплитудой и частотой. Графическое изображение рассматривается как совокупность пространственных волн, причем оси X и Y совпадают с шириной и высотой изображения, а по оси Z откладывается значение цвета соответствующего пикселя изображения. Дискретное косинусное преобразование позволяет переходить от пространственного представления изображения к его спектральному представлению и обратно.

Двумерное дискретное косинусное преобразование переводит изображение из области пространственных переменных (из представления набором отсчетов или пикселей) в спектральную область (представление набором частотных составляющих). Процедуру ДКП можно записать также в матричной форме (5):

$$DCT = TC * Img * TC^T, \quad (5)$$

где TC – матрица базисных (косинусных) коэффициентов преобразования.

Результаты расчетов контрольного примера (аналогичного данным таблицы 1), говорят о том, что разница между среднеквадратичным отклонением (СКО) матриц изображений до выполнения ДКП и после выполнения ДКП составляет значение, которое существенно превышает разницу между статистическими свойствами исследуемых фрагментов. На рисунке 6 фрагменты 1 (рис. 6б) и 2 (рис. 6в), 3 (рис. 6г) и 4 (рис. 6д) являются близкими по цвету и структуре. Как видно из рисунка, фрагменты 1 и 2, 3 и 4 между собой визуальными практически не отличаются. Однако разница СКО матриц изображений фрагментов после применения к ним ДКП составляет 7,98 и 6,30 соответственно.

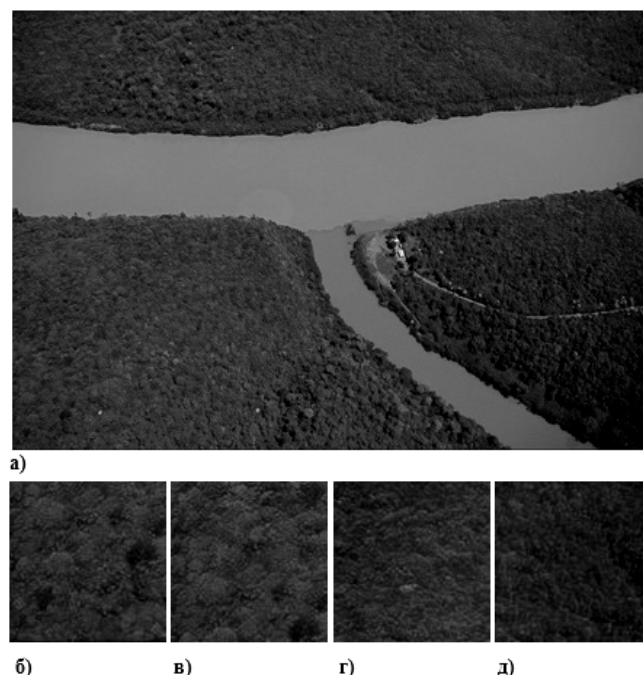


Рисунок 6 - Изображение, содержащее текстурные фрагменты, близкие по цвету и структуре: а) – исходное изображение; б) – текстурный фрагмент 1; в) – текстурный фрагмент 2; г) – текстурный фрагмент 3; д) – текстурный фрагмент 4

Проведенные эксперименты показали, что с увеличением процента смещения фрагментов увеличивается разница СКО матриц текстурных фрагментов, что еще раз подтвердило целесообразность применения предложенного признака для сегментации текстурных областей изображения, близких по цвету и структуре.

Выводы

Экспериментальные исследования процесса сегментации текстурных областей по статистическим признакам показали, что результатом сегментации являются только яркие области изображения с одинаковой энтропией, однородностью или яркостью, которые не обязательно принадлежат одной и той же текстуре. Исходя из этого, можно сделать вывод, что сегментация текстурных областей только по статистическим признакам не дает достоверных результатов и соответственно, не может быть окончательной. На основании изложенного выше можно сделать вывод: сегментация по статистическим признакам целесообразно использовать только на первом этапе метода – этапе первичной сегментации.

Применение ДКП к матрицам полутоновых изображений текстурных фрагментов, близких по значениям цвета и структуре, по-

звolyает получить разницу (порог сегментации), позволяющую применять ее для решения задачи сегментации текстурных областей с близкими значениями цвета и текстуры. Данный порог предложено использовать в качестве признака для сегментации текстурных областей изображения, близких по цвету и структуре. При настройке параметров сегментации для каждой конкретной задачи (сегментация текстур различных классов) необходимо более детально исследовать статистику распределения значений признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: [в 2-х томах]. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Т. 1. – 312с. – Т. 2 – 480с.
2. Абламейко С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение / С.В. Абламейко, Д.М. Лагуновский. – Минск: Ин-т технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
3. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
4. Gonzalez R.R. Woods Digital Image Processing. Second Edition / Gonzalez R.R. – Prentice Hall, 2002. – 793 p.
5. Коваленко, Т. В. Метод обработки цифровых текстурных изображений в информационных системах аэрокосмического мониторинга // Теоретичні і прикладні аспекти комп'ютерних наук та інформаційних технологій: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції TACSIT-2017, 12-13 травня 2017 р. / За ред. Скарги-Бандурової І.С. – Северодонецьк : Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2017. – С. 10-13.
6. Коваленко, Т.В. Модели и методы обработки цифровых текстурных изображений в системах аэрокосмического мониторинга // Наукові праці : Науково-методичний журнал. – Вип. 275. Т.287. Комп'ютерні технології. – Миколаїв : ЧДУ ім. П. Могили, 2016. – С. 132-137.
7. Протасов А.П. Непараметрический алгоритм распознавания объектов подстилающей поверхности земли по данным аэрокосмической съемки / А. П. Протасов, А. И. Рюкин // Вестник Томского государственного университета: Сибгеоинформатика, вып. 275, 2002. – с. 43 – 46.
8. Коваленко, Т.В. Метод оцінки якості сегментації цифрових зображень в системах аерокосмічного моніторингу // Проблеми інформаційних технологій № 01 (21) травень 2017. – Херсон : ХНТУ, 2017. – С. 29-34.
9. Howarth P., S. Ruger. Robust texture features for still image retrieval. In Proc. IEEE Vis. Image Signal Processing, vol. 152, No. 6, December 2006.
10. Деревянченко А.Г. Распознавание текстур зон износа режущих инструментов на основе анализа энергетических спектров Фурье их изображений / А.Г. Деревянченко, О.Ю. Бабилунга и др. // – Одесса: Астропринт, 1999. – с. 250- 257

К.Ю. Островська, Є.В. Островський, І.В. Кліопа
**РЕАЛІЗАЦІЯ REMOTE DICTIONARY SERVER
З ВИКОРИСТАННЯМ МОВИ PYTHON**

Анотація. В результаті роботи було програмно реалізовано Redis використовуючи мову Python. Завдяки високій швидкості і простоті Redis часто використовується для мобільних і інтернет-додатків, ігор, рекламних платформ та ін. В тих випадках, коли необхідна максимально можлива продуктивність.

Ключові слова: сховище, структура даних, Server, оперативна пам'ять, клас, команда, база даних, мова Python.

Redis (англ. Remote Dictionary Server) - швидке сховище в пам'яті з відкритим вихідним кодом для структур даних «ключ-значення». Redis поставляється з набором різноманітних структур даних в пам'яті, що спрощує створення різних спеціальних додатків.

Зберігає базу даних в оперативній пам'яті, забезпечена механізмами знімків і журналювання для забезпечення постійного зберігання на диску. Також надає операції для реалізації механізму обміну повідомленнями в паттерне publish - subscribe. З його допомогою додатка можуть створювати канали, підписуватися на них і поміщати в канали повідомлення, які будуть отримані всіма передплатниками (як IRC-чат). Підтримує реплікацію даних з основних вузлів на кілька підлеглих. Також Redis підтримує транзакції і пакетну обробку команд.

Redis працює на більшості POSIX систем, таких як Linux, *.BSD, Mac OS X без будь-яких доповнень. Linux і Mac OS X - дві операційні системи, в яких був розроблений і в більшій мірі протестований Redis, тому VMware рекомендує використовувати саме їх для розгортання. Офіційною підтримки для збірок Windows немає, але доступні деякі опції, що дозволяють забезпечити роботу Redis на цій ОС. Компанія Microsoft активно працює над перенесенням Redis на Windows.

Безліч мов програмування мають бібліотеки для роботи з Redis: C, C ++, C #, Clojure, Lisp, Erlang, Java, JavaScript, Haskell, Lua, Perl, PHP, Python, Ruby, Scala, Go, Tcl, Rust.

Всі дані Redis зберігає у вигляді словника, в якому ключі пов'язані зі своїми значеннями. Одне з ключових відмінностей Redis від інших сховищ даних полягає в тому, що значення цих ключів не обмежуються рядками. Підтримуються наступні абстрактні типи даних:

- Рядки (strings). Базовий тип даних Redis. Рядки в Redis бінарнобезпечні, можуть використовуватися так само як числа.

- Списки (lists). Класичні списки рядків, впорядковані в порядку вставки, яка можлива як з боку голови, так і з боку хвоста списку.

- Безлічі (sets). Безлічі рядків в математичному розумінні: не впорядковані, підтримують операції вставки, перевірки входження елемента, перетину і різниці множин.

- Хеш-таблиці (hashes). Класичні хеш-таблиці або асоціативні масиви.

Тип даних значення визначає, які операції (команди) доступні для нього. Redis підтримує такі високорівневі операції, як об'єднання і різницю наборів, а також їх сортування.

Redis корисний як сховище в якому можна зберігати дані з певним терміном дії. Час дії може бути зазначено в секундах або в форматі Unix timestamp (кількість секунд з 1.1.1970).

Redis підтримує атомарний інкремент строкових даних. При роботі інкремента доступ до даних блокується, таким чином здійснюється цілісність даних.

Redis також підтримує виконання транзакцій, які повинні дотримуватися двох принципів:

1. Команди повинні виконуватися по порядку. Поки не буде перервано іншими запитами протягом всього процесу.

2. Повинна бути забезпечена цілісність транзакції. Транзакції починаються з команди MULTI, а запускаються командою EXEC. Якщо з яких-небудь причин транзакція переривається, Redis заблокує її виконання до тих пір, поки не буде виконана команда redis-check-aof і скасовані всі зміни.

Redis працює з п'ятьма типами даних: Strings (рядки), Sets (безлічі), Sorted Sets (сортовані безлічі), Lists (списки), Hashes (хеш).

Відновлення даних проводиться двома різними способами. Перший - це механізм знімків, в якому дані асинхронно переносяться з оперативної пам'яті в файл формату *.RDB (розширення дампов Redis). Другий спосіб - файл, доступний тільки для дозапису, в якому зберігається лог всіх операцій, що змінювали дані в пам'яті.

Redis підтримує реплікацію типу master-slave. Дані з будь-якого сервера Redis можуть реплікуватись довільну кількість разів. Реплікація корисна для масштабування читання (але не записи) або при дуже великих обсягах даних. Всі дані, які потрапляють на один вузол Redis (який називається master) будуть потрапляти також на інші вузли (називаються slave). Для конфігурації slave-вузлів можна змінити опцію slaveof або аналогічну по написанню команду (вузли, запущені без подібних опцій є master-вузлами).

Реплікація допомагає захистити дані, копіюючи їх на інші сервера. Реплікація також може бути використана для збільшення продуктивності, так як запити на читання можуть обслуговуватися slave-вузлами. Ці вузли можуть відповісти злегка застарілими даними, але для більшості додатків це прийнятно.

Мета проекту полягала в тому, щоб написати простий сервер, який міг би працювати з чергою завдань. Сервер використовує Redis як механізм зберігання за замовчуванням для запису завдань в черзі, результатів виконання та інших речей.

Сервер, який ми будемо створювати, зможе відповідати на такі команди:

- *GET <key>*
- *SET <key> <value>*
- *DELETE <key>*
- *FLUSH*
- *MGET <key1> ... <keyn>*
- *MSET <key1> <value1> ... <keyn> <valuen>*

Також будемо підтримувати такі типи даних: рядки і виконавчі дані, числа, null, масиви, словники, повідомлення про помилки.

Щоб обробляти кілька клієнтів асинхронно, будемо використовувати *gevent*, але можливо використовувати модуль *SocketServer*

стандартної бібліотеки за допомогою ForkingMixin або ThreadingMixin.

Нам знадобиться сам сервер і функція зворотного виклику, яка буде виконуватися при підключенні нового клієнта. Крім того, знадобиться якась логіка для обробки запиту від клієнта і відправки йому відповіді.

```
class ProtocolHandler (object):
    def handle_request (self, socket_file):
        # Parse a request from the client into it's component parts.
        pass
    def write_response (self, socket_file, data):
        # Serialize the response data and send it to the client.
        pass
class Server (object):
    def __init__ (self, host = '127.0.0.1', port = 31337, max_clients = 64):
        self._pool = Pool (max_clients)
        self._server = StreamServer (
            (Host, port),
            self.connection_handler,
            spawn = self._pool)
        self._protocol = ProtocolHandler ()
        self._kv = {}...
```

Поділивши завдання так, щоб обробка протоколу знаходиться у власному класі з двома загальнодоступними методами: `handle_request` і `write_response`, а сервер використовує обробник протоколу для розпакування клієнтських запитів і повторення відповідей сервера на клієнтський сервер. Метод `get_response ()` буде використовуватися для виконання команди, ініційованої клієнтом.

Більш детально розглядаючи код методу `connection_handler ()`, бачимо, що ми отримуємо оболонку навколо об'єкта сокета, подібну файлу. Ця оболонка дозволяє абстрагуватися від деяких особливостей, з якими зазвичай стикаються при роботі з чистими сокетами. Функція входить в нескінченний цикл, зчитує запити від клієнта, відправляє відповіді і, нарешті, виходить з циклу, коли клієнт відключається (відзначається методом `read ()`, який повертає порожній рядок).

Використовуємо типізовані виключення для обробки випадків, коли клієнти відключаються, і для повідомлення користувачів про командах обробки помилок. Наприклад, якщо користувач відправляє

невірно складений запит на сервер, викидаємо `CommandError`, який серіалізуються у відповідь на помилку і відправляється клієнту.

Заповнимо клас обробника протоколу, щоб він реалізовував протокол `Redis`.

```
class ProtocolHandler (object):
    def __init__ (self):
        self.handlers = {
            '+': Self.handle_simple_string,
            '-': self.handle_error,
            '!': Self.handle_integer,
            '$': Self.handle_string,
            '*': Self.handle_array,
            '%': Self.handle_dict}
    def handle_request (self, socket_file):
        first_byte = socket_file.read (1)
        if not first_byte:
            raise Disconnect ()...
```

У частині серіалізації протоколу зробимо протилежне: перемістимо об'єкти Python в їх серіалізовані копії.

```
class ProtocolHandler (object):
    # ... above methods omitted ...
    def write_response (self, socket_file, data):
        buf = BytesIO ()
        self._write (buf, data)
        buf.seek (0)
        socket_file.write (buf.getvalue ())
        socket_file.flush ()
    def _write (self, buf, data):
        if isinstance (data, str):
            data = data.encode ('utf-8')...
```

Додатковою перевагою обробки протоколу в своєму класі є те, що можливо повторно використовувати методи `handle_request` і `write_response` для створення клієнтської бібліотеки.

Клас `Server`, повинен мати метод `get_response ()`. Команди будуть вважатися поданими клієнтом як прості рядки або масив аргументів команди, тому параметр даних, переданий в `get_response ()`, буде або рядком байтів, або списком. Щоб спростити обробку, якщо дані виявляться простий рядком, перетворимо її в список шляхом поділу на прогалини.

Першим аргументом буде ім'я команди з будь-якими додатковими аргументами, які належать зазначеній команді. Як і при зіставленні першого байта з обробчиками в ProtocolHandler, давайте створимо зіставлення команд з функціями зворотного виклику в класі Server:

```
class Server (object):
    def __init__ (self, host = '127.0.0.1', port = 31337, max_clients = 64):
        self._pool = Pool (max_clients)
        self._server = StreamServer (
            (Host, port),
            self.connection_handler,
            spawn = self._pool)
        self._protocol = ProtocolHandler ()
        self._kv = {}
        self._commands = self.get_commands ()
    def get_commands (self):
        return {
            'GET': self.get,
            'SET': self.set,
            'DELETE': self.delete,
            'FLUSH': self.flush,
            'MGET': self.mget,
            'MSET': self.mset}...
```

Щоб взаємодіяти з сервером, необхідно повторно використовувати клас ProtocolHandler для реалізації простого клієнта. Клієнт буде підключатися до сервера і відправляти команди, закодовані у вигляді списків. Ми будемо повторно використовувати як write_response (), так і логіку handle_request () для запитів на кодування і обробку відповідей сервера відповідно.

```
class Client (object):
    def __init__ (self, host = '127.0.0.1', port = 31337):
        self._protocol = ProtocolHandler ()
        self._socket = socket.socket (socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
        self._socket.connect ((host, port))
        self._fh = self._socket.makefile ('rwb')
    def execute (self, * args):
        self._protocol.write_response (self._fh, args)
        resp = self._protocol.handle_request (self._fh)...
```

За допомогою методу execute () є можливість передати довільний список параметрів, які будуть закодовані як масив і

відправлені на сервер. Відповідь сервера аналізується і повертається як Python-об'єкт. Для зручності необхідно написати клієнтські методи для окремих команд:

```
class Client (object):
    # ...
    def get (self, key):
        return self.execute ( 'GET', key)
    def set (self, key, value):
        return self.execute ( 'SET', key, value)
    def delete (self, key):
        return self.execute ( 'DELETE', key)
    def flush (self):
        return self.execute ( 'FLUSH')
    def mget (self, * keys):
        return self.execute ( 'MGET', * keys)...
```

Щоб перевірити клієнт, необхідно сконфігурувати Python-скрипт для запуску сервера безпосередньо з командного рядка:

```
# Add this to bottom of module:
if __name__ == '__main__':
    from gevent import monkey; monkey.patch_all ()
    Server (). Run ()
```

Щоб перевірити сервер, просто запустіть серверний Python-модуль з командного рядка. В іншому терміналі відкрийте інтерпретатор Python і імпортуйте клас Client з модуля сервера. При створенні екземпляра клієнта буде відкритим з'єднання, і будемо мати можливість запускати команди!

Завдяки високій швидкості і простоті Redis часто використовується для мобільних і інтернет-додатків, ігор, рекламних платформ ін. В тих випадках, коли необхідна максимально можлива продуктивність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Redis [Електронный ресурс]: Официальный сайт/ Режим доступа: <http://redis.io/>
2. An interview with Salvatore Sanfilippo, creator of Redis, working out of Sicily, January 4, 2011, by Stefano Bernardi, EU-Startups
3. Хабрахабр [Електронный ресурс]: Redis 2.0 на Хабрахабре / Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/105022/>
4. ruseller.com [Електронный ресурс]: работа с Redis и PHP / Режим доступа: <http://ruseller.com/lessons.php?rub=37&id=2289>
5. beget.ru [Електронный ресурс]: Использование Redis / Режим доступа: <https://beget.ru/articles/redis>

В.П. Малайчук, С.В. Клименко, А.Т. Кудреватых
**ВИЗУАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
КОРРЕЛИРОВАННОСТИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧАХ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Аннотация. Проведен визуально-аналитический анализ измерений яркости с различными параметрами коррелированности и оценены возможности обнаружения изменений коррелированности на различных цифровых изображениях в терминах нечеткой логики.

Ключевые слова: цифровые изображения, корреляция, яркость, неразрушающий контроль.

Постановка задачи

Цифровые изображения поверхностей технических объектов содержат информацию об их состоянии и качестве. Наличие участков с изменениями статистических связей в матрицах измерений яркости тоже является признаком их аномального состояния или качества на таких участках поверхности контролируемых объектов. Это текстурные участки коррелированности. Корреляционные связи цифровых изображений описываются разностными уравнениями флуктуаций яркости строк и столбцов матриц измерений. Яркость стационарных цифровых изображений в точках с координатами (i, j) математически описывается матричными функциями $X(i, j)$. Это случайные величины с постоянным математическим ожиданием и дисперсией, которая характеризует флуктуации яркости $Y(i, j)$

$$X(i, j) = M[X(i, j)] + Y(i, j).$$

Измерения яркости $X(i, j)$ – это целочисленные случайные величины в интервале от 0 до q_m единиц яркости, где q_m – ожидаемое максимальное ее значение, зависящее от интервала дискретности ΔX аналого-цифрового измерителя (АЦП).

Строки и столбцы матрицы $X(i, j)$ размера $i = 1, 2, \dots, N_1$ и $j = 1, 2, \dots, N_2$ не только автокоррелированы, но и взаимнокоррелированы. Эти ста-

статистические связи описываются разностными уравнениями матриц флуктуаций $Y(i, j)$.

Измерения яркости цифровых изображений зависят от основных трех факторов. Первый – это мощность источников облучения или возбуждения (оптические, радиометрические, термометрические, интерферометрические, ультразвуковые, вибрационные), второй – состояние и качество поверхности контролируемого технического объекта, которые проявляются в изменениях параметров статистических закономерностей измерений яркости цифровых изображений. Третий – погрешности измерений, связанные с нестабильностью регистрирующей аппаратуры, эффектами квантования, дискретизации и сжатия изображения при сохранении. Исследуем эти закономерности путем проведения вычислительных экспериментов и визуально-аналитического анализа на математических моделях матриц измерений цифровых изображений.

Математическая модель эталонной матрицы цифровых изображений

Измерение яркости цифровых изображений – случайные величины с неизвестными статистическими закономерностями. Их теоретические математические модели должны описывать интенсивность яркости, ее разброс (рассеяние) и статистические связи. Начнем рассмотрение цифрового изображения, которое описывается стационарной матрицей яркости, измерения которых $X(i, j)$ независимые случайные величины, появляющиеся в точках измерений (i, j) с одной и той же вероятностью p в интервале от 0 до q_m , где q_m – ожидаемое максимальное значение их яркости. Тогда вероятность того, что каждое измерение $X(i, j)$ равно случайному значению яркости q и описывается биномиальным законом распределения вероятности

$$W(q) = C_{q_m}^q p^q (1 - p)^{q_m - q}, q = 0, 1, 2 \dots q_m. \quad (1)$$

Такие цифровые изображения зависят от одного параметра – вероятности p . Если $q_m = 255$, то ожидаемая яркость цифрового монотонного (стабильного) изображения равна математическому ожиданию $M[q] = 255p$ и ожидаемое рассеяние (корень квадратный из дисперсии) $\sqrt{D[q]} = \sqrt{255p(1 - p)}$.

На рис. 1 показаны цифровые изображения с различными значениями вероятности яркости $p = 0,25$; $p = 0,5$; $p = 0,75$; $p = 0,95$, на матрице размером $N_1 \times N_2$.

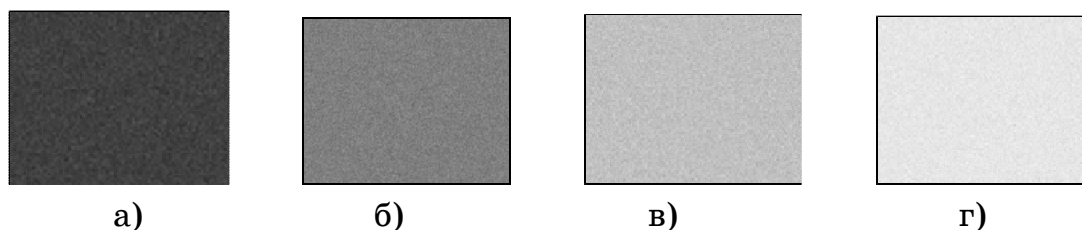


Рисунок 1 - Модель цифрового изображения с флуктуацией яркости с параметрами

При визуальном их рассмотрении и оценкой их в терминах нечеткой логики это – темные ($p = 0,25$), серые ($p = 0,5$), белые ($p = 0,75$) и очень белые ($p = 0,9$) изображения.

Цифровые гистограммы матриц измерений $X(i, j)$ формируются по эмпирическим функциям $F(q)$ и законам распределения вероятностей $W(q)$

$$F(q) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \text{sgn}[\Delta X q - X(i, j)], \quad (2)$$

$$W(q) = F(q) - F(q - 1) = \Gamma(q).$$

Гистограммы рассмотренных цифровых изображений представлены на рис.2. Значения их статистических параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1.

p	0,25	0,5	0,75	0,9
$M[q]$	64	128	192	230
$\sqrt{D[q]}$	7	8	7	5
Δy_m	42	48	42	46

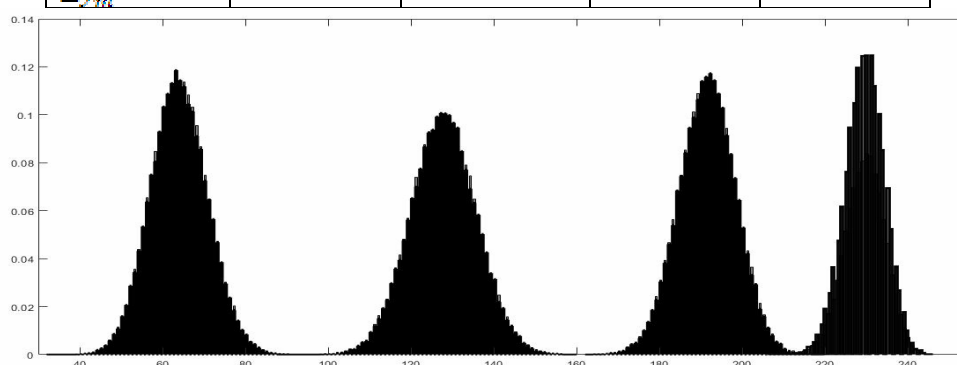


Рисунок 2 - Гистограммы измерений яркости цифровых изображений с параметрами $p=0,25$; $p=0,5$; $p=0,75$; $p=0,95$

При $0,05 \leq p \leq 0,95$ биномиальный закон распределения вероятностей можно аппроксимировать нормальным распределением

$$W(q) = \frac{\exp\left(-\frac{(q - np)^2}{2np(1-p)}\right)}{\sqrt{2\pi np(1-p)}}.$$

Максимальные значения разбросов $\Delta y_m = \Delta y_{\max} - \Delta y_{\min}$ определяются по гистограммам. И эталонных цифровых изображений можно рассматривать как независимые случайные величины, статистические закономерности которых описываются нормальным (гауссовым) законом распределения, параметры которого оцениваются средним значением и выборочной дисперсией

$$\bar{X} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} X(i, j), \quad \bar{D} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (X(i, j) - \bar{X})^2. \quad (3)$$

Флуктуации эталонной матрицы $Y(i, j) = X(i, j) - \bar{X}$ – тоже нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и выборочной дисперсией \bar{D} . Рассмотрим и сравним их с математическими моделями матриц коррелированных флуктуаций цифровых изображений.

Математические модели коррелированности флуктуаций

Рассмотрим выборки случайных величин флуктуаций яркости $y(i, j)$, которые формируются двумерным фильтром с передаточной функцией

$$H(z_1, z_2) = \frac{\beta}{(1 - \alpha_1 z_1^{-1})(1 - \alpha_2 z_2^{-1})} = \frac{y(z_1, z_2)}{\xi(z_1, z_2)}. \quad (4)$$

В этом случае z-преобразование разностного уравнения запишется в виде $y(z_1, z_2) = (\alpha_1 z_1^{-1} + \alpha_2 z_2^{-1} - \alpha_1 \alpha_2 z_1^{-1} z_2^{-1}) + y(z_1, z_2) + \beta \xi(z_1, z_2)$, где β – нормирующий параметр.

После обратного z-преобразования получим разностное уравнение Хабиби

$$y(i, j) - \alpha_1 y(i-1, j) + \alpha_2 y(i, j-1) - \alpha_1 \alpha_2 y(i-1, j-1) + \beta \xi(z_1, z_2), \quad (5)$$

где $\beta = \sqrt{(1 - \alpha_1^2)(1 - \alpha_2^2)}$.

Разностное уравнение коррелированности $y(i, j)$ равно

$$r(\tau_1, \tau_2) = \alpha_1 r(\tau_1 - 1) + \alpha_2 r(\tau_2 - 1) - \alpha_1 \alpha_2 r(\tau_1 - 1, \tau_2 - 1), \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 – целые числа равные $\pm 1, \pm 2, \dots$

Корреляционная функция флуктуаций описывается формулой

$$Q(\tau_1, \tau_2) = \alpha_1^{\tau_1} \alpha_2^{\tau_2}, \quad \tau_1 = 0, 1, 2, \dots; \quad \tau_2 = 0, 1, 2, \dots$$

Из рассмотрения которых следует, что коэффициенты модели Хабиби $\alpha_1 = r_1$ и $\alpha_2 = r_2$, где $r_1 = r(1)$ и $r_2(1)$ – коэффициенты корреляции

соседних измерений строк и столбцов матрицы яркости, которые описываются разностными уравнениями Маркова с коэффициентами автокорреляции $r_1 = \alpha_1$ и $r_2 = \alpha_2$ и взаимной корреляции $r_1 r_2$.

Из рассмотрения (6) следует, что строки и столбцы матрицы флуктуации – это марковские случайные взаимно коррелированные последовательности. На рис. 3 представлены для визуального рассмотрения цифровые изображения с различными значениями коэффициентов корреляции r_1 и r_2 и взаимной корреляцией, равной произведению $r_1 r_2$, математическим ожиданием $M[X(i, j)] = 128$ и дисперсией $D(i, j) = 64$.

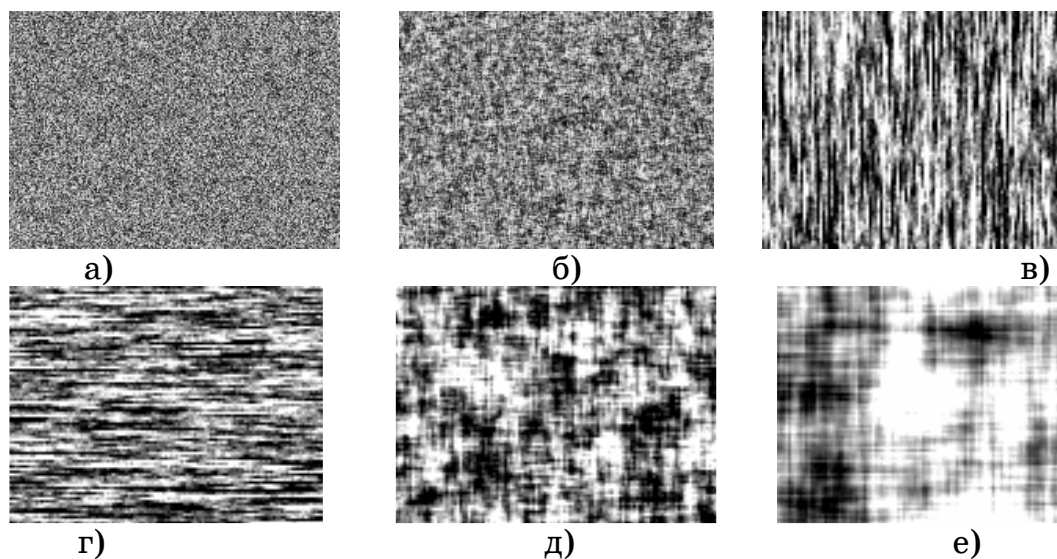


Рисунок 3 - Модель цифрового изображения по Хабиби с параметрами

а) $r_1 = 0,1$, $r_2 = 0,1$; б) $r_1 = 0,5$ $r_2 = 0,5$; в) $r_1 = 0,2$, $r_2 = 0,9$;

г) $r_1 = 0,9$, $r_2 = 0,2$; д) $r_1 = 0,8$, $r_2 = 0,8$; е) $r_1 = 0,98$, $r_2 = 0,98$

Выводы

Из рассмотренных цифровых изображений, отличающихся только показателями коррелированности строк и столбцов, следует отметить их визуальную информативность и возможность принимать решения в терминах нечеткой логики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фисенко Т.В. Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко / СПб. – 2008. – 192с.
2. Малайчук В.П. Исследование изображений недоступных для наблюдения поверхностей / В.П. Малайчук, С.В. Клименко, А.Т. Кудеватых // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 2 (109). – Днепропетровск, 2017. – С.81 -86.

А.О. Сенько, А.І. Купін

НЕЙРОМЕРЕЖЕВІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ РУДИ

Анотація Досліджено можливості використання різноманітного математичного апарату для створення моделей оперативного прогнозування. Створені моделі дозволяють отримати результати, адекватні задачам оперативного керування виробничим процесом. Нелінійні залежності продуктивності від параметрів вхідної сировини дають змогу прогнозувати зміну технологічних характеристик сировини в режимі реального часу.

Ключові слова: data mining, збагачення, нейронні мережі, Scada.

Серед технологічних процесів багатьох галузей гірничої промисловості особливе місце відводиться процесам подрібнення сипучих матеріалів. Підвищена увага до подрібнення матеріалів визвана високою енергоємністю і низькою ефективністю процесу. Існує велика кількість агрегатів для помолу, серед яких широкого розповсюдження набули кульові млини внаслідок простоти обслуговування та експлуатації. Однак, суттєвим недоліком використання кульових млинів є низький коефіцієнт корисної дії.

Технологічні процеси збагачення руд чорних металів (магнетитових кварцитів) є достатньо складними об'єктами прогнозування. Це обумовлено їх багатовимірністю та багатостадійністю, властивостями нелінійності та нестационарності, значним запізненням інформаційних показників у часі, наявністю нечіткої та неповної інформації [1,2].

Для дослідження процесів збагачення мінеральної сировини широко застосовуються математичні моделі, що описують фізичні процеси і явища, котрі призводять до поділу мінеральних компонентів в апаратах для розділу. Ці моделі представляють собою складні диференціальні рівняння в часткових похідних з граничними умовами (наприклад, крайові задачі для усередненого по Рейнольдсу

рівняння Нав'є-Стокса в аеродинаміці). Для таких рівнянь у більшості випадків невідомі ні теореми про існування та єдиність розв'язання, ні характер залежності рішення від параметрів та граничних умов. Програмні пакети, орієнтовані на побудову та аналіз таких моделей [4], реалізують різні числові методи вирішення відповідних рівнянь (наприклад методи обчислювальної аеродинаміки – Computational Fluid Dynamics, CFD)[5].

Процес подрібнення по енергоємності в три рази перевищує процес по транспортуванню пульпи і в десятки разів решту процесів, пов'язаних зі збагаченням руди, тобто є найбільш енергоємним. Оскільки кульові млини – найбільш енергоємні агрегати, оптимізація режиму їх роботи є важливим засобом економії і підвищення ефективності використання електроенергії. Тому актуальним є вирішення задачі вибору раціонального режиму роботи кульових млинів, тобто встановлення, за яких умов кульові млини працюють з максимальною продуктивністю.

Метою даної статті є визначення набору параметрів для прогнозування продуктивності роботи збагачувальної фабрики та подальшої розробки системи прийняття рішень на основі непрямого визначення міцності руди.

Від якісних та кількісних показників подрібнення на першій стадії заежать результати подальшої обробки продукту збагачення, перш за все, такі як продуктивність фабрики, здобування корисного компоненту, його вміст в концентраті, а також втрати в хвостах. Схема подрібнення на першій стадії являється замкнутим циклом шарового млина та спірального класифікатора.

На даний момент існує велика кількість систем автоматичного регулювання окремими параметрами технологічного процесу подрібнення шарового млина. До таких систем відносять системи регулювання вхідних параметрів (живлення млина рудою та водою) і системи, що регулюють умови подрібнення (частота обертання млина та довантаження куль у млин). Дані системи відрізняються різноманітністю в постановках, використаному математичному апараті, а також використаних засобах розробки та реалізації. Спроби їх прямого об'єднання для створення єдиної автоматизованої системи не дали успіхів [3].

Технологія оперативного прогнозування даних моніторингу виробничих процесів передбачає інтеграцію в діючі на промислових підприємствах SCADA-системи спеціалізованих засобів комп'ютерного моделювання з метою оперативного прогнозування технологічних показників виробничого процесу. Одним з головних завдань технології є визначення формальних зв'язків між компонентами простору входів процесу. Великий об'єм даних моніторинга параметрів виробничих процесів, наданий SCADA-системами, дає підставини вважати, що позитивні результати можна отримати застосувавши методи Data Mining, котрі дозволяють не лише виявити неявні взаємозв'язки в даних, але й суттєво зменшити розмірність задачі. Перспективним, також, може бути застосування в рамках розглянутої технології методів нечіткої логіки та нейронних мереж для побудови моделей експрес-аналіза і прогнозування параметрів виробничого процесу по даним поточного моніторинга. Це припущення підтверджується тим, що апарат нечіткої логіки вже включено в бібліотеки таких SCADA-систем: DELTAV, TRACE MODE, SIMATIC WINCC, LABVIEW DSC та ін. Здатність нейронних мереж до прогнозування впливає із їх здатності узагальнювати та виявляти приховані залежності між вхідними та вихідними даними.

Одне з рішень, яке враховує нечіткий характер моделей управління базується на мережі Петрі.

При нормальній роботі мережі Петрі системи першої стадії збагачення, інформація, що отримується з датчиків записується до бази даних за такими показниками: масова частка класу у промпродуктах класифікації, % (ДР - гранулометр для вимірювання масової частки класу у зливі класифікатора); продуктивність млина, т/год. (ДП - датчик ваги для вимірювання продуктивності млина); вміст твердого в розгрузці млина, г/літр (ДСР – щільномір для вимірювання вмісту твердого в розгрузці млина); вміст твердого в промпродукті зливу класифікатора, г/літр (ДQ – щільномір для вимірювання вмісту твердого в промпродукті зливу класифікатора); кількість поданої води в завантаження млина, м³/год. (ДВ(1) - датчик витрат води для завантаження млина); витрати води в завантаження класифікатора, м³/год. (ДВ(2) - датчик витрат води для завантаження класифікатора); чинник вмісту важкозбагачуваних руд, %.

В рамках дослідження найбільшу перспективу мають нейромережі зустрічного розповсюдження. Мережі цього типу мають менший час навчання ніж мережі зворотнього розповсюдження. Тому така мережа оперативно відреагує на зміну умов процесу збагачення, пов'язану із флуктаціями характеристик вхідної сировини. У нейромережі зустрічного розповсюдження об'єднані такі алгоритми: самоорганізуюча карта Кохонена та зірка Гроссберга. Їх об'єднання призводить до зростання узагальнюючих властивостей мережі.

Створена модель представлена стандартною трьохшаровою (0-2) нейромережею зустрічного розповсюдження. Нейрони шару 0 слугують точками розгалуження і не приймають участі в обчисленнях. Кожен нейрон шару 0 пов'язаний з кожним нейроном шару 1 (шар Кохонена). Аналогічно пов'язані нейрони шару 1 і 2.

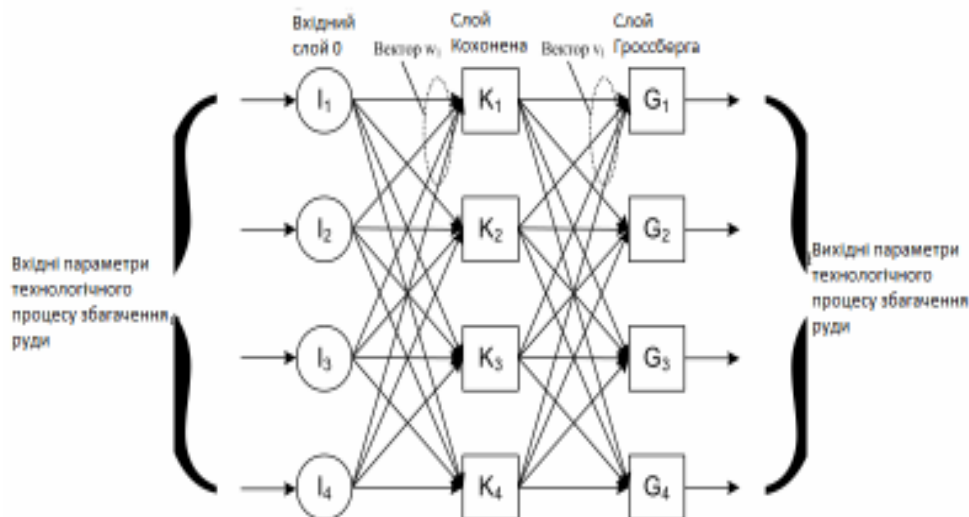


Рисунок 1 – Мережа із зустрічним розпізнаванням без зворотніх зв'язків

Вихід кожного нейрона шару являється сумою зважених входів. В результаті порівняльного оцінювання зважених сум входів нейронів Кохонена визначається «переможець» - нейрон, для якого це значення максимальне. Виходу цього нейрона буде присвоєно значення 1, а іншим нейронам шару Кохонена – 0. Шар Кохонена класифікує вхідні вектори в подібні групи. Тим самим забезпечується відображення багатомірного простору входів в окіл однієї і тієї ж точки простору виходів.

Використання нейромережевої моделі передбачає апріорну класифікацію станів системи (процсу збагачення) на скінченне число варіантів. З кожним станом пов'язаний набір корегуючих впливів,

що передбачають конкретні зміни керуючих параметрів. В якості основного критерія класифікації використовується значення вихідних векторів Y . Для визначення поточного стану процесу проводиться порівняння виходу нейромережевої моделі та збережених в інформаційній базі систем векторів, що визначають стан процесу збагачення.

Найбільш раціональним для прогнозування багатостадійних схем збагачення є варіант комбінованих рішень, що передбачає спільне використання моделей різних типів для різних станів процесу збагачення або різних компонентів (апаратів) схеми збагачення. Зважаючи на багатомірність задач, гетерогенність параметрів та наявність суттєвої невизначеності в залежностях між параметрами реальних виробничих процесів, для побудови моделі пропонується використовувати методи Data Mining. Створені моделі дозволять отримати результати, адекватні задачам оперативного управління технологічним процесом.

В ході дослідження проведено обробку статистичних даних, отриманих на першій стадії подрібнення залізної руди. В якості вхідних параметрів використані показники гранулометричного складу сировини. Метою експерименту було виявлення зв'язків між процентним співвідношенням різних класів крупності та продуктивністю млина.

Експериментальним шляхом були оброблені результати для наступних топологій нейронних мереж: багатошаровий перцептрон, узагальнено-регресійна нейронна мережа, ймовірнісна нейронна мережа.

Для моделювання була обрана модель ймовірнісної нейромережі, що отримала максимальний коефіцієнт кореляції і проведених варіацій експерименту. Дана топологія дозволяє вирішити задачу класифікації і групування в умовах невизначеностей.

Архітектура такої мережі базується на архітектурі радіально-базисної мережі, але в якості другого шару використовується «конкуруючий» шар, що підраховує ймовірність належності вхідного вектора до того чи іншого класу, і співставляє вектор з тим класом, ймовірність належності до котрого найвища. Важлива перевага цих мереж в тому, що вихідне значення має ймовірнісне значення і в тому, що мережа PNN швидко навчається.

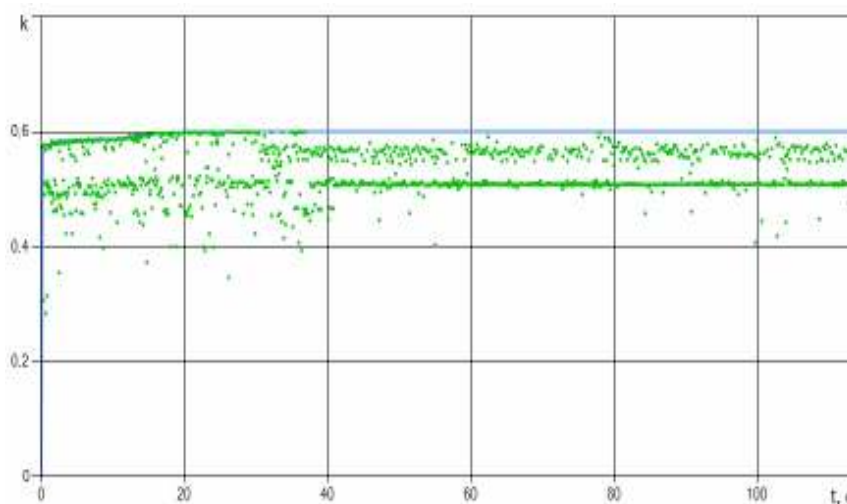


Рисунок 2 – Кореляція

Висновки

Було протестовано 1374 моделі прогнозування (рисунок 3). Найліпший результат, виявлений в ході експерименту має коефіцієнт кореляції 0.601.

Отримана модель реалізує ймовірнісну нейронну мережу. Критерій середньої абсолютної похибки (MAE) становить 0,086. Час навчання становить 2с. Середньоквадратичне відхилення становить 11,306.

Великий обсяг статистичних даних забезпечує можливість створення і практичного застосування моделей експрес аналізу і прогнозування виробничих процесів збагачення мінеральної сировини. Зважаючи на багатомірність задач, гетерогенність параметрів і наявність суттєвої невизначеності в залежностях між параметрами реальних виробничих процесів, для побудови моделей пропонується використовувати методи Data Mining, нечіткої логіки та нейронних мереж. На основі вказаних математичних методів створені і протестовані на реальних даних моніторингу підприємства «ІнГОК». Доведено, що створені моделі дозволяють отримати результати, адекватні завданням оперативного керування виробничими процесами. Найбільш раціональним для прогнозування багатостадійних збагачувальних схем представляється варіант комбінованого рішення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Купін А.І. Структура прототипу та обґрунтування впровадження інтелектуальної системи керування процесом збагачення залізної руди / А.І. Купін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010 –С. 116 – 120.
2. Марюта А. Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько – М.: Недра, 1983. – 277 с.
3. Шупов Л.П. Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. М.: Недра, 1980. – 288 с.
4. Неведров А.С. Об инструментальных средствах определения эффективных режимов обогащения минеральных руд / А.С. Неведров, А.Г. Олейник // Информационные ресурсы России. – 2011. - №5(123). – С.35-38.
5. Скороходов В.Ф. Создание эффективных технологий и техники обогащения минерального сырья с применением методов вычислительной гидродинамики / В.Ф. Скороходов, М.С. Хохуля, В.В.Бирюков // Горный журнал. – 2010. - № 12. – С.79-84.

О.О. Захаров, Т.В. Селівьорстова

**ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ANDROID ДОДАТКУ
ТРИВИМІРНОГО ПАКУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
ПАРАЛЕЛЕПІПЕДНОЇ ФОРМИ У КОНТЕЙНЕРИ**

Анотація. Розглядаються питання створення програмного забезпечення, для пристроїв на базі операційної системи Android, яке знаходить та візуалізує оптимальне рішення "проблеми ранця" (SKP – Single knapsack problem) щодо паралелепіпедних об'єктів.

Ключові слова: Android, паралелепіпедне пакування, Single knapsack problem, Multy-dimensional knapsack problem.

Вступ

Як відомо, конкурентоспроможність товарів є важливою складовою формування ринкових стратегій. Причому конкурентні переваги набувають товари по низці критеріїв, серед яких вагоме місце займає вартість транспортування товарів, яка в свою чергу безпосередньо залежить від способу транспортування та методики формування контейнерного набору та інше. Питання оптимального пакування товарів у контейнери відноситься до класу задач «проблема ранця» (SKP – Single knapsack problem), яка знаходиться на 18 місці за популярністю досліджень і на 4 по затребуваності з 75 алгоритмічних проблем за версією університету Stony Brook, Нью Йорк. Тому, задача програмної реалізації задачі тривимірної пакування є безперечно затребуваною. Актуальність подібної розробки обумовлена відсутністю аналогів для мобільних пристроїв, які в свою чергу, так само накладають обмеження по ресурси і т.і. Крім того, ця програма може бути імплементована не тільки в традиційні мобільні пристрої, а й завдяки операційній системі Android використовуватись у роботизованих складських комплексах.

Метою роботи є створення мобільного додатку для оптимізації пакування вантажних контейнерів (вантажів) паралелепіпедної форми у контейнери.

Стан питання

Прикладна постановка задачі тривимірного пакування вимагає її розгляду у наступній постановці: існує контейнер, коробки, які необхідно упакувати в нього, мають геометричні відмінності. В даному випадку задача стає NP-повною, тобто не існує відомого досконалого алгоритму, який виконується за поліноміальний час. Складність у математичному описі даної задачі виникає з причини існування великої кількості складно формалізованих обмежень. Наприклад, умови розподілення вантажу по вазі, при цьому розподіл вантажу в контейнері повинен відбуватися з урахуванням навантаження на вісі колісного транспорту, або з урахуванням крену морських кораблів. Або, наприклад, вимоги щодо рядності або неможливості перевертати коробки з тендітним вантажем. І таких прикладів можливо навести безліч, що і робить кожну задачу по розробці алгоритмів та програм для пакування вантажів майже унікальною.

Обмеження і технічне завдання

Хоча сама по собі класична задача передбачає знаходження рішення по вазі, в рамках даної постановки задачі розглядається пакування коробок паралелепіпедної форми в контейнер в тривимірному просторі, якій характеризується висотою, довжиною і шириною. Відповідно задача має обмеження:

1. коробки можуть розміщуватися тільки таким чином, щоб їх границі були паралельні стінам контейнера;
2. всі коробки повинні бути упаковані всередину контейнера, не перетинаючи границі контейнера;
3. коробки не повинні перетинатися одна з одною;
4. коробки не повинні мати вільний простір під нижньою границею;
5. коробки можуть вільно змінювати положення за трьома вимірами.

Рішення даної задачі полягає в знаходженні оптимального розташування коробок для мінімізації вільного простору.

Технічне завдання так само пред'являє низку вимог до додатка:

- наявність користувацько-орієнтованого інтерфейсу, розрахованого на працівників, які не є фахівцями в галузі інформатики та володіють мінімальними для користувача знаннями системи ОС Android;

- вихідні дані строго структуровані, для можливої імплементації у роботизований комплекс;
- можливість імпорту даних з бухгалтерських програмних комплексів в XML форматі;
- покрокова візуалізація процесу пакування з метою її використання в якості інструкції щодо заповнення контейнера для будь-якого користувача;
- збереження набору введених даних для можливості їхнього повторного використання.

Модулі програми

З метою спрощення розробки, програму декомпоновано на кілька модулів, кожен з яких виконує своє завдання і пов'язаний з іншими, рисунок 1.



Рисунок 1 - Склад модулів програми

Інтерфейс користувача - забезпечує валідацію даних, які вводяться користувачем на етапі вводу, що запобігає можливість маніпуляції даними, так само він забезпечує користувач-орієнтовану функцію, надаючи користувачеві підказки в потрібних місцях.

Розрахункове ядро - основний модуль програми реалізує алгоритм вирішення задачі і форматує отримані результати для їх подальшого використання.

Модуль взаємодії з даними - даний модуль забезпечує завантаження і збереження введених користувачем даних за допомогою

інтерфейсу Serializable, а також забезпечує імпорт даних в форматі XML і його перетворення в формат даних для програми.

Модуль візуалізації - обробляє отримані від розрахункового ядра дані з метою їх візуалізації за допомогою технології Open GL ES, на кожному кроці процесу проводиться дискретизація, яка використовується для створення візуальної інструкції для користувача.

Вибір алгоритму

Відомо, що «проблема ранця» не має поліноміального алгоритму, до того ж існує велика кількість узагальнень цієї задачі [1 - 4]. Виходячи з наведених обмежень, задача, що розглядається, може бути віднесена до класу задач «проблеми багатовимірного ранця» - Multy-dimensional knapsack problem, коли кожна коробка має кілька ресурсів, замість одного – ваги. Існують різні алгоритми рішення даної задачі, деякі з них дозволяють отримати точне рішення, інші – наближене.

До наближених методів відносяться:

- Жадібний алгоритм (Greedy approximation algorithm);
- Наближена схема повністю поліноміального часу (Fully polynomial time approximation scheme);
- Генетичні алгоритми (genetic algorithm).

Однак згідно обмеженням задачі, що розглядається, бажано отримати оптимальний розв'язок, що виключає використання наближених алгоритмів.

У свою чергу, до точних методів вирішення задачі Multy-dimensional knapsack problem відносяться:

1. Метод повного перебору (Brute force method);
2. Метод гілок і меж (Branch and bound);
3. Методи динамічного програмування (Dynamic programming in-advance algorithm);

Метод динамічного програмування накладає ряд обмежень на умови і не може бути використаний для вирішення «проблеми багатовимірного ранця», а метод гілок і меж - є окремим випадком методу повного перебору. Таким чином рішення задачі паралелепіпедного пакування в межах, поставлених технічним завданням, можливо тільки шляхом декомпозиції методу повного перебору і розробки алгоритмів і методів для кожного етапу.

Дана програмна реалізація є симбіозом декількох алгоритмічних ідей в області розв'язку задачі про пакування у контейнери, зокрема алгоритмів:

- NF «Наступний відповідний». У довільному порядку пакуємо предмети за правилом: перший предмет поміщаємо в перший контейнер, на k-му кроці намагаємося помістити k-й предмет в поточний контейнер. Якщо предмет входить, то поміщаємо його і переходимо до наступного кроку, інакше поміщаємо предмет в новий контейнер.

- FF «Перший відповідний». У довільному порядку пакуємо предмети за правилом: перший предмет поміщаємо в перший контейнер, На k-му кроці знаходимо контейнер з найменшим номером, куди поміщається k-й предмет, і поміщаємо його туди. Якщо такого контейнера немає, то беремо новий порожній контейнер і поміщаємо предмет в нього.

У реалізованому алгоритмі введені деякі додаткові операції, а саме: проводиться сортування набору коробок в порядку зменшення значущого геометричного розміру (наприклад, найбільші спочатку), далі намагаємося помістити коробку починаючи з переднього лівого нижнього кута, в разі успіху отримуємо по суті три додаткових контейнера замість одного (рисунок 2, а). На наступній ітерації оптимізуємо контейнери, намагаючись отримати найбільші за обсягом варіанти контейнерів, з урахуванням максимальної площі нижньої грані, виходячи з того, що контейнер не може мати нижню межу над іншим контейнером.

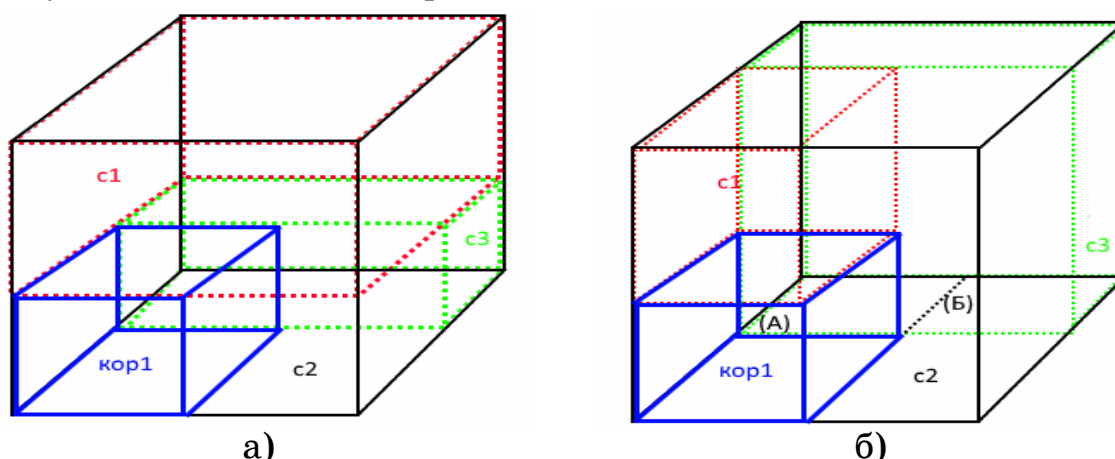


Рисунок 2 – Візуалізація першого кроку розробленого алгоритму тривимірного пакування коробок паралелепіпедної форми

На рисунку 2, б наведений результат розбиття контейнеру на субконтейнери. Контейнер c3 міг бути розбитий по лінії Б, а його права частина приєднана до c2, якби площа нижньої межі була більше у цьому випадку. Далі вибираємо контейнер, який має найбільш близьке розташування до нижнього, лівого, переднього кута, причому саме в такому порядку. Тобто береться контейнер, в нашому випадку це буде c3 кут (А), далі процес проводиться рекурсивно. В загалі кажучи, намагаємося вмістити найбільшу коробку в контейнер згідно наведених вище міркувань, якщо коробка не вміщується, беремо наступний контейнер, якщо дані коробки не входять ні в один з контейнерів беремо меншу коробку і т.д. на кожному етапі оптимізуємо вільний простір контейнерів. На рисунку 3 представлений наступний крок розподілу коробок у контейнері.

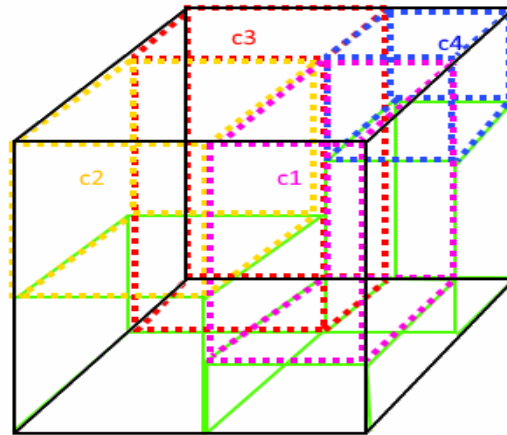


Рисунок 3 – Візуалізація другого кроку розробленого алгоритму тривимірного пакування коробок паралелепіпедної форми

На рисунку 3 пунктиром відзначені порожні місця - контейнери (їх кількість може доходити до декількох десятків), далі процес розподілу коробок у контейнері повторюється за принципом початкового етапу, за невеликим винятком, рекурсивна функція прораховує варіанти перевертаючи коробки, що залишилися. На кожному кроці обчислюється об'єм заповнення і розташування коробок та порівнюється з еталонним (найкращим який був обчислений раніше), якщо він більше ніж попередній, записуємо його в еталон і т.д. У підсумку на виході отримуємо набір вершин і розмірів з першого етапу і кращий з другого та наступних, які об'єднані до масиву значень.

Модуль візуалізації

Одним з основних модулів програми є модуль візуалізації. Дані отримані від розрахункового ядра, модуль візуалізації форматує у вигляді вершин і граней об'єктів за допомогою шейдерів графічного процесору, після чого виводить ці дані на екран [5]. У зв'язку з тим, що отримані дані представляють собою масив об'єктів в заданих координатах, модуль має можливість дискретизувати візуалізацію їх розміщення, а шейдери графічного процесора в свою чергу - змінити масштаб і трансформувати зображення в необхідних користувачеві проекціях (рисунок 4).

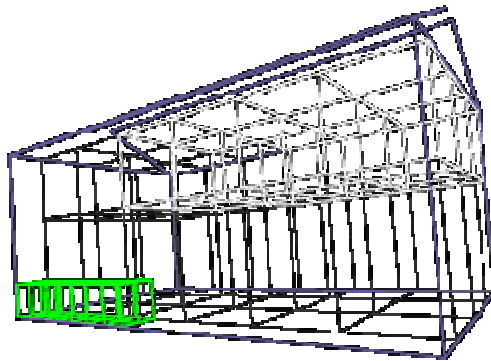


Рисунок 4 – Візуальне представлення процесу пакування

Висновки

В роботі розглянуті основні питання розробки програми для тривимірного пакування паралелепіпедних об'єктів, а саме:

- модулі з яких складається програмне забезпечення;
- зроблено аналіз існуючих алгоритмів та обґрунтовано вибір необхідного алгоритму для вирішення поставленої задачі – пакування коробок в контейнер в тривимірному просторі;
- наведено приклад роботи модуля візуалізації, що вирішує проблеми описані в технічному завданні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Garey, Michael R.; David S. Johnson - Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. - W.H. Freeman.1979. - 247 p. ISBN 0-7167-1045-5. А6: МР9,
2. Окулов С. Программирование в алгоритмах. – 1-е. – Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 384 с. – ISBN 5-94774-010-9.
3. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. Knapsack Problems – Springer Science+Business Media, 2004. – 548 p. – ISBN 978-3-642-07311-3
4. Silvano Martelo, Paolo Toth. Knapsack problems. — Great Britain: Wiley, 1990. – 306 с. – ISBN 0-471-92420-2.
5. Эффективное использование потоков в операционной системе Android. Технологии асинхронной обработки данных. Ёранссон А. – ДМК Пресс, 2015. Пер. с англ. – 300 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Дерев'янюк О.І.

Імітаційна модель агрегації в технології PVD 3

Зимогляд А.Ю., Гуда А.И., Журба А.А., Ковтун В.В.

Исследование взаимосвязи фрактальной размерности металлических пленок и коэффициента трения 9

Тогобицкая Д.Н., Кукса О.В., Пучиков А.В., Узлов О.В., Хулин А.Н.Прогнозирование величин критических точек фазовых превращений AC_1 , AC_3 для малоуглеродистых конструкционных сталей методом физико-химического моделирования на основе параметров межатомного взаимодействия 14**Perviy B.A., Sarychev O.P.**

Influence of the magnus effect on the spacecraft lifetime 20

Бабенко Ю.В.

Дослідження параметрів імітаційної моделі автозаправної станції ... 32

Гнатушенко В.В., Лукашевич О.В.

Дослідження ефективності методів редукції при управлінні системою по виходу 37

Горячкін В.М., Жевжик О.В., Степура О.Ю.

Оптимізація розмірів трубопроводів систем теплопостачання 44

Даниев Ю.Ф., Пошивалов В.П., Резниченко Л.В.

Вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем 53

Михалев А.И., Стенин А.А., Солдатова М.А., Стенин А.С.

Модальная робастная стабилизация технологических процессов с параметрической неопределенностью 61

Пилипчук В.Н., Волкова С.А.

Аналіз однієї узагальненої моделі екологічної конкуренції 69

Потап О.Ю., Зінченко М.Д., Рибальченко М.А., Потап М.О.

Комп'ютерне моделювання автоматизованої системи компенсації ексцентриситету прокатних валків 75

Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Ivaschenko E.V., Busygin V.V.

Improving the efficiency of multiprocessor system through in-line interface network aggregation 84

Болтенков В.А., Куваева В.И., Червоненко П.П.

Применение методов социального выбора в задачах агрегирования оценок в ранговых шкалах 93

Золотухин О.В., Коваленко Т.В.

Об одном подходе к выбору признаков для сегментации текстурных областей изображений в информационных системах аэрокосмического мониторинга 103

Островська К.Ю., Островський Є.В., Кліопа І.В.

Реалізація Remote Dictionary Server з використанням мови Python 116

Малайчук В.П., Клименко С.В., Кудреватых А.Т.

Визуально-аналитический анализ коррелированности цифровых изображений технических объектов в задачах неразрушающего контроля 123

Сенько А.О., Купін А.І.

Нейромережеві моделі для прогнозування параметрів технологічного процесу подрібнення руди 128

Захаров О.О., Селівьорстова Т.В.

Програмна реалізація Android додатку тривимірного пакування об'єктів паралелепіпедної форми у контейнери 135

УДК 53.072:681.3

Деревянко А.И. **Имитационная модель агрегации в технологии PVD** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.3 - 8.

В работе на основе принципов молекулярной динамики создана имитационная модель агрегации кластерных образований при формировании пленок по технологии Physical Vapor Deposition. Эта модель позволяет провести исследование особенностей влияния характеристик потока впрыскиваемого инертного газа на процесс формирования кластерных структур.

Библ. 5, рис. 3.

УДК 004.681.2.08

Зимогляд А.Ю. **Дослідження взаємозалежності фрактальної розмірності металевих плівок та коефіцієнта тертя** / Зимогляд А.Ю., Журба А.А., Гуда А.И., Ковтун В.В. // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.9 - 13.

Проведено дослідження залежності коефіцієнта тертя металевих плівок, до її фрактальної розмірності.

Бібл. 7.

УДК 669.02 / 09: 669.15-194.018.26.001.57

Тогобицька Д.Н., Кукса О.В., Пучіков А.В., Вузлов О.В., Хулін А.Н. **Прогнозування величин критичних точок фазових перетворень As₁, As₃ для маловуглецевих конструкційних сталей методом фізико-хімічного моделювання на основі параметрів міжатомної взаємодії** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.14 - 19.

Отримано аналітичні вирази, що дозволяють розрахувати температуру критичних точок фазових перетворень As₁ і As₃ для низьковуглецевих конструкційних сталей. Представлено порівняльний аналіз з найбільш відомими залежностями інших авторів. Підтверджено адекватність отриманих моделей з можливістю їх використання для розрахунку значень As₁ і As₃ низьковуглецевих конструкційних сталей для оперативного розрахунку і інтеграції моделей в АСУ ТП.

Бібл. 9.

УДК 519.6:531.39

Первій Б.А., Саричев О.П. **Вплив ефекта Магнуса на час перебування об'єкта на орбіті** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.20 - 31.

Розроблено та досліджено математичну модель динаміки великого фрагмента космічного сміття в формі кулі з урахуванням його руху відносно центру мас і встановлені властивості моделі. Вивчено вплив сили Магнуса на час перебування сферичного об'єкта на орбіті при різних значеннях кутової швидкості обертання об'єкта, апогею орбіти, маси

об'єкта, радіусу сфери. Досліджено залежності величини цієї сили від різних параметрів і зроблено висновок про незначний вплив ефекту Магнуса на орбітальне час знаходження об'єкта.

Бібл. 19, іл. 6, табл. 5

УДК 004.94

Бабенко Ю.В. **Исследование параметров имитационной модели автозаправочной станции** / Ю.В. Бабенко // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.32 - 36.

В работе проводится исследование влияния разных законов распределения на работу имитационной модели автозаправочной станции. Построено имитационную модель в 3D виде, которая позволяет имитировать разную динамику работы автозаправочной станции при некоторых определенных начальных условиях.

Библ.3, ил. 2.

УДК 004

Гнатушенко В.В., Лукашевич О.В. **Дослідження ефективності методів редукції при управлінні системою по виходу** / В.В. Гнатушенко, О.В. Лукашевич // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.37 - 43.

Досліджено ефективність використання методів редукції при управлінні системою по виходу та виявлено, що застосування процедур редукції дозволяють скоротити витрати на процес синтезу при зберіганні точності.

Бібл. 10, іл. 2.

УДК 697.343

Горячкин В.Н., Жевжик А.В., Степура О.Ю. **Оптимизация размеров трубопроводов систем теплоснабжения** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.44 - 52.

Рассмотрена задача оптимизации размеров трубопроводов систем теплоснабжения по минимуму затрат на строительство и эксплуатацию систем. При этом учтены зависимости стоимости труб и потерь теплоты в окружающую среду от диаметра и затрат энергии на транспортировку теплоносителя от его расхода. Определено положение минимума затрат на эксплуатацию тепловой сети в зависимости от расхода теплоносителя. Получена зависимость оптимального диаметра трубопроводов тепловой сети от расхода теплоносителя с учетом современных экономических факторов.

Библ. 12, ил. 3.

УДК 519.71

Даниев Ю.Ф., Пошивалов В.П., Резниченко Л.В. **Вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.53 - 60.

Рассмотрены вероятностные модели среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием. Получены выражения для среднего остаточного ресурса технических систем с резервированием и экспоненциальным распределением наработки до отказа. Показано, что интенсивность отказов таких систем возрастает с течением времени, хотя интенсивность отказов нерезервированной системы от времени не зависит, из чего следует, что наступает такой момент времени, после которого использование резервированной системы себя не оправдывает.

Библ. 7

УДК 621.51

Михальов О.І., Стенін О.І., Солдатов М.О., Стенін О.С. **Модальна робастна стабілізація об'єктів керування з параметричною невизначеністю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.61 - 68.

Основна ідея запропонованої в статті модальної робастної стабілізації технологічних процесів з параметричною неопределенностью полягає в тому, що при можливих допустимих варіаціях параметрів технологічного процесу, перехідні процеси в системі робастної стабілізації повинні залишатися в межах заданих допустимих областей (множин) гарантованим чином. Границі цих множин задаються відповідним розташуванням коренів замкнутої системи стабілізації.

Бібл.11.

УДК 534. 121:519.8

Пилипчук В.Н., Волкова С.А. **Аналіз однієї узагальненої моделі екологічної конкуренції** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.69 – 74.

Розглядається нелінійна динамічна система з імпульсною дією. Складність математичного формулювання проблеми для аналітичного дослідження систем з імпульсними впливами обумовлена не гладкістю відповідних динамічних процесів. Це призводить до необхідності розглядати замість однієї системи рівнянь цілої серії систем (в проміжках між імпульсами). Альтернативний шлях полягає у введенні в рівняння сингулярного функцій, що моделюють імпульси, і розгляду рівнянь як інтегральних тотожностей в рамках теорії розподілу. А це вимагає додаткових математичних обґрунтувань в нелінійному випадку.

Бібл.7.

УДК 681.513.7:621.771.2

Потап О.Ю., Зінченко М.Д., Рибальченко М.О., Потап М.О. **Комп'ютерне моделювання автоматизованої системи компенсації ексцентриситету прокатних валків** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.75 – 83.

Створено комп'ютерну модель автоматизованої системи компенсації ексцентриситету валків (АСКЕ), робота якої базується на активному пошуковому алгоритмі визначення параметрів ексцентриситету. Результати проведеного імітаційного моделювання підтвердили ефективність АСКЕ та її спроможність одночасно компенсувати ексцентриситет опорних та робочих валків з високою точністю.

Бібл. 6, іл. 6.

УДК 004.272.43.003.13

Іващенко В.П. **Підвищення ефективності багатопроцесорної системи за рахунок агрегації каналів мережевого інтерфейсу** / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, О.В. Іващенко, В.В. Бусигін // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.84 – 92.

У даній роботі окреслено шляхи підвищення ефективності багатопроцесорної системи за рахунок зміни архітектури її мережевого інтерфейсу. Встановлено, що безперечною перевагою режиму агрегації каналів є істотне підвищення швидкості обміну даними між обчислювальними вузлами багатопроцесорної системи й суттєве зменшення коефіцієнта уповільнення обчислень. Виведено аналітичні співвідношення для коефіцієнта уповільнення обчислень. Виконано етап моделювання коефіцієнта уповільнення обчислень та встановити закономірності його змінення в залежності від тих обчислювальних платформ, що застосовуються. Показано, що за рахунок режиму агрегації каналів мережевого інтерфейсу підвищується надійність функціонування багатопроцесорної системи. Сформований режим роботи мережевого інтерфейсу багатопроцесорної системи надає ширші можливості для реалізації процедури обміну даними між обчислювальними вузлами, істотно покращуючи характеристики її ефективності, швидкодії та надійності її функціонування.

Бібл. 6, іл. 2, табл. 2.

УДК 004.33(035)

Болтенков В.А., Куваева В.И., Червоненко П.П. **Применение методов социального выбора в задачах агрегирования оценок в ранговых шкалах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.93 – 102.

Исследованы возможности применения методов социального выбора для агрегирования коллективных оценок в ранговых шкалах. Рассмотрены и систематизированы 12 протоколов голосования: Борда, Кондорсе, Симпсона, Доджсона, Коупленда, Фишберна, Блэка, Шульце, Нансона, Кумбса, Болдуина, Хэара. Перечисленные правила голосования применены для построения консенсусной ранговой оценки при коллективной экспертизе для выбора программируемого логического контроллера для автоматизации работы воздухооразделительных установок. Показана перспективность применения методов голосования для построения коллективных оценок в ранговых шкалах.

Библ. 14, табл. 2.

УДК 623618:77 058

Золотухин О.В, Т.В. Коваленко Т.В. **Об одном подходе к выбору признаков для сегментации текстурных областей изображений в системах аэрокосмического мониторинга** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.103 – 115.

Рассматриваются модели обработки цифровых текстурных изображений. Проведен обзор современного состояния технологии автоматизированной обработки изображений в системах воздушного мониторинга. Дано определение модели текстурного изображения. Рассмотрены два основных подхода к выбору признаков сегментации изображений: статистический и метод на основе дискретного ортогонального преобразования. Проведенный анализ позволяет обоснованно осуществлять выбор признаков для сегментации изображений в зависимости от свойств исходного изображения в целях оперативной обработки визуальных данных в системах аэрокосмического мониторинга.

Библ. 10, илл. 6, табл. 1.

УДК 004.42

Островська К.Ю., Островський Є.В., Кліопа І.В. **Реалізація Remote Dictionary Server з використанням мови Python** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.116 – 122.

В результаті роботи було програмно реалізовано Redis використовуючи мову Python. Завдяки високій швидкості і простоті Redis часто використовується для мобільних і інтернет-додатків, ігор, рекламних платформ та ін. В тих випадках, коли необхідна максимально можлива продуктивність.

Бібл. 5.

УДК 621.372.542

Малайчук В.П., Клименко С.В., Кудрєватих О.Т. **Візуально-аналітичний аналіз корелірованості моделей цифрових зображень технічних об'єктів в задачах неруйнівного контролю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.123 – 127.

Проведено візуально-аналітичний аналіз вимірювань яскравості з різними параметрами корелірованості та оцінені можливості виявлення змін корелірованості на різних цифрових зображеннях в термінах нечіткої логіки.

Бібл. 2, рис. 3, табл. 1.

УДК 004.942

Сенько А.О., Купин А.І. **Нейромережеві моделі для прогнозування параметрів технологічного процесу подрібнення руди** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.128 – 134.

Досліджено можливості використання різноманітного математичного апарату для створення моделей оперативного прогнозування. Створені моделі дозволяють отримати

результати, адекватні задачам оперативного керування виробничим процесом. Нелінійні залежності продуктивності від параметрів вхідної сировини дають змогу прогнозувати зміну технологічних характеристик сировини в режимі реального часу.

Бібл. 5, іл. 2, табл. 0

УДК 004.42: 658.52.011.56

Захаров О.О., Селівьорстова Т.В. **Програмна реалізація Android додатку тривимірного пакування об'єктів паралелепіпедної форми у контейнери** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 2 (115). - Днепр, 2018. - С.135 – 141.

Розглядаються питання створення програмного забезпечення, для пристроїв на базі операційний системи Android, яке знаходить та візуалізує оптимальне рішення “проблеми ранця”(SKP – Single knapsack problem) щодо паралелепіпедних об'єктів.

Бібл. 5.

UDK 53.072:681.3

Derevianko Oleksandr **Imitation model of aggregation on technology of PVD** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.3 - 8.

On the basis of the principles of molecular dynamics, an imitation model of cluster formations during the creation of films on technology of Physical Vapor Deposition was developed in the work. This model enables to carry out the research of features effect of the characteristics of the injected inert gas flow on the formation of cluster structures.

Bibl. 5, il. 3.

UDC 004.681.2.08

Zimoglyad A.Y. **Investigation dependence of the coefficient friction metal films on the fractal dimension** /Zimoglyad A.Y., Zhurba A.A., Guda A.I., Kovtun V.V. // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.9 - 13.

A study was made of the dependence coefficient of friction metal film, and its fractal dimension.

Bibl. 7.

UDC 669.02 / 09: 669.15-194.018.26.001.57

Togobitskaya D.N., Kuksa O.V., Puchikov A.V., Uzlov O.V., Chulin A.N. **Forecasting the values of the critical points of the phase transitions Ac1, Ac3 for low-carbon structural steels by the method of physicochemical modeling on the basis of interatomic interaction parameters** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.14 - 19.

Analytic expressions are obtained that allow calculating the temperature of the critical points of the phase transformations Ac1 and Ac3 for low-carbon structural steels. A comparative analysis is presented with the most known dependencies of other authors. The adequacy of the obtained models is confirmed with the possibility of using them for calculating the values of Ac1 and Ac3 for low-carbon structural steels for the operative calculation and integration of models in the process control system.

Bibl. 9.

UDC 519.6: 531.39

Perviy B.A., Sarychev A.P. **Influence of the magnus effect on the spacecraft lifetime** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.20 - 31.

A mathematical model of the dynamics of a large fragment of space debris in the form of a ball with its movement relative to the center of mass is developed and investigated. The effect of the Magnus force on the lifetime of a spherical object on orbit at different angular velocities, apogee of the orbit, the mass of the object, and the radius of the sphere were studied. The dependence of the magnitude of this force on various parameters was studied and a conclusion was made about the insignificant effect of the Magnus effect on the orbital lifetime of the object.

Ref. 19, Pic. 6, Table. 5.

UDK 004.94

Babenko Yu. **Investigation of parameters of the simulation models of petrol station/ Yu. Babenko** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.32 - 36.

In this paper we study the effect of different distribution laws on work of petrol station simulation mode. A simulation model has been constructed in 3D view that allows simulating different dynamics of a gas station operation under certain definite initial conditions.

Refs.3, ill. 2.

UDK 004

Hnatushenko V.V., Lukashevych O.V. **Reduction methods effectiveness research of output-controlled system** // V.V. Hnatushenko, O.V. Lukashevych // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.37 - 43.

The efficiency of using reduction methods in controlling the output system is investigated and it is shown that the use of reduction procedures allows to reduce the expenses for the synthesis process while maintaining the accuracy.

Bibl. 10, ill. 2.

UDC 697.343

Horiachkin V.M., Zhevzhik O.V., Stepura O.Y. **Optimization of pipelines sizes of heat supply systems** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.44 - 52.

The problem of optimization of pipelines sizes of heat supply systems by minimizing the costs of construction and operation of the systems is considered. In this case, the dependence of the cost of pipes and heat losses on the environment from the diameter and energy consumption for the coolant transportation from its cost are taken depending on the coolant flow. The position of the minimum cost of operation of the heating network is determined depending on the coolant flow. The dependence of the optimal diameter of the pipelines of the heat network on the flow of the coolant taking into account modern economic factors is obtained.

Bibl. 12, il. 3.

UDC 519.71

Daniev J.F., Poshivalov V.P., Reznichenko L.V. **Вероятностные models of an average residual resource of technical systems** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.53 - 60.

Are considered вероятностные models of an average residual resource of technical systems with reservation. Expressions for an average residual resource of technical systems with reservation and экспоненциальным distribution of an operating time to refusal are received. It is shown, that failure rate of such systems grows eventually though failure rate of not reserved system does not depend on time from what follows, that there comes such moment of time after which use of reserved system of does not justify

Bibl. 7.

UDC 621.51

Mikhalyov O.I., Stenin O.A., Soldatova M., Stenin O.S. **Modal robust stabilization of control objects with parametric uncertainty** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.61 - 68.

The main idea of the modal robust stabilization of technological processes with parametric uncertainty proposed in the article is that, with possible permissible variations in the

parameters of the technological process, the transient processes in the robust stabilization system must remain within the given admissible regions (sets) in a guaranteed manner. The boundaries of these sets are given by the corresponding arrangement of the roots of the closed stabilization system.

Bibl.11.

UDC 534. 121: 519.8

Pilipchuk V.N., Volkova S.A. **Analysis of one generalized model of environmental competition** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.69 - 74.

In this paper the non-smooth temporal transformation has been applied to construct a family of periodic solutions of a weakly non-linear system under the parametric impulsive excitation. The transformation eliminates singular terms and reduces in the equation of motion to a standard weakly non-linear boundary value problem. To solve this problem asymptotic expansions were applied. As a result explicit form analytical solutions in terms of elementary functions have been obtained for small asymmetry of the distribution of impulses' sequences, (the dipole-like shift of each two neighboring impulses). The solutions and numerical simulations show a principal role of the shifts of the impulses' sequences.

Bibl.7.

UDC 681.513.7:621.771.2

Potap O., Zinchenko M., Rybalchenko M., Potap M. **Computer modeling of the automated system for compensating the eccentricity of the rolls** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.75 - 83.

A computer model of an automated system for compensating the eccentricity of rolls (ASCE) is created. This model is based on an active search algorithm for determining the parameters of eccentricity. The results of the simulation have confirmed the efficiency of ASCE and its ability to simultaneously compensate for the eccentricity of the support rolls and work rolls with a high accuracy.

Ref. 6, ill. 6.

UDC 004.272.43.003.13

Ivaschenko V.P. **Improving the efficiency of multiprocessor system through in-line interface network aggregation** / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, E.V. Ivaschenko, V.V. Busygin // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.84 - 92.

This paper outlines ways to increase the efficiency of a multiprocessor system by changing the architecture of its network interface. It is established that the undoubted advantage of channels aggregation mode is a significant increase of data interchange between computing nodes of a multiprocessor system and a significant decrease in deceleration rate. The analytical ratios for the computations deceleration coefficient are derived. There was executed the stage of computations deceleration factor simulation and the regularity of its change depending on the applied computing platforms executed. It is shown that due to the mode of network interface channels aggregation, the multiprocessor system operation reliability increases. The current operating mode of the multiprocessor system network interface provides greater possibilities for implementation of data interchange procedure between the comput-

ing nodes, significantly improving the characteristics of its efficiency, performance and reliability of its operation.

Bibl. 6, il. 2, tabl. 2.

UDC 004.33(035)

Boltenkov V.A., Kuvaeva V.I., Chervonenko P.P. **Application of methods of social choice in tasks of aggregation assessment in rank scales** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.93 - 102.

The possibilities of applying social choice methods for aggregating collective estimates in rank scales are explored. 12 voting protocols are considered and systematized: Borda, Condorcet, Simpson, Dodgson, Copeland, Fishburn, Black, Schulze, Nanson, Coombs, Baldwin, Haar. The voting rules listed are applied to construct a consensus rank evaluation in the collective expertise for selecting a programmable logic controller to automate the operation of air separation plants. The prospects of using voting methods for building collective ratings in rank scales are shown.

Bibl. 14, tab. 2.

UDC 623618:77 058

Zolotuhin O.V., Kovalenko T.V. **On one approach to the selection of features for the segmentation of textured image areas in aerospace monitoring systems** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.103 - 115.

The models of digital textural image processing are considered. The modern state of the technology of automated image processing in air monitoring systems is reviewed. A definition of the texture image model is given. Two main approaches to the selection of the signs of image segmentation are considered: statistical and method based on the discrete orthogonal transformation. The analysis allows to make a reasonable choice of features for segmentation of images depending on the properties of the original image for the purpose of operative processing of visual data in aerospace monitoring systems.

Bibl. 10.

UDC 004.42

Ostrovskaya K.Yu., Ostrovsky E.V., Cliopa I.V. **Implementing Remote Dictionary Server using Python** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.116 - 122.

As a result of the work, Redis was implemented programmatically using the Python language. Due to its high speed and simplicity, Redis is often used for mobile and Internet applications, games, advertising platforms, etc. In those cases where the maximum possible performance is needed.

Bibl. 5.

UDK 621.372.542

Malachuk V.P., Klymenko S.V., Kudrevatyh A.T. **Visual-analytical analysis of the correlation of digital images of technical objects in tasks of non-destructive testing** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.123 - 127.

A visual-analytical analysis of brightness measurements with various correlation parameters was carried out and the possibilities of detecting correlations on various digital images in terms of fuzzy logic were estimated.

Bibl. 2, ill. 3, tabl. 1.

UDC 004.942

Senko A.O, Kupin A.I. **Neural network models for predicting the parameters of the technological process of ore beneficiation** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.128 - 134.

The possibilities of using different mathematical apparatus for creating models of operational forecasting are explored. The created models allow obtaining results adequate to the tasks of operational control of the production process. Non-linear dependencies of performance on the parameters of input raw materials make it possible to predict the change in the technological characteristics of raw materials in real time.

Bibl. 5, il. 2, tabl. 0

UDK 004.42: 658.52.011.56

Zakharov A. A., Selivorstova T.V. **The programmatically realisation the Android app for three-dimensional packaging of parallelepiped objects to the containers** // System technologies. N 2(115) - Dnipro, 2018.- P.135 - 141.

The article examines the questions of development of a program for devices with the Android operation system. This application searches and visualizes the optimal solution of the "Single knapsack problem" for parallelepiped objects.

Bibl. 5.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Дерев'янюк Олександр Іванович – к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та систем, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Зимогляд А.Ю. – аспірант, кафедра ІТС НМетАУ.

Журба А.А. – к.т.н, доц., кафедра ІТС НМетАУ.

Гуда А.І. – к.т.н, доц., кафедра ІТС НМетАУ.

Ковтун В.В. – лаборант, кафедра ІТС НМетАУ.

Тогобицька Дар'я Миколаївна - доктор технічних наук, завідувача відділом фізико-хімічних проблем металургійних процесів, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Кукса Олег Володимирович - кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Пучіков А.В. - Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Узлов О.В. - Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Хулін А.Н. -Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

Первій Богдан Андрійович – аспірант, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України.

Саричев Олександр Павлович - доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України.

Бабенко Юлія Васильевна - к.т.н., доцент кафедри информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України.

Лукашевич Олег Валерійович – магістр кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України

Горячкін Вадим Миколайович – к.т.н., доц., доцент кафедри "Теплотехніка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Жевжик Олександр Владиславович – к.т.н., доц., доцент кафедри "Теплотехніка" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Степура Оксана Юріївна – студентка Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Пошивалов Владимир Павлович - доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИТМ НАНУ и НКАУ.

Даниев Юрий Фаизович - кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, ИТМ НАНУ и НКАУ.

Резниченко Людмила Васильевна - мл. научный сотрудник ИТМ НАНУ и НКАУ.

Солдатова Мария Александровна – магистр кафедры технической кибернетики НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».

Стенин Александр Сергеевич – студент кафедры технической кибернетики НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского».

Стенін Олександр Африканович – д.т.н., професор кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Михалев Александр Ильич – д.т.н., профессор, заведующий кафедры Информационных технологий и систем, НМетАУ.

Пилипчук Валерій Миколайович - доктор фіз.-мат. наук, професор Wayne State University.

Волкова Світлана Анатоліївна - кандидат фіз.-мат. наук, доцент, зав. кафедрою «обчислювальної техніки та прикладної математики» ДВНЗ «УДХТУ».

Потап Олег Юхимови - професор Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна.

Зінченко Михайло Дмитрович - доцент Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна.

Рибальченко Марія Олександрівна - доцент Національної металургійної академії України, м. Дніпро, Україна.

Потап Михайло Олегович - студент Дніпровського Національного університету ім. О. Гончара, м. Дніпро, Україна.

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.

Куваева Варвара Игоревна - аспирант кафедри информационных систем Одесского национального политехнического университета.

Болтенков Виктор Алексеевич – к.т.н., доцент кафедри информационных систем Одесского национального политехнического университета.

Червоненко Петр Петрович – к.т.н., доцент кафедри информационных систем Одесского национального политехнического университета.

Золотухин Олег Викторович - доцент, к.т.н., кафедра искусственного интеллекта, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Коваленко Тарас Васильович - младший научный сотрудник, Институт проблем регистрации информации НАНУ.

Островська Катерина Юріївна – к.т.н., доцент кафедри Інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

Островський Євген Вікторович – аспірант Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара.

Кліопа Ігор Володимирович – магістрант кафедри Інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

Малайчук Валентин Павлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронной автоматики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Клименко Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронной автоматики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Кудреватых Александр Тихонович – заведующий учебной лабораторией неразрушающего контроля кафедры радиоэлектронной автоматики физико-технического факультета Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара.

Купін Андрій Іванович – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж, ДВНЗ «Криворізький національний університет».

Сенько Антон Олександрович - асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізький національний університет.

Захаров Олександр Олександрович – студент групи ІТСц-016, Центр підвищення кваліфікації, Національна металургійна академія України.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна – к.т.н., доцент, кафедра інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.