

Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун, С.И. Дёмин
**ИССЛЕДОВАНИЕ НА ELCUT-МОДЕЛИ
ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ КОВША
ПРИ ВЫПУСКЕ РАСПЛАВА**

Аннотация. Изменение температурного поля футеровки при постепенном заполнении ковша жидкой сталью получено в результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных, в программном пакете ELCUT.

Ключевые слова: выпуск расплава, температура футеровки ковша, метод конечных элементов.

Постановка проблемы

В настоящее время все больше технологических операций с жидким металлом осуществляют в сталеразливочных ковшах. При передаче ковша на разливку необходимо обеспечить довольно узкий диапазон температуры расплава. Существующие технические средства контроля не позволяют в производственных условиях постоянно контролировать его температуру в ковше, поэтому для управления технологическим процессом ее необходимо прогнозировать.

Снижение температуры расплава связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с поверхности расплава. Выпуск металла производится в подготовленные ковши, которые предварительно разогревают на специальных стендах с целью снижения тепловых потерь расплава, а также уменьшения термического удара на футеровку ковша.

Прогнозирование изменения температуры расплава в ковше возможно только при наличии адекватных математических моделей, учитывающих тепловое состояние футеровки ковша перед выпуском.

Использование компьютерной модели теплового состояния ковша позволит принимать обоснованные решения о продолжительности последующих технологических операций и необходимости дополни-

тельного разогрева расплава, что в конечном итоге позволит уменьшить энергетические затраты на внепечную обработку.

Анализ публикаций по теме исследования

Методика расчета распределения температур в футеровке ковша при термическом воздействии на нее расплава приведена во многих работах, в частности, в [1–2]. В статье [3] представлены результаты моделирования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке, полученные методом конечных элементов в программном пакете ANSYS.

В результате анализа и обработки данных натуральных исследований предложена математическая модель [4] для прогноза изменения температуры расплава при подготовке к вакуумированию ковшей в зависимости от массы и начальной температуры налитой в них стали, а также от температуры футеровки ковшей перед выпуском [5]. Модель учитывает измеренное теплосодержание ковша и температуру стали на выпуске. Результатом расчета является изменение температуры металла в процессе внепечной обработки.

С использованием этой модели разработана система мониторинга теплосодержания сталеразливочного ковша, подаваемого под выпуск [6]. При этом прогноз изменения температуры стали в ковше осуществляется на основании фактических и расчетных данных и используется для оперативной корректировки температурного режима производства стали. Определение теплосодержания ковша, подаваемого под плавку, позволяет оценить динамику снижения температуры расплава в процессе дальнейшей его обработки, определить технологическую цепочку до выпуска стали и начала внепечной обработки, упростить процедуру принятия решения о выборе ковша под выпуск, исключить необоснованные операции нагрева и охлаждения стали, повысить качество заготовки благодаря стабилизации температуры металла в ковше перед разливкой.

Однако до настоящего времени не рассматривалась динамика параметров теплового состояния футеровки сталеразливочного ковша при выпуске в него расплава.

Формулировка цели статьи

Исследовать изменение температурного поля футеровки сталеразливочного ковша при постепенном заполнении его жидкой сталью.

Основная часть

Для этой цели использован метод конечных элементов, который позволяет решать широкий круг задач механики, теплообмена, электро- и магнитостатики, а также является основой инженерного анализа. Программный пакет ELCUT предназначен для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов. Он позволяет решать краевые задачи, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной или векторной функции.

Как правило, интерес представляет распределение температуры, температурного градиента и теплового потока. ELCUT позволяет выполнять линейный и нелинейный анализ температурных полей в плоской и осесимметрической постановке.

Физическая модель включает в себя уравнения в частных производных, граничные условия, с которыми решаются эти уравнения, и свойства материала. В контексте задачи теплопроводности ELCUT использует уравнения для плоскопараллельной задачи

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t};$$

или осесимметричной задачи

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где T – температура; $\lambda(T)$ – теплопроводность; $q(T)$ – мощность внутренних источников тепла; $c(T)$ – удельная теплоемкость; ρ – плотность материала.

Уравнения (1) решаются совместно с граничными условиями, которые в ELCUT соответствуют стандартным. Это условие Дирихле – температура на поверхности материала, которая может быть задана как числом, так и формулой, описывающей зависимость температуры от координат и от времени, если задача нестационарная. Второе граничное условие – это известная плотность теплового потока. Если она нулевая, то это естественное граничное условие, а если ненулевая, то она может быть задана как числом, так и функцией от координат или времени. Конвективный теплообмен на границе описывается двумя константами: коэффициентом теплообмена и температурой окружаю-

щей среды. Радиационный теплообмен описывается также температурой среды и коэффициентом лучистого теплообмена.

В качестве объекта исследования был выбран сталеразливочный ковш с размерами рабочего пространства: диаметр 3,0 м и высота 3,7 м. Моделирование нестационарной теплоотдачи через многослойные стенку и днище производилось по исходным данным и начальному полю температур слоев футеровки с учетом реальной динамики температуры расплава.

Стенки и днище ковша состоят из нескольких слоев различных материалов. Стенки – из хромомagneзитового кирпича (корунд) толщиной 150 мм, муллитового кирпича толщиной 65 мм, шамотного кирпича толщиной 32 мм и стального кожуха толщиной 20 мм. Днище – из корунда толщиной 150 мм, выравнивающего слоя из муллитового кирпича, толщина которого 65 мм, алюмосиликатного самотвердеющего бетона (АССБ), средняя толщина которого составляет 85 мм и кожуха толщиной 28 мм. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее материалов взяты из [7].

Поскольку налив ковша продолжается 15 минут, основные изменения температурного поля происходят в первом слое – корунде. Поэтому, с целью упрощения геометрии модели, вместо остальных слоев футеровки стенки и днища принят один, комбинированный слой с приведенными значениями свойств его компонентов (рис. 1).

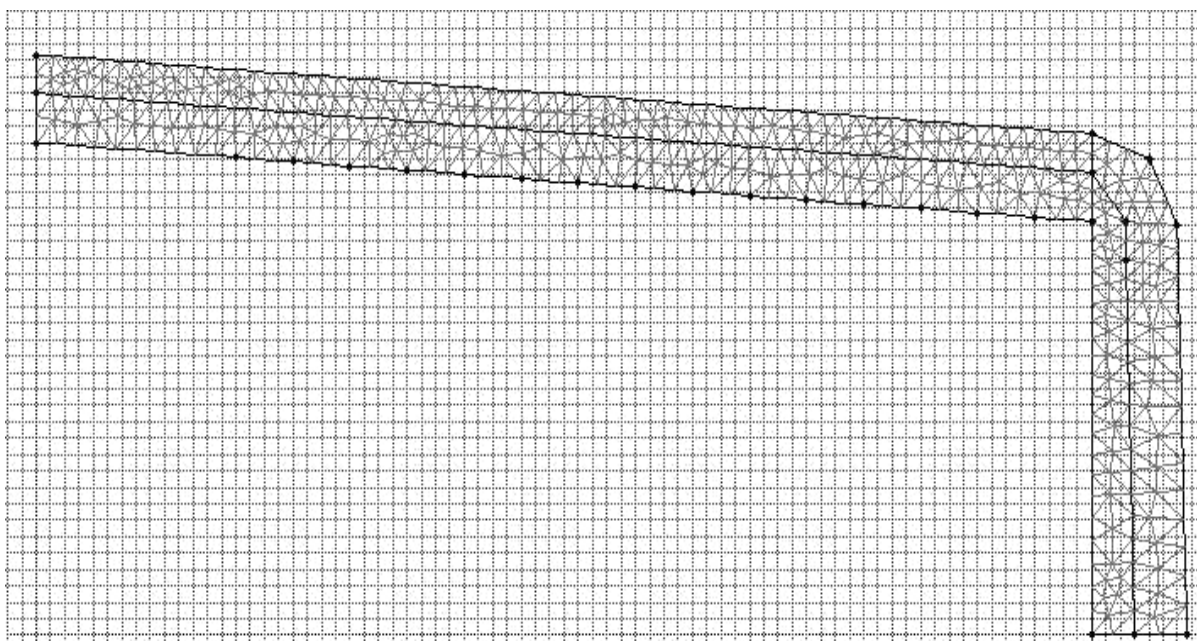


Рисунок 1 – Геометрическая модель ковша

Толщина первого слоя как в стенке, так и в днище равна 150 мм, плотность корунда принята равной 3000 кг/м³. Теплопроводность λ_1 и теплоемкость C_1 корунда в модели заданы формулами

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 2,10 + 1,90 \cdot 10^{-3} t, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); \\ C_1 &= 790 + 0,42 t, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C}).\end{aligned}\quad (2)$$

Для второго слоя рассчитаны приведенные значения теплоемкости, теплопроводности и плотности по свойствам муллита, шамота и стали кожуха [7]. При этом толщина второго слоя футеровки стенки принята равной сумме толщин муллита, шамота и стального кожуха – $\delta_2^{cm} = 117$ мм.

Приведенное значение теплопроводности второго (комбинированного) слоя футеровки стенки ковша получим из условия сохранения величины термического сопротивления этих слоев [8]

$$\lambda_2 = \delta_2 / \sum \delta_i / \lambda_i, \quad (3)$$

где $i = 2, 3, 4$ (номер соответствующего материала).

Приведенное значение теплоемкости и плотности второго слоя футеровки находим по выражениям

$$\begin{aligned}C_2 &= \sum C_i \rho_i \delta_i / \delta_2^{cm}, \\ \rho_2 &= \sum \rho_i \delta_i / \delta_2^{cm}.\end{aligned}\quad (4)$$

Для днища приведенные значения указанных характеристик рассчитаны аналогично по свойствам муллита, АССБ и стали кожуха согласно данным [7]. При этом толщина второго слоя футеровки днища принята равной – $\delta_2^{dn} = 178$ мм.

Начальным условием для выпуска стали в ковш является определенная температура разогрева внутренней поверхности футеровки ковша. Программа ELCUT не позволяет вводить ненулевые начальные условия, однако дает возможность решать связанные задачи, используя результаты решения предыдущей задачи в качестве исходных данных для последующей задачи. Поэтому для моделирования изменения теплового состояния ковша при его наливке последовательно решались две связанные задачи.

Задача 1 – Предварительный разогрев ковша на стенде в течение 24 часов. При этом на внутренней поверхности стенки и днища

ковша реализуется граничное условие I-го рода – постоянная температура 1000°C . От наружной поверхности ковша (стального кожуха) в окружающую среду с постоянной температурой 30°C тепло отводится за счет конвекции. В соответствии с предварительным расчетом и литературными данными значение коэффициента теплоотдачи принято равным $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Задача 2 – Выпуск стали в ковш в течение 15 минут.

Этот процесс моделируется наливом расплава 15-ю дискретными порциями высотой по $0,2 \text{ м}$, последовательно каждую минуту заполняющими ковш до высоты $3,0 \text{ м}$. Соответственно, внутреннее ребро геометрической модели ковша разбито на 16 участков (дополнительный участок протяженностью $0,7 \text{ м}$ соответствует запасу высоты ковша), которым присвоены метки ребер от 1 до 16.

Граничное условие для каждого участка – скачкообразное изменение температуры внутренней стенки ковша от 1000°C до 1600°C (начальная температура расплава) в соответствующий момент времени. Для первого слоя футеровки стенки (участок 1 внутреннего ребра) и днища эта температура задается сразу – $T_1(0) = 1600^{\circ}\text{C}$.

Следующий слой расплава, которому соответствует участок 2, будет заполнен через одну минуту. Задать граничные условия для этого участка позволяет встроенная ступенчатая функция STEP, равная 0 при отрицательном значении аргумента и 1 – при неотрицательном его значении. Поэтому граничное условие для температуры расплава на участке 2 выглядит следующим образом:

$$T_2(t) = 1000 + 600 \cdot \text{step}(t - 60), \quad (5)$$

где t – текущее время моделирования в секундах.

На всех последующих участках, до 15-го включительно, используется аналогичное выражение для задания граничных условий:

$$T_j(t) = 1000 + 600 \cdot \text{step}(t - 60 \cdot (j - 1)), \quad (6)$$

где j – номер участка.

При этом коэффициент теплопередачи от расплава к стенкам ковша на всех участках 1...15 равен $\alpha_p = 5800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

По окончании налива ковша над расплавом остается запас высоты ковша, который в нашем случае составляет $0,7 \text{ м}$ (участок 16 внутреннего ребра). Здесь ковш расплавом не заполняется, однако внутренняя поверхность футеровки подвергается воздействию лучистого потока, исходящего от струи жидкой стали и с поверхности

расплава. В качестве граничного условия для всей поверхности внутреннего ребра 16 расчетным путем определен усредненный тепловой поток мощностью 210 кВт.

На рисунке 2 представлено полученное в результате решения задачи 2 в пакете ELCUT температурное поле футеровки ковша по окончании выпуска в него расплава. В ходе моделирования днище и примыкающий к нему 1-й участок стенки контактируют с расплавом сразу, 5-й участок, находящийся на высоте ~1 м, заполняется через 5 минут, 10-й участок (~2 м) – через 10 минут, а 15-й (~3 м) – на последней минуте налива.

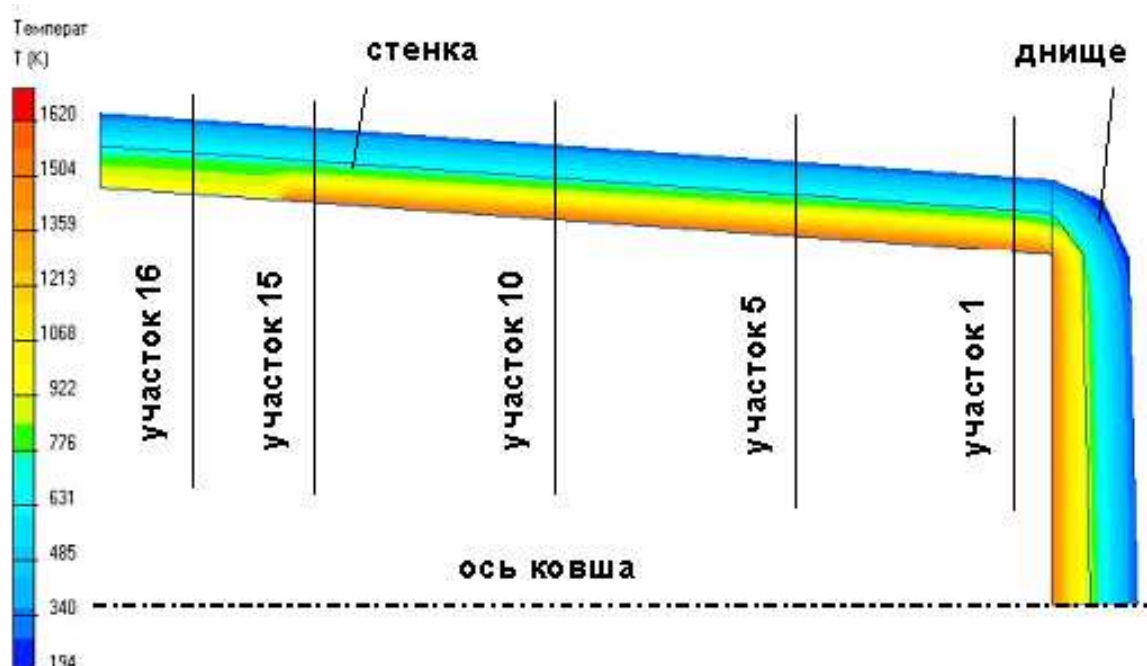


Рисунок 2 – Температурное поле футеровки ковша по окончании выпуска в него расплава

Соответствующее распределение температуры по толщине футеровки приведено на рис. 3. Очевидно, что практически все изменение теплосодержания футеровки ковша в ходе его заполнения жидкой сталью локализуется в первом слое корунда толщиной 150 мм. Несмотря на отсутствие непосредственного контакта с жидкой сталью, температура внутренней стенки футеровки на 16-м участке стенки достигает 1140°C.

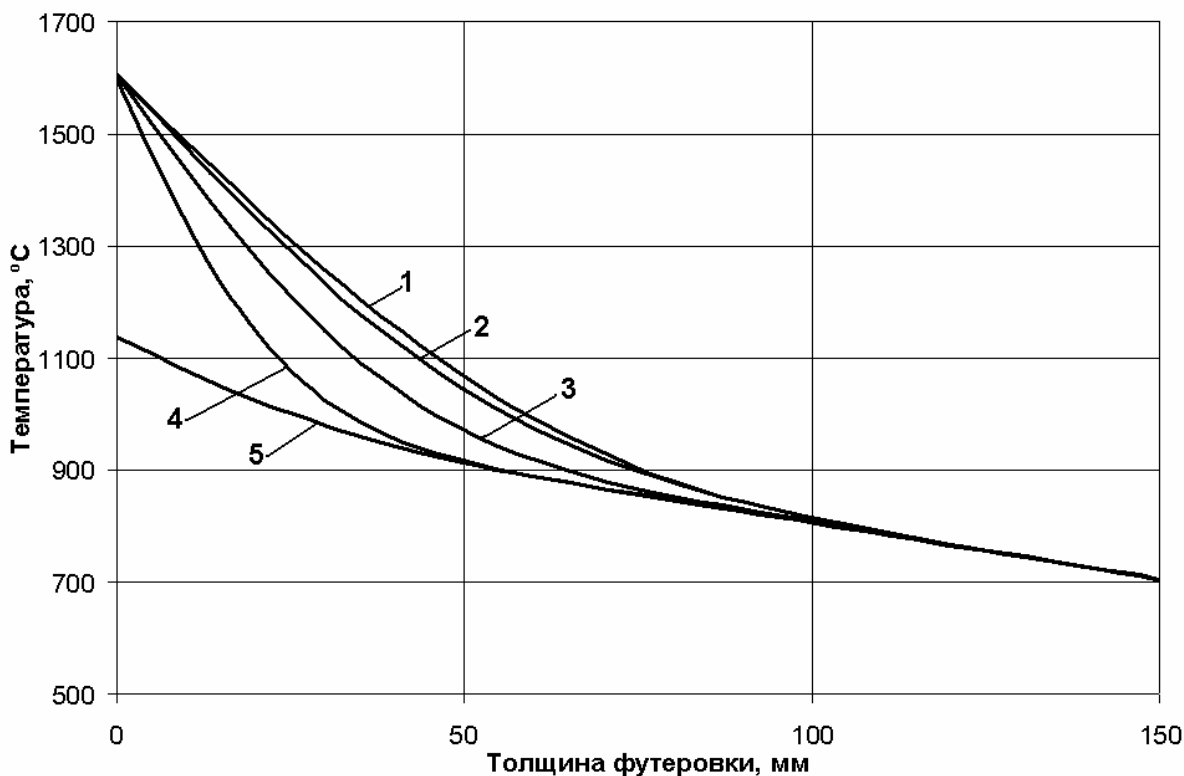


Рисунок 3 – Распределение температуры в слоях футеровки:

1 – участок 1; 2 – участок 5; 3 – участок 10;

4 – участок 15; 5 – участок 16

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Исследована динамика параметров теплового состояния сталеразливочного ковша при выпуске в него расплава. Изменение температурного поля футеровки при постепенном заполнении ковша жидкой сталью получено в результате решения методом конечных элементов краевой задачи, описываемой эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных, в программном пакете ELCUT.

Установлено, что практически все изменение теплосодержания футеровки ковша в ходе его заполнения жидкой сталью локализуется в первом слое корунда.

Полученные результаты могут быть использованы для создания системы прогнозирования температуры расплава и теплового состояния сталеразливочных ковшей в ходе внепечной обработки стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volkova O. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking / O. Volkova, D. Janke // *ISIJ International*, 2003. v.43. No.8. P.1185–1190.
2. Казачков Е.А., Исайчикова С.Г. // В кн.: Вестник Приазовского государственного технического университета. – Мариуполь: ПГТУ, 2000. – N 9. – С.27– 33.
3. Ошовская Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой // Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. – Наукові праці ДонНТУ: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 198-210.
4. Бейцун С.В. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.Ф. Сапов. – Металургія: Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2006. – Вип. 13. – С. 16-21.
5. Михайловский Н.В. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава // Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун. – Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – С. 135-142.
6. Агеев С.В. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша // С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков, В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.А. Блишников. – Металлург. – 2011. – N 5. – С. 48–52.
7. Бейцун С.В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.И. Шibaкинский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – N 4. – С. 104–107.
8. Исаченко В.П. Теплопередача. Изд. 4-е / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел // М.: Энергия. – 1989. – 440 с.

О.О. Бейгул, М.М. Корнійчук, Г.Л. Лепетова

СИСТЕМНЕ ФОРМУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА НЕСУЧУ КОНСТРУКЦІЮ ЗЧЛЕНОВАНОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА З U-ПОДІБНОЮ РАМОЮ

Анотація. Розроблена системна математична модель формування динамічних навантажень на несучу конструкцію зчленованого контейнеровоза з U-подібною рамою.

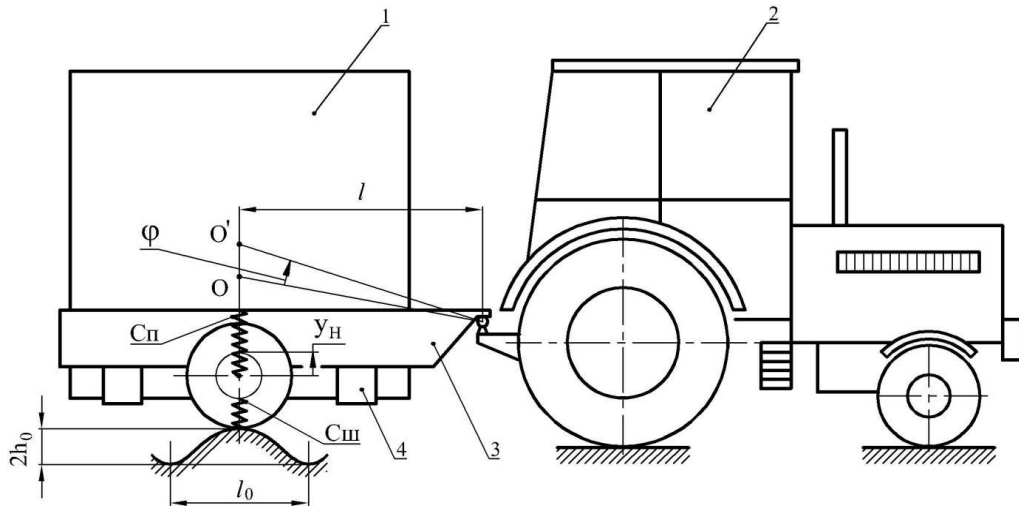
Постановка проблеми. Перспектива розвитку механізації технологічних транспортних операцій у металургійному виробництві тісно пов'язана з залученням нових транспортних засобів, у тому числі нетрадиційних компоновок. Так, для виконання перевезень, пов'язаних з автономним навантаженням, транспортуванням, розвантаженням та складуванням контейнерів ефективним слід вважати технологічний спецавтотранспорт з U-подібною рамою. Для науково обґрунтованого вибору таких несучих конструкцій вирішальну роль відіграють динамічні навантаження, формування яких описується математичною моделлю процесу збуреного руху контейнеровоза в умовах технологічних доріг металургійного виробництва.

Аналіз досліджень та публікацій. У ряді джерел [1, 2] описані автотранспортні засоби для транспортування вантажів у контейнерах та пакетах. Робота [3] цілком присвячена контейнеровозу з U-подібною рамою. Робота [4] висвітлює проблеми вибору типу несучих систем контейнеровозів з U-подібною рамою. Роботи [5-7] присвячені дослідженню динаміки дволанкових систем «тягач-напівпричіп».

Нерозв'язана частина загальної проблеми. Вище згадані наукові праці дають загальне уявлення про контейнерні перевезення, висвітлюють конкретні конструктивні рішення, розкривають методологію динамічних досліджень зчленованих транспортних засобів, але їм не вистачає конкретики, пов'язаної з компоновочними та конструктивними особливостями зчленованої машини з U-подібною рамою при визначенні розрахункових навантажень.

Мета роботи, таким чином, полягає у розробці системної математичної моделі формування динамічних навантажень на несучу конструкцію зчленованого контейнеровоза з U-подібною рамою в умовах технологічних перевезень металургійного виробництва.

Виклад основного матеріалу. Схема зчленованого контейнеровоза з U-подібною рамою подана на рис. 1.



1 – контейнер; 2 – тягач;

3 – напівпричіп з U-подібною рамою; 4 – ложемент

Рисунок 1 – Зчленований контейнеровоз з U-подібною рамою

У якості важливого припущення математичної моделі приймаємо, що точна кріплення напівпричепа до тягача не має вертикальних переміщень. Диференціальні рівняння коливань у збуреному русі отримуємо у формі рівняння Лагранжа другого роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + Q_j^F, \quad (1)$$

де T – кінетична енергія системи, Дж;

Π – потенціальна енергія системи, Дж;

Q_j^F – j -а узагальнена сила неконсервативного походження, Н (Н·м);

q_j – j -а узагальнена координата.

Відповідно розрахунковій схемі приймаємо наступні узагальнені координати: ϕ – кут повороту напівпричепа відносно поперечної осі, яка проходить через точку кріплення, y_H – переміщення невіднесених частин напівпричепа.

Кінетична енергія системи приймає наступний вигляд:

$$T = \frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_n \dot{y}_n^2 + \frac{1}{2} m_c v^2, \quad (2)$$

де I – момент інерції напівпричепа з контейнером відносно поперечної осі, яка проходить через опорну точку, кг·м²;

m_n – маса невідвісаних частин напівпричепа, кг;

m_c – сумарна маса системи «тягач-напівпричіп», кг;

v – швидкість руху системи «тягач-напівпричіп», м/с.

Потенціальна енергія системи приймає наступний вигляд:

$$P = \frac{1}{2} C_{\text{п}} (l\varphi - y_n)^2 + \frac{1}{2} C_{\text{ш}} (y_n - h), \quad (3)$$

де $C_{\text{п}}$ – сумарний коефіцієнт жорсткості пружної підвіски напівпричепа, Н/м;

$C_{\text{ш}}$ – сумарний коефіцієнт жорсткості пневматиків напівпричепа, Н/м;

h – висота профілю нерівностей технологічної дороги під підвіскою напівпричепа, м.

У загальному вигляді можна записати

$$h = h_0 \sin \frac{2\pi x}{l_0}, \quad (4)$$

де h – висота нерівностей, м;

h_0 – амплітудне значення профілю нерівностей, м;

x – абсциса апроксимуючої функції нерівностей, м;

l_0 – довжина сіносоїди, яка апроксимує функцію нерівностей, м.

При русі системи

$$x = vt. \quad (5)$$

З урахуванням виразу (5) підйом коліс напівпричепа дорівнює

$$h = h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t \quad (6)$$

або після введення нового позначення

$$h = h_0 \sin \omega t, \quad (7)$$

де ω – кутова частота кінематичних збурень, 1/с.

Нехтуючи силами неконсервативного походження, підставляємо вирази кінетичної та потенціальної енергій у рівняння Лагранжа другого роду (1), отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} I\ddot{\varphi} + C_{\Pi}l^2\dot{\varphi} - C_{\Pi}ly_{\dot{H}} &= 0, \\ -C_{\Pi}l\ddot{\varphi} + m_H\ddot{y}_H + (C_{\Pi} + C_{\text{Ш}})y_H &= C_{\text{Ш}}h_0 \sin \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Стационарну частину розв'язання системи (8) будемо розшукувати у вигляді

$$\varphi = A_1 \sin \omega t, \quad (9)$$

$$y_H = A_2 \sin \omega t. \quad (10)$$

Підставляючи (9) та (10) у диференціальні рівняння (8), отримуємо наступну систему алгебраїчних рівнянь для визначення амплітуд коливань A_j :

$$\left. \begin{aligned} (C_{\Pi}l^2 - I\omega^2)A_1 - C_{\Pi}lA_2 &= 0, \\ -C_{\Pi}lA_1 + (C_{\Pi} + C_{\text{Ш}} - m_H\omega^2)A_2 &= C_{\text{Ш}}h_0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Далі скористаємось правилом Крамера розв'язання систем алгебраїчних рівнянь, розв'язання системи (11) має наступний вигляд:

$$A_j = \frac{\Delta_j}{D} \quad (j = 1, 2). \quad (12)$$

Тут D – визначник, складений з коефіцієнтів системи (11):

$$D = \begin{vmatrix} C_{\Pi}l^2 - I\omega^2 & -C_{\Pi}l \\ -C_{\Pi}l & C_{\Pi} + C_{\text{Ш}} - m_H\omega^2 \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Розкриваючи визначник (13), отримуємо

$$D = I m_H (\omega^2)^2 - (C_{\Pi} m_H l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I) \omega^2 + C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2. \quad (14)$$

Δ_j – визначник, який отримується з визначника D шляхом заміни j -го стовпчика стовпчиком, складеним з правих частин системи (11).

У такому разі отримуємо:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & -C_{\Pi}l \\ C_{\text{Ш}}h_0 & C_{\Pi} + C_{\text{Ш}} - m_H\omega^2 \end{vmatrix} = C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l h_0, \quad (15)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} C_{\Pi}l^2 - I\omega^2 & 0 \\ -C_{\Pi}l & C_{\text{Ш}}h_0 \end{vmatrix} = (C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2 - C_{\text{Ш}} I \omega^2) h_0. \quad (16)$$

Об'єднуючи вирази (14) – (16), отримуємо розв'язання системи диференціальних рівнянь (11):

$$\varphi = \frac{C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l h_0}{I m_{\text{H}} (\omega^2)^2 - (C_{\Pi} m_{\text{H}} l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I) \omega^2 + C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2}, \quad (17)$$

$$y_{\text{H}} = \frac{(C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2 - C_{\text{Ш}} I \omega^2) h_0}{I m_{\text{H}} (\omega^2)^2 - (C_{\Pi} m_{\text{H}} l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I) \omega^2 + C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2}. \quad (18)$$

З виразів (17) та (18) витікає, що при відсутності кінематичних збурень, тобто при $h_0 = 0$, коливання системи не відбуваються, навантаження контейнеровоза відбувається у квазистатичному режимі. При наявності кінематичних збурень навантаження системи характеризується коефіцієнтом динамічності

$$k_{\partial} = \frac{l\varphi - y_{\text{H}}}{y_{\text{ст}}}, \quad (19)$$

де k_{∂} – коефіцієнт динамічності;

$y_{\text{ст}}$ – статичний прогин пружного елемента підвіски контейнеровоза, м.

Тут узагальнені координати φ та y_{H} визначаються виразами (17) та (18) відповідно.

Якщо порівняти головний визначник (13) або у розкритому вигляді (14) з відповідним частотним визначником вільних коливань системи «тягач-напівпричіп», то неважко збагнути, що вони у точності співпадають при $\omega = p$, де p – власна кругова частота коливань системи. Але у цьому разі визначник обертається в нуль, що свідчить про появу резонансних режимів:

$$I m_{\text{H}} (\omega^2)^2 - (C_{\Pi} m_{\text{H}} l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I) \omega^2 + C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2 = 0. \quad (20)$$

Розв'язуючи бікватратне рівняння (20), а також зважаючи на вираз (6), отримуємо критичні параметри кінематичних збурень з наступного рівняння:

$$\frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} = \frac{C_{\Pi} m_{\text{H}} l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I}{2I m_{\text{H}}} \pm \sqrt{\left(\frac{C_{\Pi} m_{\text{H}} l^2 + C_{\Pi} I + C_{\text{Ш}} I}{2I m_{\text{H}}} \right)^2 - \frac{C_{\Pi} C_{\text{Ш}} l^2}{I m_{\text{H}}}}. \quad (21)$$

Прирівнюємо чисельник виразу (18) нулю:

$$(C_{\text{п}}C_{\text{ш}}l^2 - C_{\text{ш}}I\omega^2)h_0 = 0, \quad (22)$$

звідки отримуємо частоту антирезонансу системи «тягач-напівпричіп»

$$\omega^2 = \frac{C_{\text{п}}l^2}{I}, \quad (23)$$

а також відповідну швидкість

$$v_{\text{ар}} = \frac{ll_0}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\text{п}}}{I}}, \quad (24)$$

де $v_{\text{ар}}$ – швидкість пересування системи «тягач-напівпричіп» у режимі антирезонансу, м/с.

Висновок. Таким чином, розроблена системна математична модель формування динамічних навантажень на несучу конструкцію зчленованого контейнеровоза з U-подібною рамою з залученням математичного апарату аналітичної механіки, що дозволяє свідомо обирати розрахункові випадки навантаження, адекватні динамічні схеми для вибору раціональних за металомісткістю несучих систем контейнеровозів з U-подібною рамою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грифф М.И. Автотранспортные средства с грузоподъемными устройствами для перевозки грузов в контейнерах и пакетах / М.И. Грифф, Р.А. Затван, В.Ф. Трофименко. – М.: Транспорт, 1989. – 159 с.
2. Грушников В.А. Выбор транспортных средств для контейнерной доставки строительных грузов / В.А. Грушников // Промышленный транспорт. – 1987. – №11. – С. 7.
3. Золотарев А.Ф. Контейнеровоз на базе трактора Т-150К / А.Ф. Золотарев, И.А. Тоцкий // Промышленный транспорт. – 1979. – №6. – С.22.
4. Дослідження та вибір типу несучої системи автоскrapовоза з U-подібною рамою / [О.О. Бейгул, М.М. Корнійчук, Г.Л. Лепетова, Д.В. Найда] // Надійність металургійного обладнання. Зб. наук. праць за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції, 28–31 жовтня 2013р. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2013. – С. 138–141.
5. Бейгул В.О. Математична модель збуреного руху системи «буксировщик-автосамоскид»/ В.О. Бейгул, І.І. Лєєпа, Г.Л. Лепетова // Системні технології. – Дніпропетровськ: ДНВП «Системні технології», 2006. – Вип. 4(45). – С. 94–98.
6. Веселов Г.П. Аналитическое исследование колебаний системы тягач-прицеп / Г.П. Веселов, А.Н. Густомясов, В.И. Колмаков // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – №5. – С. 92–97.
7. Лобас Л.Г. Динамическое поведение двухзвенного автопоезда вблизи границы области устойчивости / Л.Г. Лобас, Ю.Л. Ващенко // Прикладная механика. – 1991. – Т.27. – №12. – С. 85–91.

В.Є. Білозьоров, О.С. Мищенко

ПРО ГОМОКЛІНІЧНІ ОРБИТИ ДВОВИМІРНИХ АВТОНОМНИХ КВАДРАТИЧНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Анотація. Представленні нові умови існування гомоклінічних орбіт для широкого класу двовимірних автономних квадратичних динамічних систем.

Ключові слова: гомоклінічна орбіта, лінійне перетворення, точка рівноваги, сідло, граничний цикл, фокус, стійкий вузол.

Вступ

Протягом багатьох десятиліть хаотична поведінка динамічних систем залишається в центрі уваги математиків, фізиків та інженерів. Існують сотні публікацій, в яких у різних формах обмірковується та досліджується це явища [1] - [4]. Слід зазначити, що однією з причин виникнення хаосу у тривимірних динамічних системах є існування в цих системах гомоклінічних орбіт.

Постановка задачі

Очевидно, що присутність гомоклінічної траєкторії у тривимірній системі гарантує, що буде існувати та ж сама орбіта в будь-якій проекції цієї системи на будь-яку координатну площину. У зв'язку з цим в статті розглядаються достатні умови існування гомоклінічних орбіт у двовимірних квадратичних системах. В майбутньому ці умови будуть використовуватися для пошуку гомоклінічних орбіт у тривимірних квадратичних системах.

Основна частина

Розглянемо двовимірну систему автономних квадратичних диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + b_{11}x^2(t) + 2b_{12}x(t)y(t) + b_{22}y^2(t) \\ \dot{y}(t) = a_{21}x(t) + a_{22}y(t) + c_{11}x^2(t) + 2c_{12}x(t)y(t) + c_{22}y^2(t) \end{cases} \quad (1)$$

у якій $a_{11}, \dots, a_{22}, b_{11}, \dots, b_{22}, c_{11}, \dots, c_{22}$ дійсні числа.

Нагадаємо, що обмежена траєкторія системи (1) називається гомоклінічною орбітою, якщо траєкторія збігається до однієї і тієї ж точки рівноваги при $t \rightarrow \pm\infty$ [3].

Введемо наступні дійсні (2×2) - матриці

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, T_1 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ c_{11} & c_{12} \end{pmatrix}, T_2 = \begin{pmatrix} b_{12} & b_{22} \\ c_{12} & c_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Замінімо змінні x, y у системі (1) на нові змінні x_1, y_1 за формулою:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow S \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix},$$

у якій S - лінійне перетворення з групи $GL(2, R)$ всіх лінійних зворотних перетворень простору R^2 [2,5]. В цьому випадку трійка матриць (A, T_1, T_2) трансформується у трійку вигляду $S \circ (A, T_1, T_2) = (S^{-1}AS, (S^{-1}T_1, S^{-1}T_2) \cdot (S \otimes S))$.

Слід пам'ятати, що скалярний многочлен $f(A, T_1, T_2)$ називається інваріантом ваги l у групі $GL(2, R)$, якщо $\forall S \in GL(2, R)$ та $\forall (A, T_1, T_2)$ $f(S \circ (A, T_1, T_2)) = (\det S)^l \cdot f(A, T_1, T_2)$, де $l \geq 0$ деяке ціле число [2,5].

За допомогою матриць T_1, T_2 , побудуємо допоміжну незалежну від елементів матриці A систему інваріантів

$$I_1 = \det \begin{pmatrix} (trT_1, trT_2) \cdot T_1 \\ (trT_1, trT_2) \cdot T_2 \end{pmatrix}, J_2 = \det (T_1T_2 - T_2T_1),$$

$$K_3 = \det \begin{pmatrix} trT_1, trT_2 \\ (trT_1, trT_2) \cdot (T_1T_2 - T_2T_1) \end{pmatrix},$$

ваги 2[2]; де trP - слід квадратної матриці P .

Тепер ми можемо ввести основні інваріанти

$$L = I_1 - J_2 - K_3, D = I_1 + 27J_2 - 5K_3 \quad (3)$$

ваги 2[2].

Умови існування гомоклінічних орбіт у системі (1)

Лема 1. Нехай $L = 0$ та $J_2 \neq 0$. Тоді існує лінійне обернене перетворення $x \rightarrow s_{11}x + s_{12}y$, $y \rightarrow s_{21}x + s_{22}y$ ($s_{11}s_{22} - s_{21}s_{12} \neq 0$) таке, що у нових змінних система (1) приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + 2b_{12}x(t)y(t) + b_{22}y^2(t) \\ \dot{y}(t) = a_{21}x(t) + a_{22}y(t) + 2c_{12}x(t)y(t) + c_{22}y^2(t) \end{cases} \quad (4)$$

(З метою подальшого спрощення, ми залишили в системі (4) позначення, прийняті в системі (1). Ми діятимемо таким чином і в подальших міркуваннях.)

Доведення. Якщо $b_{11} = c_{11} = 0$ (or $b_{22} = c_{22} = 0$), тоді Лема 1 доведена. Тому, ми припускаємо, що в системі (1) $b_{11} \neq 0$ та $b_{22} \neq 0$. Тоді за допомогою відповідного лінійного перетворення $S \in GL(2, R)$ [2] система (1) може бути перетворена у систему:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + b_{11}x^2(t) + b_{22}y^2(t) \\ \dot{y}(t) = a_{21}x(t) + a_{22}y(t) + 2c_{12}x(t)y(t) + c_{22}y^2(t) \end{cases} \quad (5)$$

Далі, для системи (5) ми маємо:

$$I_1 = (b_{11} + c_{12})^2 b_{11} b_{22} + (b_{11} + c_{12}) b_{11} c_{22}^2 - c_{12}^2 c_{22}^2,$$

$$J_2 = c_{12} b_{22} (c_{12} - b_{11})^2 \neq 0,$$

$$K_3 = (b_{11} + c_{12})^2 (b_{11} b_{22} - b_{22} c_{12}) - c_{22}^2 (c_{12}^2 - b_{11} c_{12})$$

та

$$L = b_{11} (4b_{22} c_{12}^2 + b_{11} c_{22}^2).$$

Нехай $L = 0$. Якщо $b_{11} = 0$, тоді доведення завершено; якщо $b_{11} \neq 0$, тоді ми маємо, що $4b_{22} c_{12}^2 + b_{11} c_{22}^2 = 0$.

Введемо в систему (5) нові змінні за формулою

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}.$$

Тоді ми отримаємо

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \dots + b_{11}x^2 + b_{22}(kx + y)^2 \\ \dot{y}(t) = \dots - b_{11}kx^2 - b_{22}k(kx + y)^2 + 2c_{12}x(kx + y) + c_{22}(kx + y)^2 \end{cases} \quad (6)$$

Для того, щоб знищити член x^2 у першому рівнянні системи (6), необхідно покласти $k^2 = -b_{11}/b_{22}$. Для реалізації подібної процедури у другому рівнянні системи (6), умова, що

$$k^2 = \left(-\frac{2c_{12}}{c_{22}} \right)^2 = -\frac{b_{11}}{b_{22}},$$

повинна виконуватися. Ця умова має вигляд $4b_{22}c_{12}^2 + b_{11}c_{22}^2 = 0$.

Таким чином система (5) може бути перетворена у вигляд системи (4).

Лема 2. Нехай $\det A < 0$ та $J_2 < 0$. Тоді система (4) має 3 положення рівноваги: $O = (0,0), O_1 = (p_{1x}, p_{1y} > 0), O_2 = (p_{2x}, p_{2y} < 0)$.

Доведення. Положення рівноваги системи (4) можуть бути визначені з системи

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y + 2b_{12}xy + b_{22}y^2 = 0 \\ a_{21}x + a_{22}y + 2c_{12}xy + c_{22}y^2 = 0 \end{cases}$$

Звідси слідує, що

$$x = -y \frac{a_{22} + c_{22}y}{a_{21} + 2c_{12}y},$$

та

$$2(b_{22}c_{12} - b_{12}c_{22})y^2 - (2b_{12}a_{22} + a_{11}c_{22} - 2c_{12}a_{12} - b_{22}a_{21})y - \det A = 0.$$

Таким чином маємо

$$y_{1,2} = \frac{c_{12}^2(2b_{12}a_{22} + a_{11}c_{22} - 2c_{12}a_{12} - b_{22}a_{21}) \pm \sqrt{\Delta}}{4J_2},$$

$$\text{де } \Delta = c_{12}^4(2b_{12}a_{22} + a_{11}c_{22} - 2c_{12}a_{12} - b_{22}a_{21})^2 + 8c_{12}^2(\det A) \cdot J_2.$$

З умов Лема 2 маємо, що $\det A < 0$ та $J_2 = c_{12}^2(b_{22}c_{12} - b_{12}c_{22}) < 0$.

Звідси випливає, що $b_{22}c_{12} - b_{12}c_{22} < 0$ та $\Delta > 0$. Отже,

$$\sqrt{\Delta} > c_{12}^2 |2b_{12}a_{22} + a_{11}c_{22} - 2c_{12}a_{12} - b_{22}a_{21}|.$$

Наслідком цього маємо $y_1 = p_{1y} > 0$ і $y_2 = p_{2y} < 0$. Доведення завершено.

З Лема 2 випливає, що точка $O_1(O_2)$ розташована у верхній (нижній) напівплощині.

Тепер вкажемо декілька ознак, які свідчать про можливе існування гомоклінічної орбіти в системі (4).

Для існування гомоклінічної орбіти (це петля сепаратриси) у точці рівноваги O необхідно, щоб ця точка була сідлом. Це досягається за допомогою нерівності $\det A < 0$. Крім того, існування петлі сепаратриси у системі (4) можливо лише за умови $D < 0$ [2].

Припустимо, що існує єдиний стійкий граничний цикл навколо точки O_1 в системі (4). Тоді ця точка повинна бути нестійким фокусом. Крім того, ця точка може бути стійким фокусом. Тоді стійкий граничний цикл навколо точки O_1 існувати не буде. Точка O_1 розташована у верхній напівплощині.

Нехай $a_{12} = 0$. Тоді з умови $y(0) > 0$ слідує, що $\forall t > 0 \ y(t) > 0$ [2]. В цьому випадку система (4) може містити лише граничний цикл у верхній напівплощині і не мати гомоклінічної орбіти.

Припустимо, що при зміні параметрів в системі (4) граничний цикл втрачає стійкість і траєкторія відділяється від цього циклу та прагне до точки рівноваги O_2 (граничний цикл не існує навколо точки O_2). Тоді ця точка повинна бути стійким вузлом чи стійким фокусом. Вона розташовується у нижній напівплощині.

Розглянемо іншу заміну змінних

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & r \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}$$

в системі (4). Що стосується системи (4), то $J_2 = c_{12}^3 b_{22} \neq 0$, тоді $c_{12} \neq 0$ і система (4) може бути перетворена у систему вигляду

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + b_{22}y^2(t) \\ \dot{y}(t) = a_{21}x(t) + a_{22}y(t) + 2c_{12}x(t)y(t) + c_{22}y^2(t) \end{cases} \quad (8)$$

Крім того, можна вважати, що в системі (8) $b_{22} > 0$ та $c_{12} < 0$. (Відзначимо, що при умові $J_2 < 0$, за допомогою заміни $x \rightarrow -x$, можна легко прийти до умов $b_{22} > 0$ та $c_{12} < 0$.)

Нарешті, якщо замінити змінні за формулами $x \rightarrow -x/(2c_{12}), y \rightarrow -y/\sqrt{-2c_{12}b_{22}}$, тоді система (4) при $D < 0$ може бути перетворення у систему вигляду

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = a_{11}x(t) + a_{12}y(t) + y^2(t) \\ \dot{y}(t) = a_{21}x(t) + a_{22}y(t) - x(t)y(t) + cy^2(t), |c| < 2. \end{cases} \quad (9)$$

Тепер ми можемо скористатися наступним відомим результатом.

Теорема 1 [6]. Нехай $a_{11} < 0$. Тоді всі траєкторії квадратичної системи (9) обмежені для $t \geq 0$.

Теорема 2. Припустимо, що для системи (8) виконуються наступні умови

$$a_{11} < 0, a_{21} < 0, \det A < 0, D < 0.$$

Тоді існує набір параметрів $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, c$ таких, що систем (8) має гомоклінічну орбіту в точці O .

Доведення. Вище було показано, як за допомогою відповідних лінійних перетворень з системи (4) можна отримати систему (9).

Відзначимо, що з системи (9) і (8) маємо $b_{22} = 1, 2c_{12} = -1$. Для системи (8) $D = 4c_{12}^2(c_{22}^2 + 8c_{12}b_{22}) = c^2 - 4$. Отже, з умови $D < 0$ слідує, що $J_2 = c_{12}^3 b_{22} < 0$; тоді $b_{22} > 0, c_{12} < 0$ та $|c| < 2$. Таким чином, умови $a_{11} < 0, D < 0$ гарантують обмеженість усіх розв'язків системи (8).

Нехай у системі (8) для спрощення $a_{12} = a_{21} = c = 0$. Припустимо, що деяка траєкторія S системи (8), що починається з точки поблизу точки O вздовж багатостатності $T^u(O)$, яке є дотичним до нестійкої багатостатності $M^u(O)$. В силу умови $\det A < 0$, маємо, що $a_{22} > 0$. Таким чином, $T^u(O)$ збігається з віссю OY .

З пунктів (а) - (в) слідує, що будь-яка траєкторія, яка починається у першому ортанті не залишить цей ортант. Для того, щоб деяка траєкторія, що починається у першому ортанті, залишила цей ортант чи наблизилась до точки O необхідно, щоб поблизу з

цією точкою ми мали у першому ортанті $\dot{x}(t) < 0, \dot{y}(t) < 0$. Отже, умови $a_{11} < 0, a_{12} < 0$ повинні бути виконані.

Нарешті, пункт (г) показує, що умова $a_{21} < 0$ дозволяє регулювати величину нахилу дотичної багатостатності $T^s(O)$ стійкої багатостатності $M^s(O)$ точки O до вісі OX , так що $S \cap M^s(O) \neq \emptyset$. Це означає існування гомоклінічної орбіти у точці O .

Розглянемо систему (9) при $c = 0, a_{12} = 0, a_{11} = -2, a_{22} = 3$

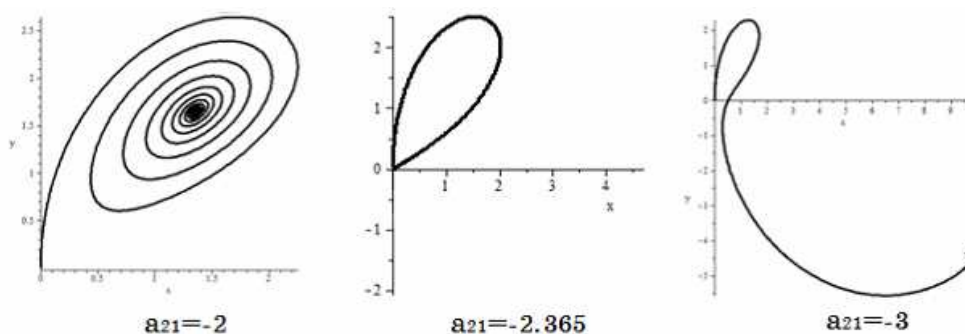


Рисунок 1 - Еволюція траєкторії системи (9) залежно від зміни параметру a_{21}

Висновки

В статті були представлені достатні умови існування гомоклінічних орбіт для широкого класу двовимірних автономних квадратичних динамічних систем. В майбутньому ці умови можуть бути використані для пошуку гомоклінічних орбіт у тривимірних квадратичних системах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhou T., Ghen G. Classification of chaos in 3-D autonomous quadratic systems – 1. Basic framework and methods // International Journal Bifurcation and Chaos, 2006, Vol. 16, 2459-2479.
2. Belozyorov V. Ye. Invariant Approach to an Existence Problem of Nontrivial Asymptotic Stability Cone // Canadian Applied Mathematics Quarterly, 2007, Vol. 15, 125-168.
3. Belozyorov V. Ye. On existence of homoclinic orbits for some types of autonomous quadratic systems differential equations // Applied Mathematics and Computation, 2011, Vol. 217, 4582-4595.
4. Belozyorov V. Ye. General method of construction of implicit discrete maps generating chaos in 3D quadratic systems differential equations // International Journal Bifurcation and Chaos, 2014, Vol. 24, 1450025.
5. Boularas D. A New Classification of Bivariate Homogeneous Quadratic Systems // Qualitative Theory of Dynamical Systems, 2011, Vol. 2, 93-110.
6. Dickson R. J., Perko L. M.. Bounded Quadratic Systems in the Plane // Journal of Differential Equations, 1970, Vol. 7, 251-273.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ КАЧКИ

Проведено построение дискретной математической модели процесса измерения уровня жидкого топлива в баках ракеты при проведении дозирования в условиях наличия периодических возмущений, возникающих вследствие качания стартовой платформы с установленной на ней ракетой-носителем под воздействием морских волн.

Ключевые слова: ракета-носитель, уровнемер, система контроля заправки.

Введение

Одной из основных технологических операций при проведении предстартовой подготовки ракеты-носителя (РН) к пуску является заправка баков ракеты компонентами ракетного топлива (КРТ). В ходе заправки должна быть обеспечена подача в каждый бак РН строго заданного количества соответствующего топлива. Измерение текущего уровня топлива на борту РН и формирование сигналов на управление процессом заправки производит специальная система дозирования, которая чаще всего носит название «система контроля заправки» (СКЗ). В состав системы входят датчики уровня (ДУ), установленные непосредственно в баках ракеты, а также наземная аппаратура. Точность показаний системы дозирования в целом определяет погрешность заправки баков, и ее снижение приводит к ухудшению энергетических характеристик ракеты [1]. Поэтому погрешность СКЗ является одним из основных параметров системы дозирования, а ее уменьшение является постоянной задачей разработчиков системы.

Одним из эффективных способов снижения погрешности заправки является обработка информации от бортовых измерителей уровня жидкого топлива вычислительными средствами наземной аппаратуры, в частности, выполнение фильтрации сигнала в цифровом виде. Для выбора подходящего метода обработки сигналов, определения оптимальных параметров фильтра, отладки и тестирования кон-

кретных алгоритмов разработчикам системы необходимо иметь в своем распоряжении имитационную модель объекта наблюдения, адекватно отображающую процесс формирования сигнала СКЗ, несущего информацию об уровне топлива в баке. Особую роль модель объекта наблюдения играет в случае применения для цифровой обработки сигнала ДУ СКЗ рекуррентного дискретного фильтра Калмана. В этом случае модель объекта становится составной частью фильтра и от правильного построения этой модели зависит достоверность получаемого результата.

В представленной работе производится построение дискретной математической модели процесса измерения средствами СКЗ уровня жидкого топлива в баках РН. Модель охватывает случай проведения заправки по показаниям дискретного датчика уровня в условиях наличия периодических колебаний поверхности жидкости в баках ракеты-носителя, возникающих вследствие качки стартовой платформы (СП) с установленной на ней ракетой-носителем под воздействием морских волн. Данный случай соответствует заправке РН «Зенит» космического ракетного комплекса «Морской старт». Подобная модель рассматривается впервые.

Общая структура модели

Датчик уровня СКЗ находится в верхней части бака [2]. Ракетный бак обычно имеет сложную форму (вплоть до тороидальной), по оси бака устанавливаются обязательные элементы конструкции, вследствие чего датчик СКЗ оказывается смещен от продольной оси, иногда на расстояние до полутора метров. В результате этого на показаниях датчика в значительной мере сказываются колебания, развивающиеся на поверхности жидкости как вследствие ветровых воздействий на корпус ракеты, так и вследствие периодического изменения положения опор РН. Для защиты уровнемера от нежелательного воздействия колебаний жидкости поплавков и трубу с чувствительными элементами (ЧЭ) помещают в гидроуспокоитель (ГУ), состоящий из кожуха и ячеек (рис. 1). Жидкость вовнутрь кожуха поступает через ячейки ГУ, которые гидравлически отфильтровывают быстроменяющуюся составляющую. Вместо ячеек в некоторых случаях используют трубы. Гидроуспокоитель является достаточно эффективным средством уменьшения амплитуды колебаний, частота которых составляет 0,8 – 1,0 Гц. Такую частоту имеют колебания, возникающие на по-

верхности жидкости внутри бака вследствие воздействия ветра на корпус РН. Однако, в случае наличия квазистатических колебаний, период которых составляет 10 – 15 сек, эффективность гашения колебаний гидроуспокоителем существенно снижается. Такого рода колебания представляют собой отклонение поверхности жидкости от номинального положения (перпендикулярного продольной оси бака), когда ось ракеты отклоняется от вертикали. Подобные условия эксплуатации характерны для космического ракетного комплекса «Морской старт» и являются следствием качки стартовой платформы, на которой установлена ракета-носитель, под воздействием морских волн. В дальнейшем, при построении модели, рассматриваются исключительно квазистатические колебания, которые слабо поддаются фильтрации в гидроуспокоителе, и именно поэтому возникает необходимость в применении дополнительных, алгоритмической средств обработки сигналов.

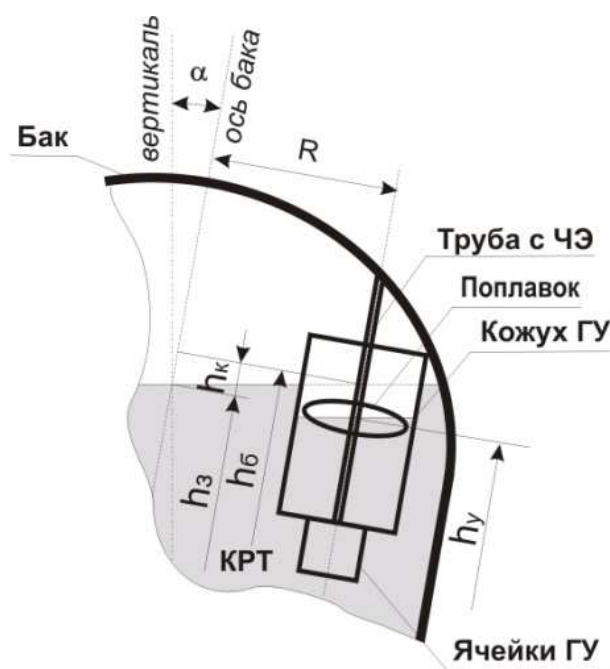


Рисунок 1 – Расположение датчика и принятое обозначение величин

Функциональная схема, отображающая процесс наполнения и формирования сигнала от датчика уровня, может быть представлена следующим образом (рис. 2).

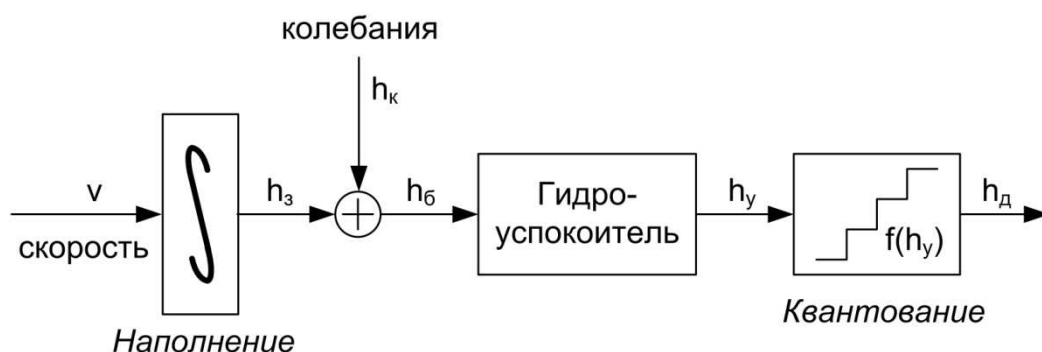


Рисунок 2 – Процесс наполнения бака и формирования сигнала

На схеме применены следующие обозначения, иллюстрируемые рис. 1.

v – линейная скорость наполнения бака жидким топливом при заправке ($v = \frac{Q}{S_{\delta}}$, где Q – объемный расход, S_{δ} – площадь поперечного сечения бака), h_z – текущий уровень, до которого заполнен бак; отсчитывается вдоль продольной оси бака, h_k – колебания поверхности жидкости, h_b – мгновенное значение уровня КТ внутри бака в месте установки датчика СКЗ, отсчитываемое вдоль продольной оси, h_y – мгновенное значение уровня КТ внутри кожуха гидроуспокоителя, отсчитываемое вдоль продольной оси бака, h_d – измеренное значение уровня КТ датчиком СКЗ, получаемое путем квантования по уровню $h_d = f(h_y)$.

Звенья системы

Отдельные звенья системы в пространстве состояний описываются следующим образом.

Интегрирующее звено

Процесс наполнения представляется интегрирующим звеном, которое в пространстве состояний описывается такими уравнениями состояния и выхода:

$$x_{1k} = x_{1k-1} + u_{1k-1} \quad y_{1k} = \Delta t x_{1k} + \frac{\Delta t}{2} u_{1k} \quad (1)$$

Здесь и далее:

x – переменная состояния, u – входная величина (в данном случае u_1 соответствует v), y – выходная величина (в данном случае y_1 соответствует h_3), Δt – период дискретизации.

Гидроуспокоитель

Процесс поступления жидкости в гидроуспокоитель может быть описан аperiodическим звеном первого порядка, для которого уравнения состояния и выхода имеют вид:

$$x_{1k} = \frac{T_y - \frac{\Delta t}{2}}{T_y + \frac{\Delta t}{2}} x_{1k-1} + u_{1k-1} \quad y_{1k} = \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{1k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot (T_y + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k} \quad (2)$$

В данном случае u_1 соответствует h_6 , а y_1 соответствует h_y .

T_y – постоянная времени гидроуспокоителя.

Квантование по уровню

Датчики, применяемые для измерения уровня в СКЗ, могут быть как непрерывного, так и дискретного типа [3]. Будем рассматривать более сложный случай, а именно – применение датчика дискретного типа. Квантование сигнала по уровню в дискретном датчике уровня можно представить формулой:

$$y_{1k} = \left[\frac{u_{1k} - h_0}{\Delta h} + \frac{1}{2} \right] + h_0, \quad (3)$$

где u_1 соответствует h_y , h_0 – высота уровня начала отсчета датчика СКЗ, отсчитываемая вдоль продольной оси бака, Δh – шаг дискретизации.

Формирующие фильтры

Объединив уравнения (1), (2) и (3) в единую систему путем последовательной подстановки выходных величин y вместо входных воздействий u , можно получить дискретную модель в пространстве состояний, которая будет имеет один выход h_d – измеренное значение уровня КТ датчиком СКЗ, а также два входа: v – скорость наполнения бака и h_k – колебания поверхности жидкости. Для имитации процесса заправки на соответствующие входы необходимо подавать тестовые сигналы в виде определенной программы изменения объемного расхода и некоторого периодического воздействия (например, синусоидального с заданной частотой и амплитудой), а по выходному

сигналу h_0 имитировать выдачу команды на прекращение заправки. На основе сравнения заданного уровня заправки с реализованным «по окончании заправки» значением h_y , можно получить численную оценку величины той составляющей суммарной погрешности СКЗ, которая связана с наличием квазистатических колебаний жидкости в баке.

Для достижения большей степени соответствия процесса моделирования действительному процессу, наблюдаемому при проведении заправки, важно использовать в качестве входных воздействий не детерминированные сигналы, а стохастические, которые по своим статистическим характеристикам соответствовали бы реальным воздействиям на систему. Для перехода к модели, которая позволяет имитировать требуемые стохастические входные сигналы, в ее состав должны быть введены соответствующие формирующие фильтры (ФФ), на входы которых должен подаваться дискретный белый гауссовский шум.

Модель объекта наблюдения, построенная таким образом, является основой рекуррентного дискретного фильтра Калмана, который может быть использован для алгоритмической обработки цифровых сигналов от датчиков СКЗ в целях повышения точности заправки.

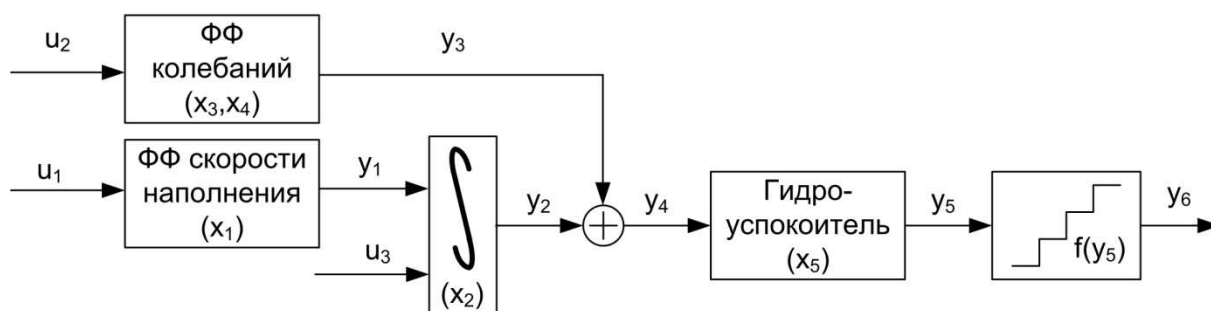


Рисунок 3 – Структура модели

Структура модели представлена на рис. 3. В представленной структуре в дополнение к сигналу y_1 , генерируемому формирующим фильтром для скорости наполнения, введен еще один вход, на который может подаваться некоторый детерминированный сигнал u_3 . Это может быть, например, сигнал постоянной скорости наполнения бака или сигнал, соответствующий изменяющемуся по некоторой заданной программе объемному расходу заправки.

Формирующий фильтр для скорости наполнения

Построение формирующего фильтра для имитации сигнала скорости наполнения бака проведем в соответствии с [4]. В качестве модели имитируемого сигнала рассматриваем случайный стационарный процесс с корреляционной функцией экспоненциального вида:

$$K(\tau) = D_c e^{-\frac{|\tau|}{T_a}}, \quad (4)$$

где D_c – дисперсия скорости наполнения, T_a – постоянная времени затухания в корреляционной функции, τ – время.

Спектральная плотность такого сигнала:

$$S(\omega) = \frac{2T_a D_c}{1 + \omega^2 T_a^2} = \frac{2T_a D_c}{|1 + j\omega T_a|^2} \quad (5)$$

Это означает, что формирующий фильтр для моделирования данного сигнала должен иметь передаточную функцию:

$$H(p) = \frac{1}{1 + T_a p}, \quad (6)$$

на вход которого должен подаваться непрерывный белый гауссовский шум со спектральной плотностью $N = 2T_a D_c$.

Дискретную передаточную функцию формирующего фильтра получаем путем замены оператора интегрирования $\frac{1}{p} \rightarrow \frac{\Delta t}{2} \frac{1 + z^{-1}}{1 - z^{-1}}$:

$$H(z) = \frac{\Delta t}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})} \cdot \frac{1 + z^{-1}}{1 - \frac{T_a - \frac{\Delta t}{2}}{T_a + \frac{\Delta t}{2}} z^{-1}} \quad (7)$$

Соответственно, на вход дискретного ФФ должен подаваться дискретный белый гауссовский шум с дисперсией $D_{бшс} = \frac{2T_a D_c}{\Delta t}$. В пространстве состояний ФФ для имитации сигнала скорости наполнения бака описывается уравнениями:

$$x_{1k} = \frac{T_a - \frac{\Delta t}{2}}{T_a + \frac{\Delta t}{2}} x_{1k-1} + u_{1k-1} \quad y_{1k} = \frac{T_a \Delta t}{(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{1k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot (T_a + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k} \quad (8)$$

u_1 – сигнал дискретного белого шума, возбуждающего формирующий фильтр.

Формирующий фильтр для колебаний поверхности

Построение формирующего фильтра для имитации колебаний поверхности жидкости также проведем в соответствии с [4]. В качестве модели колебаний принимаем дискретный случайный стационарный процесс так называемой «нерегулярной качки», который характеризуется корреляционной функцией вида:

$$K(m) = D_k e^{-\mu \Delta t |m|} (\cos \beta \Delta t m + \frac{\mu}{\beta} \sin \beta \Delta t |m|), \quad (9)$$

где D_k – дисперсия колебаний, μ – коэффициент нерегулярности, β – преобладающая частота, m – количество шагов дискретизации между двумя импульсами сигнала.

Спектральная плотность такого дискретного сигнала в терминах псевдочастоты λ :

$$S(\lambda) = \frac{2aD_k(1 + \frac{\lambda^2 \Delta t^2}{4})}{\Delta t |1 + aj\lambda + b(j\lambda)^2|^2}, \quad \text{где } a = \frac{2\mu}{\mu^2 + \beta^2}, \quad b = \frac{1}{\mu^2 + \beta^2}, \quad (10)$$

Следовательно, частотная передаточная функция формирующего фильтра должна иметь вид:

$$H(j\lambda) = \frac{1 + \frac{\Delta t}{2} j\lambda}{1 + aj\lambda + b(j\lambda)^2}, \quad (11)$$

на вход которого должен подаваться дискретный белый гауссовский шум с дисперсией $D_{\text{бшк}} = \frac{2aD_k}{\Delta t}$. Дисперсия D_k линейных перемещений поверхности жидкости в месте расположения датчика уровня СКЗ определяется следующим образом:

$$D_k = RD_\alpha, \quad (12)$$

где D_α – дисперсия угла наклона РН α (рис. 1) в направлении на датчик, R – расстояние от продольной оси бака до датчика.

Статистические характеристики величин колебаний стартовой платформы и соответствующих углов наклона РН задаются при проектировании или же определяются экспериментально.

Руководствуясь методикой, представленной в [4], путем подстановки $j\lambda = \frac{2}{\Delta t} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$ от частотной передаточной функции (11) переходим к дискретной передаточной функции $\Phi\Phi$ для колебаний:

$$H(z) = \frac{\frac{2}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}} z^{-1} + \frac{2}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}} z^{-2}}{1 + \frac{2 - \frac{8b}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}} z^{-1} + \frac{1 - \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}}{1 + \frac{2a}{\Delta t} + \frac{4b}{\Delta t^2}} z^{-2}} \quad (13)$$

После ввода очевидных обозначений и сокращения записи:

$$H(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (14)$$

Переходя к описанию фильтра в пространстве состояний, получаем следующие уравнения:

$$\begin{cases} x_{1k} = x_{2k-1} \\ x_{2k} = -a_2 x_{1k-1} - a_1 x_{2k-1} + u_{1k-1} \\ y_{1k} = b_2 x_{1k} + b_1 x_{2k} \end{cases}, \quad (15)$$

где u_{1k} – дискретный белый гауссовский шум с дисперсией $D_{\text{бшк}}$ на входе формирующего фильтра для колебаний.

Интеграция модели

Проведем объединение полученных моделей отдельных звеньев объекта в единую модель. При этом будем использовать обозначения переменных состояния, входных и выходных величин в соответствии с рис.3. Получаем следующий набор уравнений.

формирующий фильтр для скорости наполнения

$$x_{1k} = \frac{T_a - \frac{\Delta t}{2}}{T_a + \frac{\Delta t}{2}} x_{1k-1} + u_{1k-1} \quad y_{1k} = \frac{T_a \Delta t}{(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{1k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot (T_a + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k} \quad (16)$$

интегрирующее звено

$$x_{2k} = x_{2k-1} + y_{1k-1} + u_{3k-1} \quad y_{2k} = \Delta t x_{2k} + \frac{\Delta t}{2} (y_{1k} + u_{3k}) \quad (17)$$

формирующий фильтр для колебаний

$$\begin{cases} x_{3k} = x_{4k-1} \\ x_{4k} = -a_2 x_{3k-1} - a_1 x_{4k-1} + u_{2k-1} \\ y_{3k} = b_2 x_{3k} + b_1 x_{4k} \end{cases}, \quad (18)$$

суммирование

$$y_{4k} = y_{2k} + y_{3k} \quad (19)$$

гидроуспокоитель

$$x_{5k} = \frac{T_y - \frac{\Delta t}{2}}{T_y + \frac{\Delta t}{2}} x_{5k-1} + y_{4k-1} \quad y_{5k} = \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{5k} + \frac{\Delta t}{2 \cdot (T_y + \frac{\Delta t}{2})} y_{4k} \quad (20)$$

квантование по уровню

$$y_{6k} = \left[\frac{y_{5k} - h_0}{\Delta h} + \frac{1}{2} \right] + h_0 \quad (21)$$

Исключив из уравнений, описывающих объект в пространстве состояний, переменные y_i путем подстановки их величин, выраженных в уравнениях выхода через x_i и u_i , приходим к системе уравнений в переменных состояния вида (22).

В матричном виде линейное уравнение объекта наблюдения в пространстве состояний записывается как $\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1}$. Матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} определяются системой уравнений (22). Уравнение выхода для объекта наблюдения с дискретным датчиком уровня СКЗ выражается формулой (21).

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{1k} = \frac{T_a - \frac{\Delta t}{2}}{T_a + \frac{\Delta t}{2}} x_{1k-1} + u_{1k-1} \\ x_{2k} = \frac{T_a \Delta t}{(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{1k-1} + x_{2k-1} + \frac{\Delta t}{2 \cdot (T_a + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k-1} \\ x_{3k} = x_{4k-1} \\ x_{4k} = -a_2 x_{3k-1} - a_1 x_{4k-1} + u_{2k-1} \\ x_{5k} = \frac{T_a \Delta t^2}{2(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{1k-1} + \Delta t x_{2k-1} + b_2 x_{3k-1} + b_1 x_{4k-1} + \\ + \frac{T_y - \frac{\Delta t}{2}}{T_y + \frac{\Delta t}{2}} x_{5k-1} + \frac{\Delta t^2}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k-1} + \frac{\Delta t}{2} u_{3k-1} \end{array} \right. \quad (22)$$

В этом случае выходной величиной y для системы является переменная y_6 , то есть $y = y_6$, а переменная y_5 , входящая в выражение (21), определяется соотношением:

$$\begin{aligned}
y_{5k} = & \frac{T_a \Delta t^3}{4(T_a + \frac{\Delta t}{2})^2 (T_y + \frac{\Delta t}{2})} x_{1k} + \frac{\Delta t^2}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} x_{2k} + \frac{b_2 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} x_{3k} + \frac{b_1 \Delta t}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} x_{4k} + \\
& + \frac{T_y \Delta t}{(T_y + \frac{\Delta t}{2})^2} x_{5k} + \frac{\Delta t^3}{8(T_a + \frac{\Delta t}{2})(T_y + \frac{\Delta t}{2})} u_{1k} + \frac{\Delta t^2}{2(T_y + \frac{\Delta t}{2})} u_{3k}
\end{aligned} \quad (23)$$

Если же система контроля заправки оснащена непрерывным датчиком уровня, то в этом случае выходная величина $y = y_5$. В линейном виде матричное уравнение выхода можно представить только для случая использования в СКЗ непрерывного датчика уровня: $y_k = Cx_k + Du_k$. Матрицы C и D находятся по выражению (23). Вектор y_k в рассматриваемой задаче представляет собой скаляр.

Выводы

Проведенные теоретические исследования, основные аспекты которых рассмотрены в настоящей статье, в качестве результата имеют следующее:

1. Построена модель объекта наблюдения, описывающая процесс наполнения бака и формирования сигнала от датчика уровня СКЗ в условиях наличия периодических колебаний поверхности жидкости в баках ракеты, которые возникают вследствие качки стартовой платформы с установленной на ней ракетой-носителем под воздействием морских волн.

2. Полученная модель может служить инструментом для имитации сигналов СКЗ в целях оценки величины случайной погрешности заправки топливных баков ракеты-носителя при действии наиболее значимых возмущений: качки стартовой платформы и вариации расхода заправки.

3. Дискретная модель в варианте непрерывного измерения может быть положена в основу рекуррентного фильтра Калмана, применение которого позволяет снизить погрешность заправки и повысить энергетические характеристики ракеты-носителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазуренко В.Б. Повышение энергетических характеристик ракет-носителей методом модификации критерия полноты использования объема топливных баков // Вісник Дніпропетровського університету. Серія "Ракетно-космічна техніка". – 2013. – Вип. 16. – С.61–68.

2. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / [В.Н. Челомей, Д.А. Полухин, Н.Н. Миркин и др.] ; под ред. В.Н. Челомея – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Мазуренко В.Б. Обзор применяемых методов измерения уровня жидкого топлива в баках нижних ступеней ракет-носителей // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – Дніпропетровськ.: Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, 2013 – Т. XVI. – С.82–95.
4. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы / В.А. Бесекерский. – М. : Наука, 1976 – 576 с.

В.Н. Журавлёв, А.Б. Единович, А.В. Папчёнков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КИНЕМАТОМЕТРИИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация. Решена задача эксплуатационной кинематометрии зубчатых передач газотурбинных двигателей. Разработана и апробирована математическая модель, параметры которой чувствительны к величине линейной деформации каждого зуба шестерни и скорости перемещения материала зуба в процессе деформации. Результаты экспериментальных исследований позволяют прогнозировать адекватность математической модели не хуже 0,9.

Ключевые слова. Зубчатые передачи, кинематическая погрешность, математическая модель.

1. Введение. Постановка задачи

В настоящее время авиационная техника в значительной степени эксплуатируется по стратегиям управления ресурсом, учитывающим ее техническое состояние. Однако, вследствие как случайных воздействий, так и факторов, связанных с недостаточным соответствием условий испытаний и эксплуатации, невозможно исключить вероятность дефектов, которые могут привести к отказам в полете. В связи с этим значительно возрастает роль диагностики и прогнозирования состояния авиационной техники, которая находится в эксплуатации.

Одними из эффективных средств технического диагностирования наиболее напряжённых узлов – зубчатых передач газотурбинных двигателей (ГТД) и вертолетных редукторов, являются вибродиагностические методы. Традиционные модели вибрационной диагностики редукторов преимущественно работают в пространстве частот и основываются на спектральном разложении сигналов с информационным анализом амплитудного спектра преобразования Фурье [1]. При интегрировании информационного сигнала на интервале длительности окна анализа проявляется недостаточная чувствительность спек-

тральных моделей к сигналам зарождающихся дефектов зубьев, которые имеют малую амплитуду и большую скважность, что затрудняет идентификацию эксплуатационных дефектов зубчатых передач. Этим недостатком, в меньшей степени, обладают статистические методы обработки, применяемые для анализа в пространстве времени дефектов шестерён главных редукторов вертолётов [2]. Общеизвестно, что одним из перспективных направлений является метод анализа кинематической погрешности [3], однако его применение в режиме эксплуатации ГТД ограничено конструкторско-технологическими сложностями.

Таким образом, важной и актуальной задачей современного двигателестроения является разработка новых и модификация существующих математических моделей диагностирования зубчатых передач [4], позволяющих более надёжно выделить в вибрационном сигнале признаки отклонения характеристик деталей редуктора от штатного состояния и позволяющих дополнить автоматическую систему анализа технического состояния зубчатых передач ГТД пятого и шестого поколений.

2. Состояние вопроса диагностирования зубчатых передач ГТД

Функция динамической кинематической погрешности зацепления может определяться путем прямого измерения, например, тензометрированием или кинематометрированием зубьев, так и косвенным измерением, например, вибрографированием. Прямое тензометрированием, с одной стороны, может дать наиболее точную картину нагружения зуба, но с другой стороны имеет ряд недостатков, ограничивающих применение этого метода. В первую очередь, это – значительная трудоемкость подготовительных работ, что не дает возможности произвести экспресс-анализ работы произвольной передачи и, тем более, в эксплуатационном режиме ГТД.

Вибрографирование зубчатых передач, до последнего времени, является наиболее распространенным методом контроля и диагностики, однако, существующие методики не дают достоверной картины состояния передачи, особенно картины контактного взаимодействия зубьев. Кроме того, при работе передачи в составе, например, авиационного двигателя или вертолетного редуктора на вибросигнал, создаваемый зубчатой передачей, накладываются сигналы от других ис-

точников: роторов, лопастных машин, подшипников, что значительно усложняет выделение и обработку полезной информации.

Как альтернативу вибрографированию было предложено кинематометрирование зубчатых передач при штатной работе двигателя. Поскольку кинематометрирование передачи производится при эксплуатационной нагрузке, то, соответственно, все параметры зацепления определяются с учетом деформации всех элементов передачи. Недостатком традиционной кинематометрии является необходимость применения высокоточных датчиков частоты и фазы вращения ротора, что в условиях реальных ГТД не всегда возможно. В связи с этим, кинематометрирование используется пока только при доводке передач, обычно параллельно с тензометрированием.

3. Анализ физической модели девиаций энергии пересопряжения зубчатых пар. Математическая модель сигнала кинематометрии зубчатых передач

Рассмотрим основные источники сигнала акустической эмиссии $s_{vz}(t)$ возбуждения вибрации зацепления зубчатой пары при стационарном режиме работы двигателя. На собственные сигналы зубчатой пары $s_z(t)$ воздействуют сигналы генератора энергии (камеры сгорания) $s_{in}(t)$ и сигналы изменения приемника энергии (нагрузки) $s_{out}(t)$. Сигнал вибраций в зоне зацепления зубчатой пары равен суперпозиции этих сигналов: $s_{vz}(t) = s_z(t) + s_{in}(t) + s_{out}(t)$. Основные составляющие входного сигнала, это: дисбаланс и девиация скорости вращения ротора свободной турбины $s_r(t)$, дисбаланс колёс турбины и процессов прохождения лопатками температурных пятен $s_{tr}(t)$, пульсации газового потока камеры сгорания $s_{kz}(t)$, инициированные системой управления, и некоррелированные шумы $s_{sh1}(t)$. Основные составляющие нагрузки: динамические изменения под действием изменения плотности атмосферы $s_{at}(t)$, управление углом лопастей воздушного винта $s_{vv}(t)$ и некоррелированные $s_{sh2}(t)$ шумы. Особо отметим сигналы кратковременных резонансов деталей $s_{res}(t)$, которые могут возникать во время переходных процессов адаптации перечис-

ленных сигналов к возмущающим воздействиям. В результате имеем суммарный сигнал акустической эмиссии вибраций:

$$\vec{s}_{vz}(t) = \vec{s}_z(t) + \vec{s}_r(t) + \vec{s}_{tr}(t) + \vec{s}_{kz}(t) + s_{sh1}(t) + \vec{s}_{at}(t) + \vec{s}_{vv}(t) + s_{sh2}(t) + \vec{s}_{res}(t) \quad (1)$$

Будем понимать, что все сигналы виброакустической эмиссии энергии (1), кроме сигналов шума, представляют собой векторы, вращающиеся в трехмерном пространстве со своими амплитудами и круговыми частотами. На теоретическом этапе исследований невозможно определить сигнал кратковременных резонансов $\vec{s}_{res}(t)$ на переходных режимах. Этот сигнал идентифицируются на этапе стендовых испытаний. Скалярное представление для i – го сигнала гармонической модели:

$$s_i(t) = A_i(t) \sin[\omega_i(t)t + \varphi_i(t)], \quad (2)$$

где: $A_i(t)$ – амплитуда, $\omega_i(t)$ – круговая частота (рад/сек), $\varphi_i(t)$ – начальная фаза, измеренная относительно фазы некоторого опорного сигнала.

Суммарный сигнал акустической эмиссии вибраций (1) в виде суперпозиции сигналов (2) распространяется по элементам конструкции двигателя, имеющих комплексную передаточную функцию $\dot{k}(\omega)$ и идентифицируется датчиком вибраций. Датчик выполняет функцию преобразователя перемещения в напряжение с весовой функцией $g(\omega, t - \tau)$. Аналоговый выходной сигнал датчика можно представить в виде:

$$s(\omega, t) = \dot{k}(\omega) \int_{\tau} s_{vz}(t) g(\omega, t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

Требования к параметрам датчика и аналого-цифрового преобразователя в анализируемых приложениях являются отдельной задачей, которая будет рассмотрена в следующих статьях.

В приложении к авиационным редукторам традиционно [3] предполагается, что зубья, которые перекатываются по эвольвенте профиля поверхности, не создают существенных локализаций контактных нагрузок, и сигнал собственно зубцовых вибраций $s_z(t)$ (2) описывается гармонической моделью $s_z(t) = A \cos(\omega_z t + \varphi_0)$, где: A – амплитуда колебаний виброперемещения, ω_z – круговая зубцовая частота, φ_0 – в общем случае начальная фаза. Зубцовая частота опреде-

ляется по известному выражению: $\omega_z = \frac{\omega_r}{60} N_z$, где: ω_r – круговая роторная частота (об/мин), N_z – количество зубьев шестерни. Как ограничение модели принимается, что роторная частота постоянна $\omega_r = const$ (2), вследствие этого постоянна и зубцовая $\omega_z = const$ частота. Редуцируемый момент не изменяется во времени $A_z = const$ (1), начальная фаза принимается равной нулю $\varphi_0 = 0$. Дополним анализ физического процесса передачи крутящего момента парой зубьев и параметров поверхностей с максимальной контактной нагрузкой [3] (рис. 1).

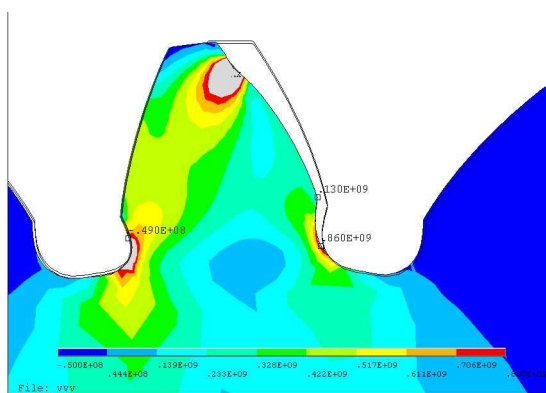


Рисунок 1 - Динамические нагрузки процесса передачи крутящего момента зубом шестерни. В цветовой гамме выделены точки максимальной нагрузки и удельное давление в H/m^2

В течение одного цикла перезацепления жесткость пары зубьев, участвующих в передаче крутящего момента, изменяется несколько раз, при этом происходит изгибная деформация зубьев в упругой области с соответствующим изменением шагов зацепления. Это, в свою очередь, может привести к пластической деформации в зоне двухпарного зацепления (выделенный объем на вершине зуба на рис. 1). Одновременно с зубом деформируются: вал (кручение), шлицевые соединения вала и детали подшипников опор(изгиб). В процессе деформации в течение времени фронта нарастания деформации t_ϕ происходит изменение мгновенной частоты $\Delta\omega_z(t), t \in t_\phi$, что приводит к изменению кинетической энергии деталей узла шестерни и её привода (вал со шлицами и подшипники опор вала) $\Delta E_\omega = J\Delta\omega_r^2/2$, где J – момент инерции деталей узла шестерни, и инициирует момент им-

пульса $M = J\Delta\omega_r$. Последний порождает импульс вибрации $\vec{P} = m\langle\Delta\vec{v}\rangle$ с энергией $\Delta E_v = m\langle\Delta v\rangle^2 / 2$, где: m – активная масса деталей узла шестерни, $\langle v \rangle$ – усреднённая на интервале $t\phi$ скорость деформации деталей. Сигнал $s_z(t) \approx \Delta E_v(t)$ пропорциональный энергии пересопряжения в сумме с сигналами деталей узла шестерни распространяется по корпусным деталям двигателя до чувствительного элемента датчика вибраций. В случае эксплуатационного дефекта зуба (трещина), его выкрашивания (масса) либо изменения геометрии поверхности (износ) будет изменяться функции линейной деформации зуба $\Delta L_z(t)$ и скорости $\Delta v(t)$ в пространстве времени, влияющая на энергию вибраций ΔE_v .

Анализ динамики процесса передачи крутящего момента парой зубьев на интервале времени T_z передачи ими крутящего момента позволяет сделать вывод о негармоническом характере сигнала зубцовой частоты $s_z(t)$, который имеет, как минимум, два максимума – при входе и выходе из зацепления. Традиционная математическая модель в спектральной области представляет собой сумму сигналов (2):

$$s_z(t) = \sum_{i=1}^k A_{z_i}(t) \sin[\omega_{z_i}(t)t + \varphi_{z_i}(t)], \quad (4)$$

где k – количество спектральных составляющих сигнала.

На основании теоретических исследований можно сделать вывод, что основной функцией, которая характеризует энергетическую эффективность передачи крутящего момента и является чувствительной к зарождающимся дефектам зубьев шестерён, можно считать девиацию (в первом приближении) первой производной угловой скорости пересопряжения зубьев $\Delta\varphi_z(t) = d\omega_z(t)/dt, t \in [T_z]$ на интервале времени T_z – функцию динамической кинематической погрешности в пространстве времени. Искомые параметрами, функции которых в пространстве времени под эксплуатационной нагрузкой определяют потери энергии при передаче крутящего момента зубчатой парой, можно считать величину линейной деформации зуба $\Delta L_z(t)$ и скорость $\Delta v_z(t)$ перемещения материала зуба в процессе деформации.

Представим выражение (4) в виде математической модели фазовой модуляции $Md_{\varphi}[\varphi_z(t), \Delta L_z(t), \Delta v_z(t)]$ несущего сигнала с зубцовой частотой ω_z , усреднённое значение которой на интервале времени одного периода Tr роторной частоты ω_r не изменяется $\omega_z(t) = const, t \in [Tr]$:

$$s_z(t) = Md_{\varphi}[\varphi_z(t), \Delta L_z(t), \Delta v_z(t)], \quad (5)$$

а сигнал полной фазы $\Delta\varphi_z(t)$, как результат демодуляции сигнала $s_z(t)$ (5):

$$\Delta\varphi_z(t) = deMd_{\varphi}[s_z(t)] \quad (6)$$

5. Результаты экспериментальных исследований адекватности модели

Адекватность модели (5, 6) проверялась в процессе анализа сигнала датчика поперечных горизонтальных вибраций ведущей шестерни заднего редуктора двигателя ТВЗ - 117ВМА - СБМ1, который проходил стендовые испытания на ОАО "Мотор-Сич". В результате нештатной работы системы управления камерой сгорания, двигатель имел повышенные вибрации заднего редуктора более – 100g, при сдаточном максимуме не хуже 80g и статистической норме 28g. Анализируемый сигнал $z_{zr}317mp$, интервалом 1с, был записан приблизительно в середине режима двигателя «максимальный продолжительный», который имел длительность 5 мин.

В узел ведущей шестерни входит вал с двумя шлицевыми соединениями и два роликовых подшипника с двенадцатью телами качения. Датчик вибраций имеет линейную характеристику преобразования до частоты 30000Hz и расположен на расстоянии порядка 100мм от ведущей шестерни, что позволяет предположить минимальные линейные фазовые и амплитудные искажения передаточной функции $k(\omega)$ (3) виброакустической линии связи. На этом этапе исследований будем полагать, что постоянная времени датчика τ (3) одного порядка со временем фронта импульса нарастания деформации $\tau \approx t_{\phi}$. Сигнал датчика фиксировался в цифровом представлении измерительным комплексом MIC300 с параметрами аналого-цифрового преобразователя: $f_d = 216000Hz$ – частота дискретизации и $n = 2^{16}$ – количество уровней квантования амплитуды вибраций. На этом этапе

исследований будем полагать, что интервал дискретизации Δt_d и величина уровня квантования амплитуды Δx_v , аналого-цифрового преобразователя позволят с инженерной точностью идентифицировать параметры первой производной угловой скорости пересопряжения зубьев $\Delta\varphi_z(t) = d\omega_z(t)/dt, t \in [T_z]$.

Результаты экспериментальных исследований модели (5, 6) анализа эксплуатационной кинематометрии зубчатой пары на зубцовой частоте $f_z = 10766 \text{ Hz}$ представлены на рис. 2. Исследуемый сигнал вибраций $s(t)$ на интервале анализа, который соответствует одному периоду роторной частоты $Tr = 1/\omega_r = 0,0042593 \text{ s}$ ведущей шестерни, представлен на верхнем графике, функция, включающая в себя величину линейной деформации зуба $\Delta L_z(t)$ – на нижнем графике. Над нижним графиком приведены параметры, которые имеют определяющее значение в части прогноза остаточного ресурса ГТД: пик-фактор величины линейной деформации: Pf_{z+} – положительные деформации и Pf_{z-} – отрицательные деформации.

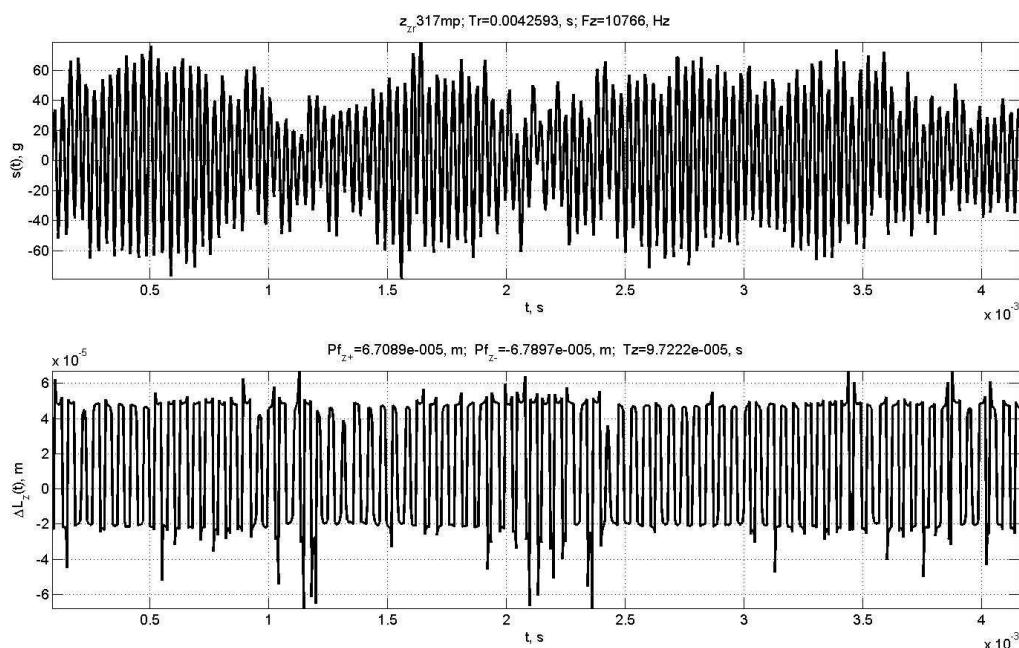


Рисунок 2 - Результаты анализа характеристик эксплуатационной кинематометрии зубчатой пары редуктора на зубцовой частоте $f_z = 10766 \text{ Hz}$

Анализ функции величины линейной деформации зуба $\Delta L_z(t)$ позволяет сделать вывод о её информационной идентичности экспе-

риментальным и расчетным данным [5]. На графике можно анализировать двойной сигнал от каждого зуба шестерни (41 зуб) с амплитудой суммарной деформации деталей узлов пары шестерён $\Delta L \approx 70 \times 10^{-3} \text{ mm}$. Принимая во внимание номинальное расчетное значение $\Delta L_{zn} \approx 20 \times 10^{-3} \text{ mm}$ для зуба шестерни при постоянном крутящем моменте 120 Н·м и статистической норме вибраций 28g, с учётом перегрузок вследствие нештатной работы системы управления, измеренное значение амплитуды деформации соответствует реальным значениям в пределах инженерной точности. Функция скорости $\Delta v_z(\Delta t_d)$ перемещения материала зуба в процессе деформации рассчитывается как отношение величины линейной деформации зуба $\Delta L_{z_i}(\Delta t_d)$ и интервалу дискретизации Δt_d аналого-цифрового преобразователя

$$\Delta v_z(\Delta t_d) = \frac{\Delta L_{z_i}(\Delta t_d)}{\Delta t_d}.$$

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет прогнозировать адекватность предложенной математической модели эксплуатационной кинематометрии зубчатых передач ГТД не хуже 0,9.

5. Выводы

Для решения задачи эксплуатационной кинематометрии зубчатых передач ГТД разработаны физическая и математическая модели, которые работают в пространстве времени и не содержат интегрирующих блоков, искажающих фазовые компоненты сигнала. Основной функцией, которая характеризует энергетическую эффективность передачи крутящего момента и является чувствительной к зарождающимся дефектам зубьев шестерён, является девиация первой производной угловой скорости пересопряжения зубьев $\Delta \varphi_z(t) = \frac{d\omega_z(t)}{dt}, t \in [T_z]$ на интервале времени T_z , т.е. функция динамической кинематической погрешности. Искомыми параметрами, функции которых под эксплуатационной нагрузкой определяют потери энергии при передаче крутящего момента зубчатой парой, есть величина линейной деформации зуба $\Delta L_z(t)$ и скорость $\Delta v_z(t)$ перемещения материала зуба в процессе деформации.

Экспериментальные исследования модели позволяют прогнозировать адекватность не хуже 0,9 при расчёте функции параметров

линейной величины деформации каждого зуба шестерни $\Delta L_z(t)$ и скорости $\Delta v_z(t)$ перемещения материала зуба, которые определяют загруженность зубьев шестерён и начало развития эксплуатационных дефекта: трещины, выкрашивания либо износа (изменения геометрии поверхности).

Программное обеспечение, реализующее алгоритм модели, анализирует сигнал штатного датчика вибраций корпуса ГТД и может дополнять бортовую (либо стендовую) автоматическую систему анализа технического состояния зубчатых передач ГТД пятого и шестого поколений.

Для увеличения эксплуатационной точности предложенной модели в анализируемых приложениях необходимо решить задачи уточнения требований к параметрам датчика и аналого-цифрового преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлёв В.Н. Методическая адекватность спектральной модели в задаче технического диагностирования роторных деталей редукторов ГТД [Текст] / В.Н. Журавлёв, А.В. Папченков, С.А. Борзов // «Вестник двигателестроения» – Запорожье, АО "Мотор Сич", 2014. – № 2. – С. 221 – 228.
2. Harry J. Decker. Crack Detection for Aerospace Quality Spur Gears [Text] / Harry J. Decker U.S. Army Research Laboratory Glenn Research Center, Cleveland, Ohio/National Aeronautics and Space Administration. NASA/TM—2002-211492. Prepared for the International 58th Annual Forum and Technology Display sponsored by the American Helicopter Society.- Montreal, Quebec, Canada, June 11-13, 2002.
3. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: Справочник [Текст] / Под ред. Э.Б. Вулгакова. М.: Машиностроение, 1981. – 374 с.
4. Кравченко И.Ф. Экспериментальные и теоретические результаты исследования авиационных зубчатых передач для двигателей пятого и шестого поколений [Текст] / И.Ф. Кравченко, А.Б. Единолич, В.А. Яковлев, В.Л. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2008. – № 8. – С. 129 – 134.
5. Дорофеев В.Л. Система моделирования «AEROFLANK»& прямой синтез износостойких и малошумящих зубчатых передач [Текст] / В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, Д.В. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. Вісник НТУ «ХПІ» – Харьков, 2013. – № 40(1013). – С. 39 – 48.

О.С. Волковский, Е.Р. Ковылин

СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖИМОГО WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ

Анотація. Розглянуто систему семантичного аналізу текстових даних (без опори на знання), яка дозволяє квазиреферувати web-сторінки. Отримані результати можуть бути застосовані для скорочення часу пошуку та аналізу даних в мережі інтернет.

Введение. С развитием компьютерных и, в частности, web технологий можно наблюдать значительное расширение информационного пространства сети интернет. На данный момент в сети можно наблюдать огромное число тематических сайтов и электронных документов самой разной направленности и их количество растет экспоненциально. В связи с этим возникает ряд вопросов связанных с обработкой, анализом и оптимизацией работы с текстовыми данными в сети. Одним из них является высокая вариативность подачи информации на одинаковую тематику, что приводит к увеличению времени поиска и анализа найденных данных. Поскольку наиболее естественной формой общения и подачи информации для человека является естественный язык, то основными инструментами для решения этой проблемы становятся методы математической лингвистики, позволяющие программе оперировать с массивами данных, описанных на естественном человеческом языке. В этой статье рассматривается система, позволяющая минимизировать время обработки текстовой информации пользователем в интернете, путем составления информативного автореферата страницы на основе семантического анализа данных.

Постановка проблемы. В контексте этой работы, под семантическим анализом мы будем понимать процесс автоматического реферирования – составление небольшого текста-реферата, способного донести до пользователя основную идею исходного документа. Решение данной задачи влечет за собой возникновение ряда научных вопросов – от понимания естественного языка как объекта математического

моделирования, до выбора оптимальных алгоритмов для семантического анализа.

Лингвистические проблемы автореферирования заключаются в формировании необходимых знаний о языке. Это связано с тем, что естественный язык, как объект моделирования, обладает рядом свойств, затрудняющих семантический анализ. Наиболее очевидной проблемой является смешанность правил естественного языка. Точность и полнота работы алгоритмов, напрямую зависит от того, насколько шаблонны правила, заложенные в них. Однако, для любого естественного языка на фоне общих правил, существует огромное количество исключений и частных случаев, причем практически во всех областях лингвистики. Это приводит к отклонению от заданного шаблона, что значит получение некорректных результатов на выходе. С другой стороны, появляется вопрос о недостаточной формализации языка – отсутствия абсолютно полного набора правил, способных точно описать структуру естественного языка, которая будет единственной и непротиворечивой в общем случае. Указанные свойства также приводят к еще одной проблеме – отсутствию универсальных тестовых наборов данных. Под этим подразумевается, что в следствии смешанности и недостаточной формализации языка, для алгоритма невозможно подобрать тестовый набор данных, обработав который, мы сможем достаточно полно оценить результаты его работы.

Одним из этапов построения автоматического реферата является взвешивание частей исходного текста по заранее заданным критериям. Это необходимо для последующего включения наиболее «тяжелых» предложений в реферат. Кроме того, необходимо проводить статистическую и стилистическую корректировки текста, как исходного, так и получаемого. Необходимость построения и выбора оптимальных алгоритмов приводит к алгоритмическим проблемам семантического анализа – выбор наилучшей математической модели представления естественного языка, построение эффективных алгоритмов предварительной обработки текста, обмена данными между частями системы, алгоритмов взвешивания и конечной сборки реферата.

Анализ последних разработок и публикаций. В течении последних лет появилось множество материалов по теме интеллектуальной обработки текста. Термин «автоматическое реферирование» разделился на два направления – квазиреферирование, под которым

понимается поиск и выделение наиболее информативных фрагментов текста и генерация рефератов – составление новых текстов на основе исходного. Разработанный алгоритм относится к направлению квази-реферирование, поскольку основной целью работы является оптимальное сокращение объема исходного текста, а не генерация нового.

Большая часть алгоритмов реферирования отталкивается от алгоритма Г. Луна [1]. Для современных алгоритмов характерно сочетание классического подхода Луна со статистическими методами реферирования и методиками, основанными на знаниях. Так, в работе [2] приводится метод реферирования, основанный на машинном обучении, а в работе [3] предлагается подсчитывать вес предложения на основе связей с предложениями, стоящими слева и справа от него, используя специальный словарь слов-связей.

Из существующих систем, направленных на семантическую обработку текста, особенно стоит отметить продукт Intelligent Miner [5], со стоимостью пакета от 18 до 60 тыс. долларов, разработанный фирмой IBM как набор пяти утилит, предоставляющий инструментарий для text mining.

Постановка задачи. Разработать алгоритм автоматического реферирования web-страниц. Реализовать систему на основе построенного алгоритма и проанализировать результаты ее работы на базе тестового набора данных.

Основная часть. Структуру программы условно можно разделить на четыре части: блок синтаксического анализа, блок-стеммер, блок семантического анализа, блок сборки реферата. Логику работы программы можно увидеть на рис. 1. Синтаксический блок включает в себя методы для выделения предложений и слов из текста, методы удаления стоп-слов – незначимых и неинформативных слов в предложении, методы проставления тэгов – специальных дескрипторов для семантического анализа, методы для работы со вспомогательными словарями. Блок-стеммер представляет собой набор методов, необходимых для проведения специальных операций над каждым информативным словом в тексте. Это операция лемматизации – приведение слова к словарной форме, операция стемминга по алгоритму Портера – выделения основы слова, операция нахождения наибольшей общей основы слова. Блок семантического анализа необходим для взвешивания предложений по разработанному алгоритму и подсчета количе-

ства предложений в конечном реферате. Блок сборки реферата включает методы для парсинга web-страницы, стилистической корректировки текста, сборки конечного реферата.



Рисунок 1 - Архитектура системы реферирования

Рассмотрим алгоритм работы программы подробнее, и поясним назначение и смысл некоторых операций.

1. В первую очередь производится операция парсинга web-страницы. На этом шаге текстовая информативная часть отделяется от неинформативного текстового web-кода.
2. Из полученного текста происходит выделение предложений и слов. При этом учитывается, что в предложении могут быть сокращения, многоточия, лишние пробелы.
3. Следующей задачей становится тегирование – расстановка специальных дескрипторов, которые необходимы для последующей семантической обработки текста и сборки реферата. Это необходимо для стилистической корректировки текста.
4. Тегированный текст проходит через операцию лемматизации – разновидности морфологического анализа, которая заключается в приведении словоформы к исходной словарной форме. В результате лемматизации от словоформы отбрасываются флексивные окончания и возвращается основная форма слова, что позволяет получить более точные результаты при семантическом анализе.
5. Над каждым предложением происходит операция удаления стоп-слов. Под стоп-словом мы будем понимать слово, анализи-

ровать которое нет смысла в силу его низкой информативности. Все стоп-слова занесены в специальный словарь.

6. Следующий шаг – это операция стемминга по алгоритму Портера над каждым словом. Стемминг – это процесс нахождения основы слова (которая не всегда может совпадать с морфологической основой). Предварительная операция лемматизации позволяет сократить количество ошибок, появление которых обусловлено не совершенностью алгоритма Портера. Алгоритм включает в себя четыре шага. На первом шаге отсекается максимальный формообразующий суффикс, на втором — буква «и», на третьем — словообразующий суффикс, на четвертом — суффиксы превосходных форм, «ь» и одна из двух «н».
7. Говоря об алгоритмах отсечения окончаний, можно отметить, что зачастую слово обрезается больше чем это необходимо. Кроме того, алгоритмы неустойчивы к выпадению и замене букв в корне и суффиксах при словообразовании. Лемматизация хоть и сокращает число таких ошибок, однако не позволяет добиться точности, необходимой для семантического анализа. Поэтому над каждой парой слов, уже пропущенных через лемматизатор и стеммер, проводится операция нахождения максимальной наибольшей части слова. Найти общую часть для пары слов не трудно, сложность этого шага заключается в оценке пригодности найденной общей части. Для того, чтобы понять, насколько найденная общая часть адекватна с точки зрения морфологии, мы используем механизм, основанный на оценке длин слов. По формуле:

$$EQ = Q \cdot \max(wl_i, wl_j), \quad (1)$$

где Q – коэффициент эквивалентности, $\max(wl_i, wl_j)$ - функция нахождения максимальной из длин пары слов (wl_i, wl_j) мы находим величину EQ . Если значение EQ меньше, чем длина найденной общей части, то она пригодна для семантического анализа, и каждое слово из пары заменяется на найденную общую часть. Коэффициент Q указывает, насколько процентов должна совпадать длина найденной части с максимальной длиной слова из пары слов. Экспериментально было установлено, что оптимальное значение Q равно 0,4. Таким образом,

мы находим корпуса слов для конкретного текста, которые могут быть использованы для взвешивания.

8. Получив набор корпусов слов, можно приступить к взвешиванию предложений. Вес каждого предложения рассчитывается по формуле:

$$P = \sum_{i=0}^N FQ_i + H \cdot \frac{WC}{SC}, \quad (2)$$

где: FQ_i – частота слова в тексте, N – число слов в предложении, H – количество слов-слов подсказок в предложении, WC – количество слов в тексте, SC – количество предложений в тексте.

9. В результате, мы получаем набор пар предложение и его вес. Последней задачей становится сборка конченного реферата. Для этого, мы подсчитываем величину сжатия исходного текста, которая определит количество предложений в конечном реферате: Из множества найденных предложений, мы выбираем предложения с наибольшим весом, и включаем их в реферат, в порядке их следования в тексте. Из набора убираются предложения, которые помечены тегом связки с предыдущим предложением, которое не попало в реферат. Это делается для устранения смысловых разрывов в реферате. Результаты реферирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходный текст и его автореферат

Исходный текст	Автореферат
Программирование это процесс создания компьютерных программ. В узком смысле (так называемое кодирование) под программированием понимается написание инструкций (программ) на конкретном языке программирования (часто по уже имеющемуся алгоритму, методу решения поставленной задачи). Соответственно, люди, которые этим занимаются, называются программистами (на профессиональном жаргоне кодерами), а	Программирование это процесс создания компьютерных программ. В узком смысле (так называемое кодирование) под программированием понимается написание инструкций (программ) на конкретном языке программирования (часто по уже имеющемуся алго-

те, кто разрабатывают алгоритмы алгоритмистами, специалистами предметной области, математиками. В более широком смысле под программированием понимают весь спектр деятельности, связанный с созданием и поддержанием в рабочем состоянии программ программного обеспечения ЭВМ. Иначе это называется программная инженерия (инженерия ПО). Сюда входят анализ и постановка задачи, проектирование программы, построение алгоритмов, разработка структур данных, написание текстов программ, отладка и тестирование программы (испытания программы), документирование, настройка (конфигурирование), доработка и сопровождение. Программирование для ЭВМ основывается на использовании языков программирования, на которых записывается программа. Чтобы программа могла быть понята и исполнена ЭВМ, требуется специальный инструмент транслятор. В настоящее время активно используются интегрированные среды разработки, включающие в свой состав также редактор для ввода и редактирования текстов программ, отладчики для поиска и устранения ошибок, трансляторы с различных языков программирования, компоновщики для сборки программы из нескольких модулей и другие служебные модули.

ритму, методу решения поставленной задачи). В более широком смысле под программированием понимают весь спектр деятельности, связанный с созданием и поддержанием в рабочем состоянии программ программного обеспечения ЭВМ. Иначе это называется программная инженерия (инженерия ПО). В настоящее время активно используются интегрированные среды разработки, включающие в свой состав также редактор для ввода и редактирования текстов программ, отладчики для поиска и устранения ошибок, трансляторы с различных языков программирования, компоновщики для сборки программы из нескольких модулей и другие служебные модули.

Выводы. Проведенные исследования позволили разработать систему автоматического реферирования содержимого web приложений на естественном человеческом языке. Семантические алгоритмы, которые легли в основу системы позволяют проводить эффективный синтаксический, морфологический и частотный анализ. Работа системы показывает, что алгоритмы семантического анализа без опоры на знания могут давать достаточно хорошие результаты, применение которых в рамках задачи оптимизации поиска информации в интернете весьма уместно. Следующим шагом может стать оптимизация алгоритмов синтаксического анализа, что приведет к улучшению качества получаемого реферата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Luhn H. The automatic creation of literature abstracts. // In IBM Journal of Research and Development, Vol. 2(2), pp. 159–165, 1958.
2. Браславский П.И., Густелев В. Система автоматического реферирования новостных сообщений на основе машинного обучения // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Труды Девятой Всероссийской научной конференции RCDL '2007 (Переславль-Залесский, Россия, 15–18 октября 2007 г.). – Переславль-Залесский: Изд-во «Университет гор. Переславля», 2007. – С. 142–147.
3. Яцко В.А. Симметричное реферирование: теоретические основы и методика // НТИ. Сер. 2, №5, 2002. – С. 18–28.
4. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Технологии анализа данных. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP - БХВ-Петербург, 2007. – 384с.
5. IBM Intelligent Miner for Text Version [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www-01.ibm.com/>

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ МИТНОГО КОНТРОЛЮ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Аннотация. В данной статье рассмотрены проблемы разработки и внедрения автоматизированной системы таможенного контроля на морском транспорте. Проанализированы характерные особенности сложных, многоуровневых систем, к которым можно отнести таможенный контроль. На основе проведенного исследования авторами предлагается создать автоматизированную, модульную, адаптивную систему контроля на основе перспективных и эффективных информационных технологий.

Ключевые слова: автоматизированная система таможенного контроля (АСТК), оптимизация процессов управления и принятия решений, кластерный анализ, многоуровневая модульная система, интеллектуальное ситуационное управление.

Вступ

Проголошення в Україні незалежності, реалізація на практиці положень Конституції України щодо захисту прав, свобод, законних інтересів людини і громадянина, а також спрямованість її на вступ до Європейського Союзу поставили перед вітчизняною наукою принципово нові фундаментальні питання. Серед них особливе місце посідає розробка й вирішення проблеми належного здійснення митних процедур, а саме митного контролю, на морському транспорті, приведення цієї важливої галузі транспортного господарства у відповідність із завданням розбудови в Україні сучасних та ефективних інформаційних систем та технологій.

Важливу роль для модернізації митниці в Україні відіграє прийняття нового Митного Кодексу, впровадження цілої низки необхідних законів та нормативно-правових актів, оновлення застарілих норм та розробка нових. Все це виводить митне законодавство на сучасний рівень міжнародних вимог та стандартів.

В наші часи велике значення відіграє впровадження перспективних інформаційних технологій, методів автоматизації та використання штучного інтелекту. Все це дозволяє швидко модернізувати будь-яке підприємство, скоротити виробничі витрати, підвищити ефективність, уникнути помилок, які пов'язані з «людським фактором», оптимізувати процеси управління та прийняття рішень. Велика кількість організацій, підприємств, установ та інших сфер діяльності почала активно впроваджувати новітні інформаційні розробки та технології та переконалась у їх перевагах. Митниця в Україні в цьому питанні не виняток: чинна система АСАУР показала дуже високі результати в ефективності, зменшенні часу та кількості митних доглядів без зменшення їх якості в цілому [1].

Постановка проблеми

Зважаючи на те, що митниця в Україні обрала шлях реформ на основі концепції «Обличчям до людей», питання створення та впровадження новітньої автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті стає все більш необхідним та актуальним.

Існує певна кількість нормативно-правових актів, постанов Кабінету Міністрів України, інструкцій Державної митної служби України, які регламентують послідовність дій та рекомендації посадовим особам митниці на морському транспорті. Наприклад:

- типова технологічна схема здійснення митного контролю водних транспортних засобів, перевізників і товарів, що переміщуються ними, у пунктах пропуску через державний кордон, затверджена постановою КМУ від 21 травня 2012 року № 451;
- типова технологічна інструкція щодо митного контролю морських та річкових суден [2].

Проте, всі ці документи носять формальний та рекомендаційний характер, тому виконати всі зазначені пункти у них під час митного контролю будь-якого судна просто неможливо. Також слід відзначити, що оновлення цих джерел відбувається досить рідко, тому вони не в повній мірі відображають зміни у сучасних технологіях митного контролю та оформлення, від яких залежить якість, ефективність та тривалість митних процедур.

Саме тому пропонується розробити автоматизовану інформаційну систему митного контролю на морському транспорті, яка буде основана на принципах інтелектуального ситуативного

управління. Такий підхід до вирішення проблеми дозволить використати наявні інструкції та рекомендації, доповнити та розширити їх зміст, перетворити все ці данні у єдину систему та тим самим оптимізувати митні формальності.

На жаль, цій проблемі у науковій спільноті не приділено уваги. Зараз широко розглядаються напрямки створення інформаційних систем митного оформлення митних декларацій, електронного документообігу, митного контролю в цілому. Тому ми вважаємо, що питання створення автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті є актуальним та необхідним відповідно до реалій сьогодення.

Отже, необхідно розглянути визначення, що собою являє автоматизована інформаційна система управління організацією — це взаємопов'язана сукупність даних, обладнання, програмних засобів, персоналу, стандартів процедур, призначених для збирання, опрацювання, розподілу, зберігання, видачі (надання) інформації відповідно до вимог, що випливають з діяльності організації. Як правило, це система для підтримки прийняття рішень і виробництва інформаційних продуктів, що використовує комп'ютерну інформаційну технологію, і персонал, який взаємодіє з комп'ютерами і телекомунікаціями [3, с. 27].

Враховуючи вищесказане, пропонується митний контроль на морському транспорті інтерпретувати в загальну, інформаційну, багаторівневу систему, для якої розробити єдиний, уніфікований програмно-інформаційний комплекс. Це дозволить вдосконалити результативність та ефективність митних процедур на морському транспорті. Також такий підхід дозволить вести оцінювання ефективності митних процедур у режимі реального часу за потребою.

Зараз в українській митниці як основний використовується програмно-інформаційний комплекс (далі - ПІК) «Інспектор-2006». В ньому застосована лише одна автоматизована система — аналіз та управління ризиками [4, с. 3]. Зазначений ПІК певний час не отримував сучасних оновлень, які б відображали новітні розробки у сфері інформаційних систем, тому складається думка, що подальша модернізація комплексу майже призупинена. Проте, в умовах сьогодення, необхідно застосувати новітні інформаційні технології, та започаткувати розробку більш сучасного програмного забезпечення для митних

органів. Прикладом для цього може бути створення модульної системи автоматизованого митного контролю на морському транспорті, яка в подальшому може бути інтегрована у єдиний автоматизований ПК митниці та інтерпретована для контролю за будь-яким видом транспорту. В даному випадку нас цікавить саме єдина система, тому що нагромадження великої кількості складних та коштовних програмних забезпечень — це шлях до зайвих витрат та низької дієздатності.

Результати дослідження

Повернемося до створення автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті. Основою такої системи може бути інтерпретація технологічних схем митного контролю та оформлення, прописаних рекомендацій щодо дії співробітників митного органу на морському транспорті, безлічі нормативно-правових актів, наказів, розпоряджень та інших повідомлень у цій сфері, які існують тільки на папері, у інформаційну площину із застосуванням аналізу ризиків та автоматизованим пошуком управлінських рішень.

Представимо ситуацію, коли на посадову особу митного органу, яка приймає участь у митному контролі та оформленні морського судна, впливає безліч різноманітних негативних факторів (втомленість, необачність, недосконале знання технологічних схем та рекомендації по кожному окремому виду судна, наявність “свіжих” розпоряджень, які у більшості випадків не одразу потрапляють до працівників, відсутність необхідної попередньої інформації по прибутті судна, тощо), то вірогідність виникнення помилки чи неякісного виконання обов'язків дуже різко зростає. Для того, щоби зменшити кількість таких недоліків і необхідна розробка та впровадження автоматизованої системи, яка поєднає в собі певну базу знань, генератор ризиків та необхідних дій у кожній окремій ситуації, враховуючи та аналізуючи накопичені з зовнішніх джерел дані.

На практиці така система може являти собою певну сукупність критеріїв, які і будуть визначати обов'язкові та необов'язкові процедури митного контролю на морському судні. Наприклад, можна виділити наступні критерії для формування завдань митного контролю: вид морського судна; характер, склад, найменування, ціна, кількість, вага, якість та інші ознаки вантажів; екіпаж та пасажери; останній порт заходження; попередні та наступні порти заходження; наявність протоколів про ПМП на дане судно; наявність орієнтувань з боку

правоохоронних органів та інших країн; інформація про судновласника; країна реєстрації та порт приписки судна; періодичність заходження даного судна в порт; перевірка наявності всіх необхідних документів та їх достовірність і відповідність певним вимогам; інші критерії [5, с. 31, 33].

Розглядаючи можливості розробки сучасної інформаційної, автоматизованої системи у сфері митного контролю на морському транспорті, ми прийшли до наступних висновків:

1. необхідно використати модульний підхід створення запропонованої системи, це дозволить спростити етап розробки та розширити ступінь інтеграції з іншими інформаційними системами. Також внесення змін та реструктуризація найбільш ефективніше здійснюється саме у такому підході;

2. було запропоновано розглянути чотири добре відомі методи та визначити їх переваги при створенні графічної моделі функціонування системи:

- кластерний аналіз — це перший етап роботи системи, він дозволить приймати оперативні дані та інформацію, необхідну для аналізу, та сортувати їх за критеріями відбору;

- розпізнавання образів — серед отриманих, відсортованих блоків даних буде проводитись знаходження певних “тригерів”, які дозволять знайти та відібрати саме ті дані, які необхідні для визначення ризиків;

- метод мережевого управління — це створення попереднього плану завдань на досліджуваному об’єкті на основі отриманих даних з першого та другого модулів;

- метод ситуаційного управління — це основний фізичний етап проведення митного контролю на морському судні посадовими особами митного органу, з використанням попереднього плану, сформованими завданнями, чітко визначеними пріоритетами, вірно розподіленими ресурсами, та коригуванням першочергово плану на основі оперативно отриманої інформації та нових факторів, які не ввійшли до системи на етапі попередніх даних.

Графічна модель функціонування запропонованої інформаційної системи митного контролю на морському транспорті зображена на рисунку 1.

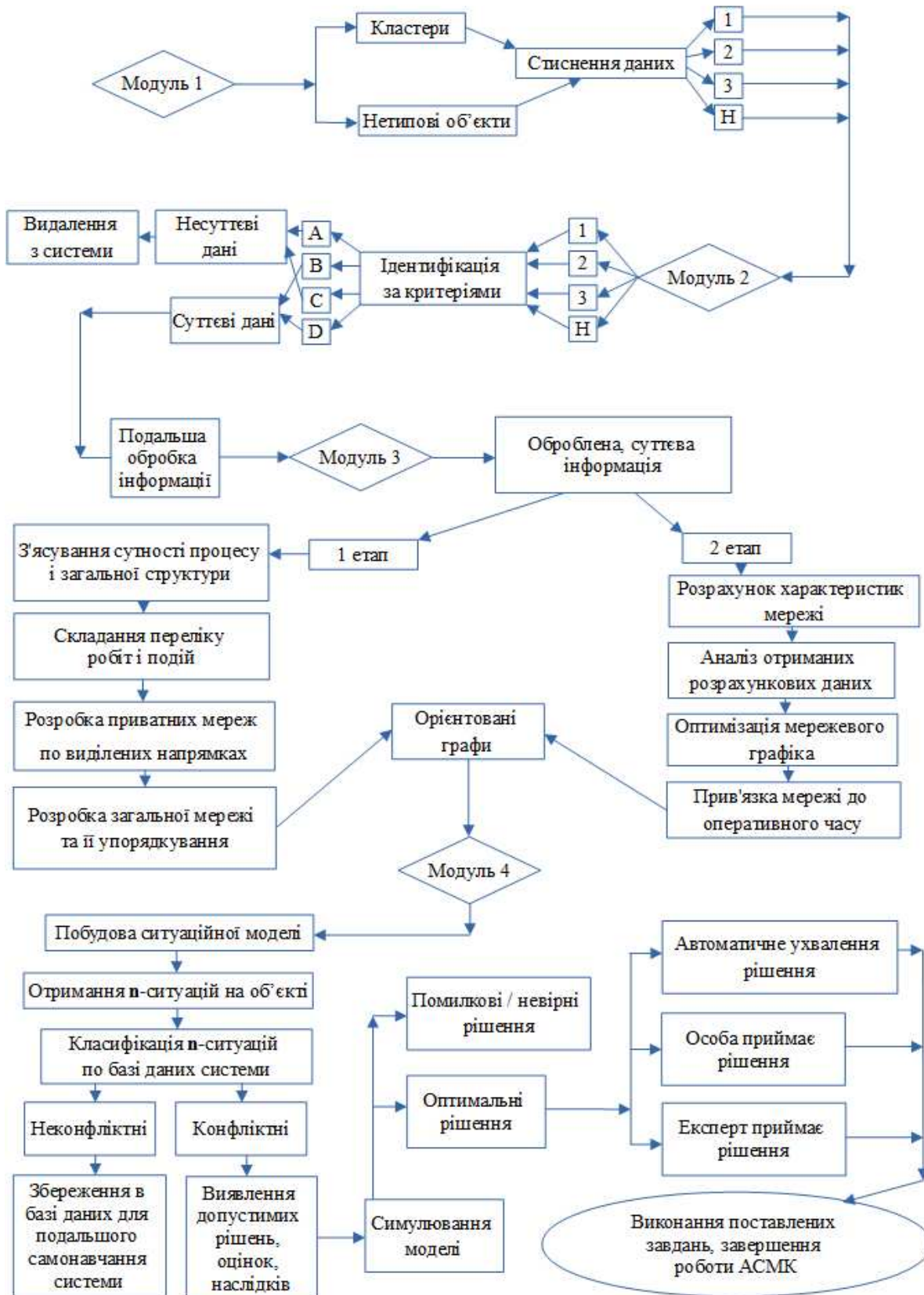


Рисунок 1 - Відображення функціонування автоматизованої системи

Отже, перший модуль приймає в систему будь-яку кількість інформації про об'єкт (суб'єкт), отриманої з різних джерел. Його основні завдання - це розробка типології та класифікації; дослідження корисних концептуальних схем групування об'єктів; породження гіпотез на основі дослідження даних; перевірка гіпотез або дослідження для визначення, чи дійсно типи (групи), виділені тим або іншим способом, присутні в наявних даних. Результатом роботи модуля буде впорядкування всієї хаотичної інформації та розбиття вибірки на групи схожих об'єктів, спрощення подальшої обробки даних та прийняття рішень, можливість застосування до кожного кластеру свого методу аналізу (наприклад, стратегія «розділяй і володарюй») [6].

По закінченні роботи модуля кожен отриманий кластер даних буде мати свій персональний набір характеристик і ознак (числових і нечислових). При надмірно великому обсязі вхідної інформації в системі можна проводити стиснення даних шляхом залишення по одному або декілька найбільш типових представників від кожного кластера. При кожному наступному циклі модуля - можливе виявлення «новизни», тобто відбувається виділення нетипових об'єктів, які не вдається приєднати до жодного з сформованих кластерів.

Використання методів кластеризації вхідної інформації дозволяє спростити роботу другого модуля системи автоматизованого контролю - «Розпізнавання образів». Як відомо, набагато простіше обробляти впорядковані, розбиті на конкретні групи дані, ніж величезні масиви хаотичної інформації.

Другий модуль отримує з першого загальну та впорядковану систему даних, розбитих на кластери. Також сюди входить блок нетипових об'єктів. Головне завдання модулю «розпізнавання образів» – це задача віднесення вихідних даних до певного класу за допомогою виділення істотних ознак, що характеризують ці дані, із загальної маси суттєвих та несуттєвих даних. Ще одна важлива задача – ідентифікація, яка полягає у тому, щоб вирізнити певний конкретний об'єкт серед йому подібних (наприклад, впізнати недостовірні дані при митному контролі та оформленні, пошук необхідної інформації для здійснення митних процедур на морському транспорті та інше).

Одним з принципів роботи другого модулю є автоматичний пошук даних, згідно поставленій мети та завданням. Наприклад, пе-

ред початком митного контролю та оформлення на морському транспорті ми можемо визначити наступні критерії пошуку інформації, яка знадобиться інспекторам для виконання митних процедур та формальностей: дата, час прибуття, вибуття морського судна; вид цього судна; будь-які наявні ознаки вантажів (характер, склад, найменування, ціна, кількість, вага, якість та інші); екіпаж та пасажери (національність, громадянство, вік, наявність особистих речей та багажу, наявність валюти); інформацію про попередній, останній та наступні порти заходження; наявність протоколів ПМП та виявів контрабанди на даному судні у минулому; наявність орієнтувань з боку правоохоронних органів та інших країн; інформація про судновласника; країна реєстрації та порт приписки судна; періодичність заходження даного судна в порт; перевірка наявності всіх необхідних документів та їх достовірність і відповідність певним вимогам; інші критерії.

Використовуючи ці критерії, будуть знайдені всі необхідні суттєві дані згідно заданим параметрам. При цьому несуттєві дані видаляються із системи. Отже, в результаті роботи модуля ми отримаємо необхідну кількість корисної інформації, яка дозволить спростити, прискорити та виключити зайві процедури митного контролю на морському транспорті.

Третій модуль автоматизованої системи буде мережевий граф, який відповідає тим процедурам та діям, котрі виконуються на досліджуваному об'єкті. Ця операція використовує дані, надані першими двома ланками системи. Пройшовши попередні два етапи, інформація була оброблена певними «фільтрами» та здобула значного спрощення, групування і відсіювання.

Третій модуль системи використовує у своїй роботі два етапи:

1. з'ясування сутності процесу і загальної структури; складання переліку робіт і подій; розробка приватних мереж по виділених напрямках; розробка загальної мережі та її упорядкування;

2. розрахунок характеристик мережі; аналіз отриманих розрахункових даних; оптимізація мережевого графіка; прив'язка мережі до оперативного часу.

В результаті цих дій ми маємо побудовані орієнтовані мережеві графи, що являють собою інформаційно-динамічну модель, у якій

відбиваються логічні взаємозв'язки та результати виконуваних робіт. У мережевому графіку з необхідним ступенем деталізації зображується, які роботи, в якій послідовності і за який час належить виконати, щоб забезпечити закінчення всіх видів завдань не пізніше заданого або планованого періоду.

Вже на основі взаємодії перших трьох модулів та інформації, яка пройшла обробку та сортування, складається модель основного четвертого модуля – методів ситуаційного управління. На цьому етапі даних буде достатньо для пошуку конфліктних та неконфліктних ситуацій. У разі неконфліктних ситуацій — не потребується втручання моделі управління або людини. При виникненні конфліктної ситуації — триває її розпізнавання до тих пір, поки вона не буде віднесена до певного класифікатору, після чого починається пошук відповідної сукупності елементарних команд управління для вирішення проблеми. У результаті формуються загальні оцінки по усім суміжним класам ситуацій для досліджуваної і виводиться команда управління, що визначає ім'я операції, яку необхідно виконати для усунення конфлікту в даному випадку. Таким чином, закінчується цикл роботи моделі.

Отже, для оптимізації технології митного контролю на морському транспорті необхідно кожен варіант технології розбити на чітко визначені операції, оцінити їх тимчасові характеристики, побудувати модель, визначити критичний шлях і його тривалість. Побудова ситуаційної моделі митного контролю дозволяє детально проаналізувати всі контрольні операції і внести покращення в технологічну структуру ще на етапі її проектування.

Висновок

Виходячи з вищесказаного, розробка та впровадження сучасної автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті на основі вказаної класифікації та методів створення – є безперечним кроком вперед у сфері митної справи. Враховуючи чинну та дієву ЄАІС митниці та програмне забезпечення „Інспектор-2006”, випробування використання АСМК на морському транспорті та подальше об'єднання з ними – можна вважати перспективною та обґрунтованою стратегією, орієнтовану на передачу максимальної кількості процедур та дій для виконання їх системою самостійно для оптимальних показників роботи організації в цілому. Необхідно пам'ятати, що застосування саме такого підходу та методів у створенні інформаційних

систем, дозволяє в майбутньому інтерпретувати їх на інші види транспорту з урахуванням їх специфіки та особливостей.

Перспективи подальших досліджень в даному напрямку — аналіз можливих критеріїв та ризиків при використанні системи, підбір найбільш оптимальних та дієвих методів при формуванні та обробці вхідної інформації, моделювання роботи системи на практиці та доказ її ефективності.

Тому ідея створення автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті є актуальною та перспективною, враховуючи те, що ДМСУ впроваджує реформу «електронна митниця», а також в Україні останнім часом з'явилося все більше розмов про необхідність впровадження системи «Електронне урядування» згідно успішному досвіду Європейських країн.

ЛІТЕРАТУРА

1. Наказ Міністерства фінансів України «Про затвердження Порядку здійснення аналізу та оцінки ризиків, розроблення і реалізації заходів з управління ризиками в митній службі України» від 24.05.2012 № 597.
2. Постанова Кабінету Міністрів України «Питання пропуску через державний кордон осіб, автомобільних, водних, залізничних та повітряних транспортних засобів перевізників і товарів, що переміщуються ними» від 21.05.2012 № 451.
3. Митні інформаційні технології: навч. посіб. / О. Ф. Волик, О. В. Кащеева, І. В. Дорда та ін.; за ред. П. В. Пашка; передмова А. В. Толстоухова. - К.: Знання, 2011. - 391 с. – (Митна справа в Україні).
4. Керівництво користувача «Інспектор-2006» ДМІТС.145-17 95-1 / І.В. Дорда, О.М. Івашкович, І.М. Дербаль - 197 с.
5. Таможенный контроль в морских пунктах пропуски: Учебное пособие / А. В. Полищук, П. В. Пашко, В. В. Ченцов. - Одесса: Плассе, 2009. - 480 с.: илл. – (Таможенное дело в Украине).
6. Стратегія розділяй і володарюй. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу https://ru.wikipedia.org/wiki/Разделяй_и_властуй

МОДЕЛЮВАННЯ АГРЕГОВАНОГО ТРАФІКУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ON / OFF

Анотація. Розглянуто підхід до розробки моделі агрегованого трафіку, який породжено декількома джерелами з послідовністю ON/OFF інтервалів, що чергуються, та тривалість яких підлягає Парето розподілу. Аналіз статистичних характеристик й оцінка показника Херста процесів, які синтезовані, підтвердили гіпотезу про самоподібну природу трафіку.

Ключові слова: агрегування, ON/OFF модель, розподілення Парето, трафік, параметр Херста.

Постановка проблеми

Постійно прискорюваний розвиток нових інфокомунікаційних технологій у різних сферах діяльності: виникнення нових протоколів передачі даних, розширення апаратних можливостей мережевого встаткування, зростання числа підключених абонентів і сумарний обсяг трафіку. В той же час, такий інтенсивний розвиток спричиняє ряд проблем. Одна з них полягає в тім, що розвиток мережевого обладнання й транспортних протоколів повинен опиратися на адекватні математичні моделі параметрів трафіку й інструменти моделювання мережевих процесів [1, 2]. Характер трафіку визначається певними факторами - від поведження користувачів або прикладного програмного забезпечення, до протоколів передачі й використовуваного обладнання. Вочевидь, що макропараметри мережевого трафіку (на відносно великих часових інтервалах) визначаються людиною. Однак характер трафіку на інтервалах порядку мікросекунд визначаються здебільшого транспортними протоколами, мережевим обладнанням і серверним програмним забезпеченням. З цього приводу, дослідження основних характеристик агрегованого мережевого трафіку, таких як параметр Херста, завантаження мережі на фоні інтенсивного мережевого трафіку, є актуальним завданням [3, 4].

Аналіз останніх досліджень

У роботах [5-7] показано, що процес агрегування трафіку множини окремих джерел в об'єднаній мережі приводить до стрибкоподібних змін інтенсивності трафіку і його можна розглядати як фрактальний процес, статистичні характеристики якого мають властивості масштабної інваріантності.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Мета роботи полягає в розробці імітаційної моделі трафіку, що утворений на комутаційних вузлах мережі при агрегуванні окремих інформаційних потоків, які спрямовуються по одному маршруту та аналізу характеристик побудованої моделі.

Основна частина

Самоподібний мережевий трафік може бути породжений мультиплексуванням декількох джерел з послідовністю ON/OFF інтервалів, що чергуються, та тривалість яких підлягає Парето розподілу. У мережі з комутацією пакетів ON періоди відповідають переданій серії пакетів (наприклад, IEEE стандарт 802.3), OFF інтервали - періоди з відсутністю передачі пакетів.

Середнє значення розподілу Парето дорівнює:

$$E(x) = \frac{\alpha b}{\alpha - 1} \quad (1)$$

Формула для генерації розподілу Парето

$$X_{PARETO} = \frac{b}{U^{1/\alpha}} \quad (2)$$

де U — рівномірно розподілені значення в діапазоні $(0, 1]$,

α - параметр форми (індекс «хвіста»),

b - мінімальне значення x .

При генеруванні модельного трафіку, бажано апіорно мати навантаження мережі й кожного джерела. З очевидь, що результуюче навантаження L у такому випадку просто дорівнює сумі навантажень L_i , що породжені від кожного окремого джерела i . Дано N джерел,

$$L = \sum_{i=1}^N L_i \quad (3)$$

Таким чином, важливо мати можливість одержання гарної оцінки навантаження, що створюється одним джерелом. Навантаження породжене одним джерелом представляє відношення середньої трива-

лості передачі пакета до суми середньої тривалості передачі пакета й середнього значення тривалості розриву передачі, або це відношення середнього розміру тривалості ON періоду до суми середніх значень тривалості ON й OFF періодів.

$$L_i = \frac{\overline{ON}_i}{\overline{ON}_i + \overline{OFF}_i} \quad (4)$$

Формула (1) дає середнє значення істинного розподілу Парето. Однак комп'ютерна реалізація, що використовує рівняння (2), формує псевдо-Парето розподіл. Одна із проблем пов'язана з тим, що комп'ютери не можуть генерувати довільно велике значення, однак, будь-який істинний розподіл Парето досить великої довжини буде мати значення, які перевищують діапазон, який згенеровано комп'ютером. Таким чином, це і є розподіл усіченого значення.

Позначимо через S невелике ненульове значення, породжене рівномірним випадковим генератором. Тоді, згенеровані Парето-розподілені значення не перевищать q :

$$q = \frac{b}{S^{1/\alpha}} \quad (5)$$

Тоді, середнє значення розподілу Парето може бути розраховане як:

$$E(x) = \int_b^q x f(x) dx = \int_b^q x \frac{ab^\alpha}{x^{\alpha+1}} dx = ab^\alpha \int_b^q \frac{dx}{x^\alpha} = ab^\alpha \frac{ab}{\alpha-1} \left| \frac{q}{b} = \frac{ab}{\alpha-1} \left[1 - \left(\frac{b}{q} \right)^{\alpha-1} \right] \quad (6)$$

Підставляючи (5) в (6), одержимо

$$E(x) = \frac{ab}{\alpha-1} \left[1 - S^{\frac{\alpha-1}{\alpha}} \right] \quad (7)$$

Рівняння (7) дає середнє значення усіченого значення розподілу Парето. Тепер, якщо є дані навантаження L_i і розмір k пакетів для даного джерела, можемо знайти мінімальне значення періоду OFF.

Для початку, знайдемо середнє значення OFF періоду i . З рівняння (1) одержуємо

$$\overline{OFF}_i = \overline{ON}_i \left(\frac{1 - L_i}{L_i} \right) \quad (8)$$

Позначимо M_{OFF} й M_{ON} мінімуми OFF й ON періодів відповідно. Вище зазначалося, що мінімальний розмір пакета передачі дорівнює одному пакету, тобто, $M_{ON}=1$. Тоді,

$$\frac{M_{OFF}\alpha_{OFF}}{\alpha_{OFF}^{-1}} \left[1-S \frac{\alpha_{OFF}^{-1}}{\alpha_{OFF}} \right] = k \frac{M_{ON}\alpha_{ON}}{\alpha_{ON}^{-1}} \left[1-S \frac{\alpha_{ON}^{-1}}{\alpha_{ON}} \right] \left(\frac{1-L_i}{L_i} \right) \quad (9)$$

де α_{ON} — параметр форми для ON періодів, і α_{OFF} — параметр форми для OFF періодів.

Позначаючи $T_{ON} = \frac{\alpha_{ON}^{-1}}{\alpha_{ON}}$ та $T_{OFF} = \frac{\alpha_{OFF}^{-1}}{\alpha_{OFF}}$, одержимо

$$M_{OFF} = k \frac{T_{OFF}}{T_{ON}} \times \frac{1-S^{T_{ON}}}{1-S^{T_{OFF}}} \times \left(\frac{1}{L_i} - 1 \right). \quad (10)$$

Таким чином, з огляду на значення k , L_i , α_{ON} , і α_{OFF} , формула (10) дає значення для M_{OFF} , що приведе до навантаження лінії, наближеного до L_i .

Проте, якщо генерувати трафік, використовуючи наведені вище формули, середні значення для періодів включення й вимикання в згенерованій серії будуть відрізнятися від необхідних. Проблема, полягає в тому, що комп'ютери генерують Парето-розподілені значення за формулою (2). У той час як розподіл Парето припускає безперервний простір значень, генеруються дискретні значення з певною рівномірністю. Парето-розподілення досягається за рахунок більш високої щільності значень у нижній частині шкали. При цьому, якщо будувати функцію розподілу шляхом агрегування значень протягом деякого заданого вікна, то незалежно від того, наскільки великий розмір вікна, в «хвості» відстань між двома сусідніми точками може перевищувати розмір вікна. Це означає, що деякі вікна будуть містити нульові вибірки, навіть якщо кількість значень прагне до нескінченності. Це вносить погрішність у середній розмір періодів включення й вимикання.

Щоб виправити цю погрішність, розрахункові значення ON й OFF періодів необхідно помножити на ваговий коефіцієнт C . Таким чином, формула (10) приймає вид

$$M_{OFF} = k \frac{C_{ON}}{C_{OFF}} \times \frac{T_{OFF}}{T_{ONN}} \times \frac{1 - S^{T_{ON}}}{1 - S^{T_{OFF}}} \times \left(\frac{1}{L_i} - 1 \right). \quad (11)$$

Якщо ми вибираємо α_{ON} й α_{OFF} тими ж самими, то рівняння (11) спрощується:

$$M_{OFF} = k \left(\frac{1}{L_i} - 1 \right). \quad (12)$$

Це, однак, може обмежити застосування генератора трафіку в реальних умовах. Імовірність наявності дуже великого OFF періоду вище, ніж імовірність наявності дуже великого ON періоду. Це означає, що параметр форми α_{ON} повинен бути більше, ніж α_{OFF} .

На основі моделі, що була запропонована розроблена схема імітаційного моделювання в системі OPNET і проведений статистичний аналіз отриманих процесів. Трафік надсилався від кількох вузлів одному одержувачеві. Змінювались значення α для розподілення Парето та співвідношення довжин періодів ON та OFF. Результати аналізу однієї з реалізацій представлені на рисунках нижче.

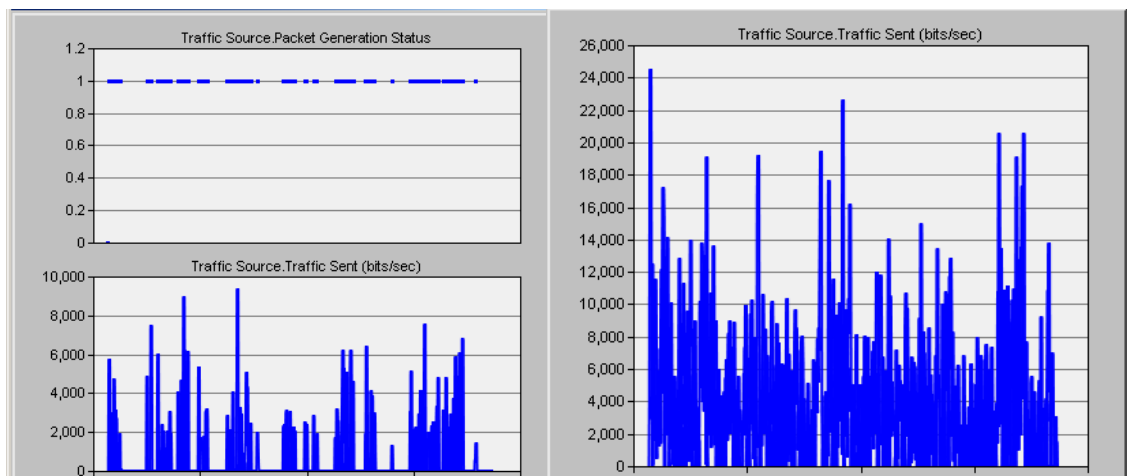


Рисунок 1 - Вихідний трафік для одного з вузлів мережі та агрегований для всієї системи

На рисунку 2 представлені розрахунки показників Херста різними методами.

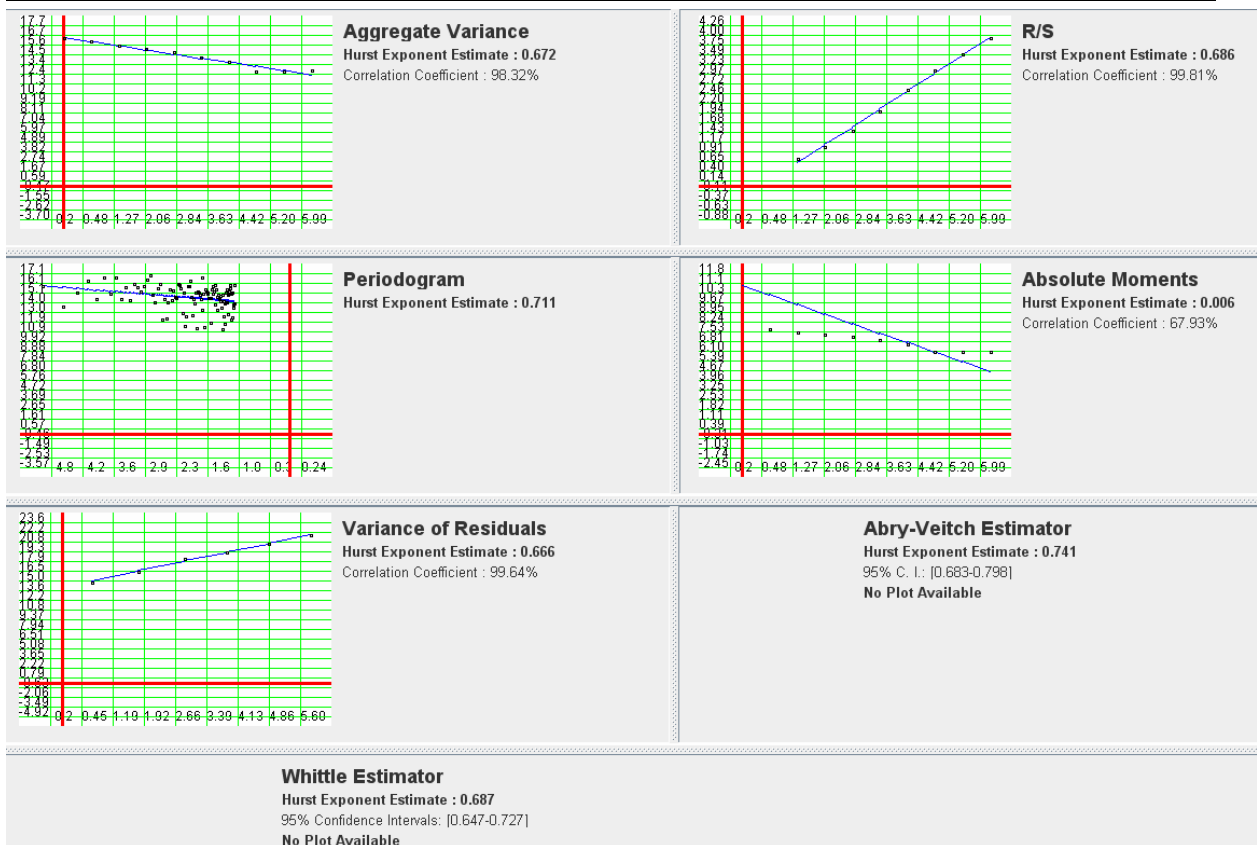


Рисунок 2 - Показники Херста для одного з джерел трафіку

Отриманий агрегований трафік від 50 джерел представлено на рисунку 3.

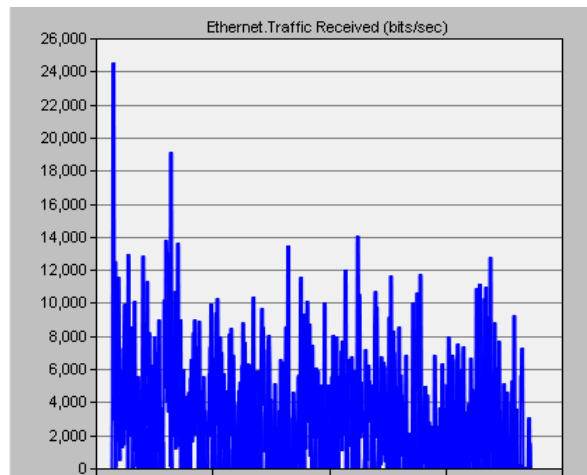


Рисунок 3 - Отриманий агрегований трафік

Параметр Херста може бути мірою оцінки довгострокової залежності часового ряду. Оцінка параметра не тільки може допомогти зробити висновок про самоподібність процесу, але й дозволить надалі

застосувати до нього ряд математичних методів по прогнозуванню фрактальності процесів .

Як й очікувалося, значення параметра вказало на існування довгострокової залежності й само подібності (рисунок 2 та 4).

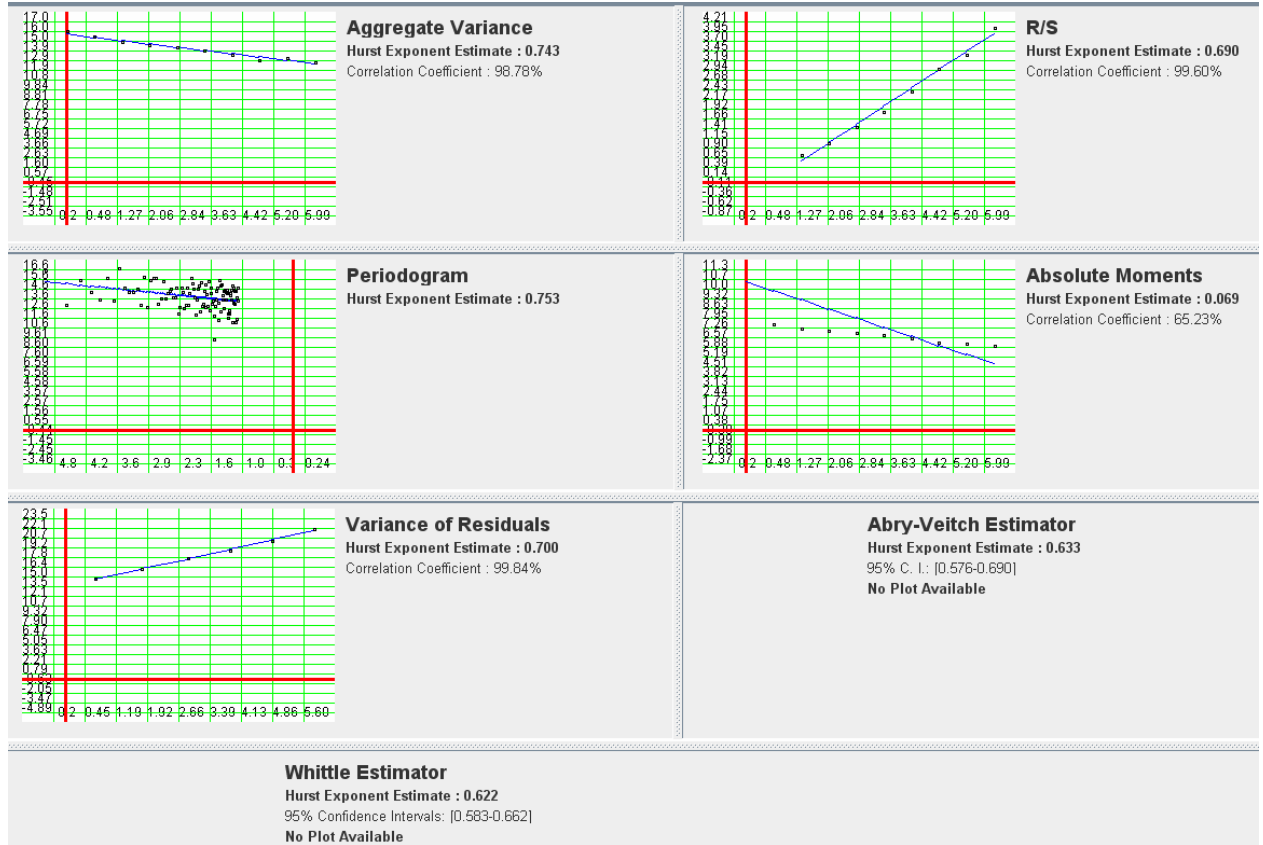


Рисунок 4 - Показники Херста для агрегованого трафіку

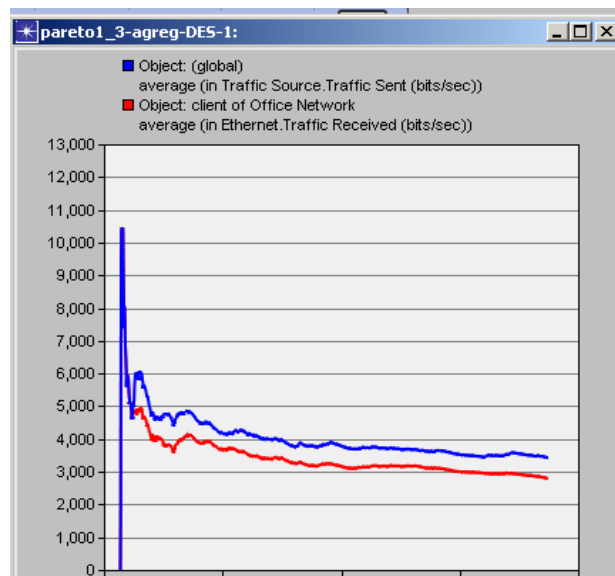


Рисунок 5 - Отриманий та відправлений трафік при значенні $\alpha_{ON} = 6$ та $\alpha_{OFF}=0.8$

Запропоновано метод генерації трафіку із заданими ступенем самоподібності й довгострокової залежності на основі ON-OFF моделі й комплексна модель оцінки характеристик агрегованого трафіку, що використовує оцінку середньої інтенсивності трафіку, а також ступеня його самоподібності й довгострокової залежності.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Одержала подальший розвиток математична ON/OFF-модель для агрегованого потоку даних. На основі розроблених математичних моделей було проведено імітаційне моделювання у середовищі OPNET. Оцінка показника Херста різними методами та аналіз статистичних характеристик трафіку й синтезованих процесів підтвердили гіпотезу про самоподібну природу розглянутого потоку даних.

Результати моделювання достатньо повно узгоджуються з результатами відомих числових та експериментальних досліджень та дають можливість прогнозування навантаження в телекомунікаційних мережах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Столлингс В. Современные компьютерные сети : пер. с англ. - СПб.: Питер, 2003. - 783 с.
2. Таненбаум Э. Компьютерные сети : пер. с англ. - СПб.: Питер, 2003. - 992 с.
3. Иванов И.П. Мониторинг ресурсов узлов корпоративной сети /Иванов И.П., Бойченко М.К. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - № 2. – Москва, 2010. - С. 114-120.
4. Бойченко М.К. Доступность ресурсов транспортных подсистем компьютерных сетей /Бойченко М.К., Иванов И.П., Кондратьев А.Ю.// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - № 3. – Москва, 2010. - С. 103-118.
5. Крылов, В.В. Теория телетрафика и ее приложения [Текст] / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
6. Олифер, В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2012. – 943 с.
7. Куроуз, Дж. Компьютерные сети. 2-е изд [Текст] / Дж. Куроуз, К. Росс. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с.

МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ КОРПОРАТИВНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ЗАГРОЗ

Анотація. Робота містить результати досліджень направлених на подальший розвиток методів та моделей інтелектуального розпізнаванні загроз інформаційно-комунікаційному середовищу транспортної галузі (ІКСТГ) та удосконаленню інформаційної безпеки (ІБ) в умовах формування єдиного інформаційно-комунікаційного середовища, створення державної єдиної інтегрованої інформаційної системи (ДЄІІС), впровадження нових та модернізації існуючих інформаційних систем на транспорті, і збільшення кількості дестабілізуючих впливів на доступність, схоронність і цілісність інформації. Розроблено метод інтелектуального розпізнавання загроз на основі дискретних процедур з використанням апарату логічних функцій та нечітких множин, що дозволяє підвищити ефективність розпізнавання загроз ІКСТГ, створювати ефективні аналітичні, схемотехнічні та програмні рішення СЗІ ІКСТГ.

Ключові слова: захист інформації, інформаційна безпека, інтелектуальне розпізнавання загроз, дискретні процедури, нечіткі множини, неоднорідні потоки даних, транспортна галузь.

Вступ

Інформаційні технології та системи, що розвиваються в транспортній галузі (ТГ), активно орієнтовані на взаємодію із системами інших секторів економіки для скорочення затримок при транспортуванні вантажів, обробці морських та річкових суден, контейнерів, залізничних вагонів і автофургонів на прикордонних переходах, мультимодальних логістичних центрах, на основі використання даних електронних накладних, систем клієнт-банк, e-business, e-logistics, e-cargo, e-ticket, взаємодії із клієнтурою й партнерами тощо.

В рамках державних і міждержавних програм інформатизації створюються сучасні комплекси інформаційних, інформаційно-керуючих та автоматизованих інформаційних систем транспортної

галузі (далі по тексту ІСТГ), а також державна єдина інтегрована інформаційна система (ДЄІС).

Активне розширення інформаційно-комунікаційного середовища транспортної галузі (ІКСТГ), особливо в сегменті мобільних, розподілених і бездротових технологій, супроводжується появою нових загроз інформаційній безпеці (ІБ), про що свідчить статистика інцидентів, див. рис. 1.

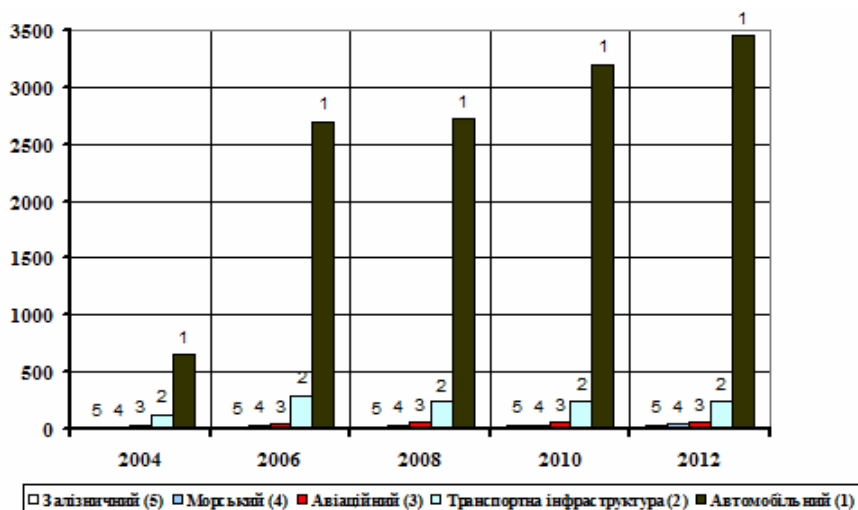


Рисунок 1 - Загальна кількість інцидентів із ІБ на транспорті

Дослідженнями ІБ ТТ присвячені роботи: Алексєєва В.О., Бабака В.П., Бірюкова Д.С., Блінцова В.С., Вільського Г.Б., Єсікова О.В., Корнієнко О.О., Корченко О.Г., Риндюка В.А., Стасюка О.І., Харченка В.П. та ін. Однак в Україні ці дослідження носять фрагментарний характер [1, 2, 3]. Завдання визначення ризиків нападу на інформаційні ресурси транспортного сектору економіки, та ІСТГ, зокрема, належним чином не розглядається та, у найкращому випадку, підмінюється на етапі проектування систем захисту інформації якісним аналізом надійності системи й можливих наслідків проникнення до неї [2, 3].

Отже, актуальність досліджень, спрямованих на подальший розвиток моделей та методів захисту на основі інтелектуального розпізнавання загроз інформаційно-комунікаційному середовищу транспорту та забезпечення ІБ галузі в умовах створення державної єдиної інтегрованої інформаційної системи, є однією з ключових проблем захисту інформації об'єктів критичної інфраструктури держави.

Постановка завдання. У зв'язку із цим мета статті полягає у викладенні методу та моделей розпізнавання загроз інформаційній безпеці, які, на відміну від існуючих, дозволяють прийняти остаточне рішення про наявність або відсутність загрози в межах існуючих та нових класів вторгнень у ІКСТГ.

Метод інтелектуального розпізнаванні загроз

Ступінь небезпеки кожної загрози ІКСТГ залежить від значень ряду факторів, що підвищують або знижують захищеність об'єкту інформаційної безпеки (ОІБ) від загрози певного класу, наприклад комп'ютерного вторгнення. Фактори, що знижують захищеність ОІБ, будемо називати факторами ризику, а ті, що підвищують її - факторами захищеності. Інтегральна оцінка уразливості й захищеності ОІБ є функцією його захищеності від кожного виду загроз. Інформація, яка є основою побудови ДПРЗ ІБ може бути подана в різних формах, зокрема, у вигляді важко з'ясовних ознак НСД $\{p_{ax1}, \dots, p_{axm}\}$ у ДЄПС та ІСТГ, діапазонів граничних значень, параметрів вхідного вихідного трафіка, непередбачуваних адрес пакетів, атрибутів, часових параметрів, запитів і т. д.

В роботі досліджена множина об'єктів PA - число можливих цілей порушника в ІКСТГ. Об'єкти цієї множини описуються системою ознак $\{p_{ax1}, \dots, p_{axm}\}$. Множина PA представлена у вигляді об'єднання непересічних підмножин (класів) загроз ІБ - $(KL_1, \dots, KL_l) = (B_{pa_1}, \dots, B_{pa_l})$, де B_{pa} - множина номерів загроз ІКСТГ, реалізованих порушником при досягненні pa -ї мети.

Існує остаточний набір об'єктів $\{sp_{a1}, \dots, sp_{am}\}$ з PA , про які відомо, до яких класів загроз вони належать (це прецеденти, тобто об'єкти, використовувані для навчання - ОВН). Потрібно за пред'явленим набором значень ознак, тобто описом деякого об'єкта sp_{an} з PA , про який невідомо, до якого класу він належить, визначити цей клас і, відповідно, вибудувати роботу СЗІ таким чином, щоб вона могла ефективно протидіяти загрози в межах даного класу.

Головною особливістю запропонованого методу інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ, є можливість одержання результату за відсутності інформації про функції розподілу значень ознак і за наявності малих навчальних вибірок.

Основним завданням побудови ДПРЗ є пошук інформативних підписів (або фрагментів описів) об'єктів, див. табл. 1.

Інформативними вважаються фрагменти, які відображають певні закономірності в описах об'єктів, використовуваних для навчання. У ДПРЗ ІБ інформативними вважаються такі фрагменти, які зустрічаються в описах об'єктів одного класу, але не зустрічаються в описах об'єктів інших класів загроз ІБ. Розглянуті фрагменти, зазвичай, мають змістовний опис у термінах проектування СЗІ ІКСТГ.

При побудові ДПРЗ ІБ введено поняття елементарного класифікатора, під яким розуміють фрагмент опису об'єкта, використовуваного для навчання (ОВН). Для кожного класу загроз ІБ $(KL_1, \dots, KL_l) = (B_{p_{a1}}, \dots, B_{p_{al}})$ будується множина елементарних класифікаторів із задалегідь заданими властивостями та, як правило, використовуються класифікатори, які зустрічаються в описах об'єктів одного класу й не зустрічаються в описах об'єктів інших класів, тобто характеризують лише деякі з ОВН даного класу загроз ІБ.

Таблиця 1

База знань для інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ

Класи загроз ІБ		Атрибути (Ознаки класу загроз)		Ознаки $\{p_{ax1}, \dots, p_{axn}\}$	Інформативність ознаки	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки	
Можливі загрози ІБ ІКСТГ	Відомі загрози	KL ₁	Відмова у обслуговуванні	.....	$I_{Z_{p_{axj}}}$	[0,1], у. о.	некритичний (нкр), критичний (кр)
		KL ₂	Викрадення інформації	.....	$I_{Z_{p_{axj}}}$	[0,1], у. о.	виявлені (в), частково невиявлені (чв), невиявлені (нв)
		
		KL _{MI}	.....	.....	.....	.....	.....
	Невідомі загрози	Описані	KLO ₂₁ – KLO _{2n}
		Неописані	KLN ₃₁ – KLN _{3m}

Таким чином, модель інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ, виглядає наступним чином.

1. У системі ознак $\{p_{a1}, \dots, p_{a_{jm}}\}$ виділяється сукупність різних підмножин виду $NP_{p_a} = \{p_{aj1}, \dots, p_{aj_{mi}}\}$, $r_{p_a} \leq MI$.

2. Виділені підмножини називаються опорними множинами, а вся їхня сукупність позначається через ΩMI .

3. Задаються параметри: po_{sp_a} - параметр, що характеризує значущість мети (об'єкта) sp_{ai} , $i=1, 2, \dots, PA$; $po_{NP_{pa}}$ - параметр, що характеризує значущість об'єкта опорної множини $NP_{pa} \in \Omega MI$.

4. Виконується процедура обчислення оцінок. Розпізнаваний об'єкт вторгнення sp_{an} порівнюється з кожним ОВН sp_{ai} за кожною опорною множиною.

5. Для кожного класу загроз ІКСТГ KL , $KL \in \{KL_1, \dots, KL_l\}$, обчислюється оцінка приналежності $\Gamma(sp_a, KL)$ об'єкта sp_a до класу KL , яка має вигляд:

$$\Gamma(sp_a, KL) = \frac{1}{|LW_{KL}|} \sum_{sp_{ai} \in KL} \sum_{NP_{pa} \in \Omega MI} po_{sp_a} \cdot po_{NP_{pa}} \cdot BN(sp_a, sp_{ai}, NP_{pa}), \quad (1)$$

де $|LW_{KL}| = |KL \cap \{sp_{a1}, \dots, sp_{aMI}\}|$.

Об'єкт sp_{an} належить до того класу, який має найбільшу оцінку.

6. Якщо класів з найбільшою оцінкою небагато, то відбувається відмова від розпізнавання. Для коректності цього алгоритму отримана наступна система лінійних нерівностей:

$$\Gamma(sp_{a1}, KL_1) > \Gamma(sp_{a1}, KL_2), \Gamma(sp_{aMI}, KL_1) > \Gamma(sp_{aMI}, KL_2), \Gamma(sp_{aMI_{i+1}}, KL_2) > \Gamma(sp_{aMI_{i+1}}, KL_1).$$

...

$$\Gamma(sp_{aMI}, KL_2) > \Gamma(sp_{aMI}, KL_1).$$

Рішення системи зводиться до вибору параметрів $po_{sp_{ai}}$ $i = 1, 2, \dots, PA$, та $po_{NP_{pa}}$, $NP_{pa} \in \Omega MI$. У разі, якщо система несумісна, знаходиться її максимальна спільна підсистема й з рішення цієї підсистеми визначаються значення параметрів $po_{sp_{ai}}$ і $po_{NP_{pa}}$.

Процедура розпізнавання загрози ІКСТГ для об'єкта $sp_a = (\alpha p_{a1}, \dots, \alpha p_{aMI})$, здійснюється на підставі розрахунків за побудованими елементарними кон'юнкціям. Показано, що найбільш економічним є використання алгоритму розрахунків кон'юнкцій за покриттями класу загроз ІБ ІКСТГ. Характеристична функція класу загроз ІБ KL_l - певна логічна функція F_{KL} , що ухвалює значення 0 на описах об'єктів $sp_{an} = (\alpha p_{an1}, \dots, \alpha p_{anMI})$ з KL_l і значення 1 на інших набо-

рах з E_{KL}^{MI} , тут E_{KL}^{MI} - множина усіх наборів довжини r_{p_a} . Покриттю класу KL_l відповідає припустима для $F_{\overline{KL}}$ кон'юнкція, тупиковому покриттю - максимальна для $F_{\overline{KL}}$ кон'юнкція. Припустима (максимальна) кон'юнкція \mathfrak{K} визначає приналежність об'єкта $sp_{an} = (\varphi_{an1}, \dots, \varphi_{anMI})$ класу $(KL_l) = (B_{p_{al}})$, якщо $(\varphi_{a1}, \dots, \varphi_{aMI}) \notin NI_{\mathfrak{K}}$.

Побудувати скорочену ДНФ логічної функції можна також шляхом перетворення кон'юнктивної форми вигляду $D_1 \wedge D_2 \wedge \dots \wedge D_u$, де $D_i = p_{ax1}^{\beta_{i1}} \vee p_{ax2}^{\beta_{i2}} \vee \dots \vee p_{axMI}^{\beta_{iMI}}$, $i = 1, 2, \dots, u$ реалізує функцію F_{KL} , β_{iMI} - елементи набору $B_{F_{\overline{KL}}}$, де $p_{ax}^{\alpha} = \bigvee_{\beta_i \neq \alpha_i} p_{ax}^{\beta}$.

Тоді кон'юнктивна форма набуває вигляду $D^*_1 \wedge D^*_2 \wedge \dots \wedge D^*_u$, де $D^*_i = \bigvee_{t \neq \beta_{i1}} p_{ax1}^{\eta} \vee \bigvee_{t \neq \beta_{i2}} p_{ax2}^{\eta} \vee \dots \vee \bigvee_{t \neq \beta_{iMI}} p_{axMI}^{\eta}$, $i = 1, 2, \dots, u$.

Таким чином, побудова множини елементарних класифікаторів для модельованого класу загроз ІКСТГ зводиться до такого: 1) задається характеристична функція; 2) будується ДНФ, що реалізує цю функцію. 3) обчислюється припустима (максимальна) кон'юнкція \mathfrak{K} , що визначає приналежність об'єкта до певного класу загроз ІКСТГ.

Для кожного класу кількість ознак варіювалася від 3 до 9. Інформативність ознаки змінювалася в діапазоні від -1 до +1. Для оцінки ефективності процедур розпізнавання використовувався метод козвного контролю.

Приклади результатів тестування продуктивності методу ДПРЗ показані на рис. 2-5.



Рисунок 2 - Ймовірність розпізнавання загрози «НСД до відеосервера»

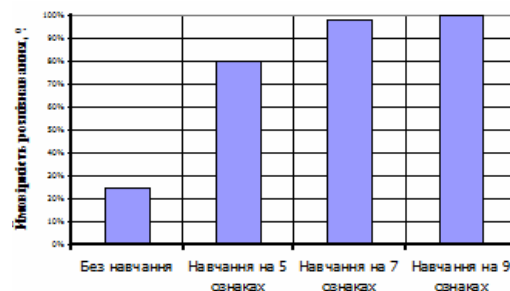


Рисунок 3 - Ймовірність розпізнавання загрози «НСД до пароля користувача»

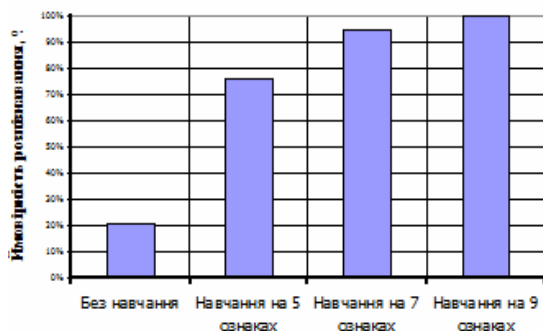


Рисунок 4 - Ймовірність розпізнавання загрози «НСД до ПЗ та БД ІС ТГ»

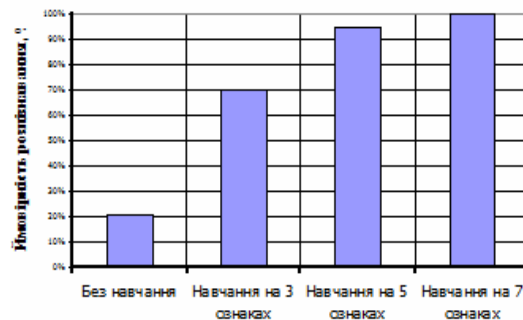


Рисунок 5 - Ймовірність розпізнавання загрози «НСД до систем супутникової навігації»

Для подальшого розв'язання проблеми розвитку моделей інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ, потрібно зосередитися на розгляді режимів роботи ДЄПС та ІСТГ у разі втрати заявок внаслідок блокування неоднорідних потоків ДПРЗ, які виникають при складних вторгненнях у ІКСТГ, або коли втрати з'являються через переповнення заявками у відповідних модулях підсистем клієнт-банк, електронних накладних, e-business, e-logistics, e-cargo, e-ticket, систем GSM-R, VSAT та ін.

Модель інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ в умовах неоднорідних потоків запитів при DDoS атаках

В даний час існує багато робіт, що розкривають різні підходи до моделювання інформаційних вторгнень: мережі Петрі, метод аналізу зміни станів, емуляція вторгнень в послідовному і паралельному режимах, концептуальні моделі комп'ютерних вторгнень, описові моделі мережі і зловмисників та інші [1-4].

Теоретичним підґрунтям таких моделей ПБ служить так звана основна теорема безпеки, яка формулюється і доводиться окремо для кожної моделі.

Дискреційна модель, що встановлює повноваження доступу користувачів, найбільше підтримує глобальну ПБ. Однак, вона є принципово не безпечною.

У цьому зв'язку актуальна розробка моделей розпізнавання загроз, які є моделями кінцевих станів по суті і дискреційними за формою.

Позначимо через N_A – множину номерів загроз ІБ ДЄПС та ІСТГ; D_{csi} – множину номерів засобів захисту (ЗЗІ), які можуть бути

використані в СЗІ ДЄПС та ІСТГ; B_{p_a} - множину номерів загроз ІБ, реалізованих порушником при досягненні p_a -ої мети; $N_j^{p_a}$ -множину номерів ЗЗІ, які потенційно можуть бути використані для протидії реалізації порушником p_a - ої мети на j -му рубежі захисту (для нейтралізації j -ї загрози, що входить в p_a -у ціль) ($p_a=1,2,\dots,PA$; $j=1,2,\dots,MI$). Причому, $B_{p_a} \subset N_A, \bigcup_{p_a=1}^{PA} B_{p_a} = N_A, n_{p_a} = |B_{p_a}|$ і

$\bigcup_{p_a=1}^{PA} \bigcup_{j \in B_{p_a}} N_j^{p_a} \subset D_{csi}$. В цьому випадку процес реалізації порушником

кожної зі своїх цілей може бути представлений у вигляді спрямованого графа, див. рис. 6.

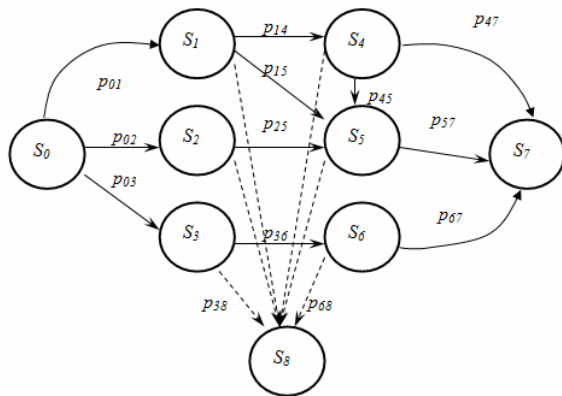


Рисунок 6 - Граф станів ДЄПС та ІСТГ табл. 2.

Для тестування продуктивності ДПРЗ та розробленої експертної системи, (див. рис. 7) обрана задача зіставлення загрозам DoS/DDoS вторгнень відомих методів захисту. База знань із 9 правил розрізняє 7 типів атак DoS/DDoS на основі відомих ознак, вхідних і додаткових атрибутів, що описують поточний стан системи (табл. 1,2).

Для кожного із співвідношень виду $D = f(\phi_i \vee y_1 \vee ..y_n)$, які описують певну тактику захисту від вторгнення, будуються нечіткі бази знань, які представляють сукупність нечітких правил «ЯКЩО-ТОДІ», що визначають взаємозв'язок між вхідними та вихідною змінними. За нечіткими базами знань складаються логічні рівняння.

Відповідно до запропонованого методу інтелектуального розпізнавання загроз, складемо базу знань для процедури складання вирішального правила при вторгненнях типу «Відмова у обслуговуванні» при неоднорідних потоках запитів у ДЄПС та ІСТГ, див.

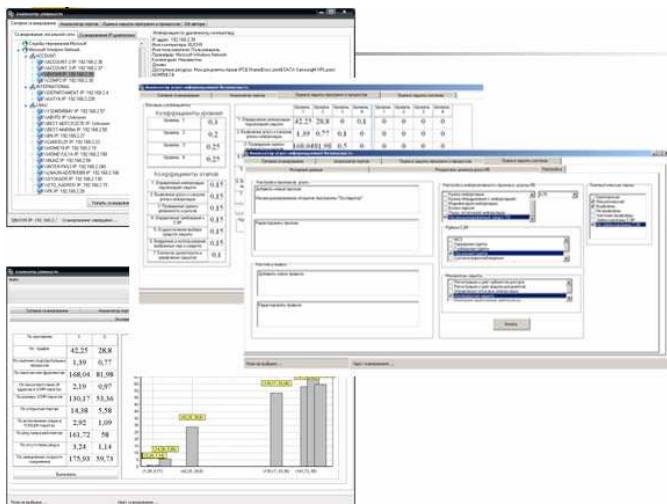


Рисунок 7 - Загальний вид програми «Аналізатор загроз»

Таблица 2

Ознаки при DDoS та DoS атаках у ІКСТГ

Частковий параметр стану ІС	Універсум	Терми для лінгвістичної оцінки
ϕ_1 – інтенсивність потоку кадрів (запитів), що поступають к серверам ІС	[10,6000], кадр/с	немає (н), незначна кількість (нк), середня кількість (ск), велика кількість (вк)
ϕ_2 – номінальна пропускна спроможність середовища передачі даних ІС	[10,100], Мбіт/с	низка (нпс), середня (спс), велика (впс)
...
ϕ_{13} - наявність HTTP GET пакетів	[0,1], у. о.	мала кількість (м), середня (с), велика (в)
ϕ_{14} - наявність HTTP flood пакетів	[0,1], у. о.	мала кількість (м), середня (с), велика (в)
...
ϕ_z - інші фактори		

Наприклад, скорочено систему логічних рівнянь, що відповідає співвідношенню для інтелектуального розпізнавання низькоактивних DDoS-атак прикладного рівня («повільний» HTTP GET flood і «повільний» HTTP POST flood), запишемо так:

$$\mu^{d_j}(S) = \bigvee_{p=1}^{h_j} [\mu^{y_1^{jp}}(y_1) \wedge \mu^{\phi_{13}^{jp}}(\phi_{13}) \wedge \mu^{\phi_{14}^{jp}}(\phi_{14})], \quad p = \overline{1, h_j}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

де $\mu^{y_1^{jp}}(y_1)$, $\mu^{\phi_{13}^{jp}}(\phi_{13})$, $\mu^{\phi_{14}^{jp}}(\phi_{14})$ – функції належності змінних y_1 , ϕ_{13} , ϕ_{14} до їх нечітких термів y_1^{jp} , ϕ_{13}^{jp} , ϕ_{14}^{jp} відповідно; S – стан захисту ІСТГ від атак DoS/DDoS; y_1 – стан ІБ {нижче за критичний (нкp), критичний (кp), вище за критичний (вкp), високий (в)}; \bigvee – логічне АБО, \wedge – логічне І, як операції *max* і *min* відповідно.

На рис. 8 показані основні результати, отримані в ході тестового моделювання процедури розпізнавання атак DoS/DDoS на ДЄІС та ІСТГ.

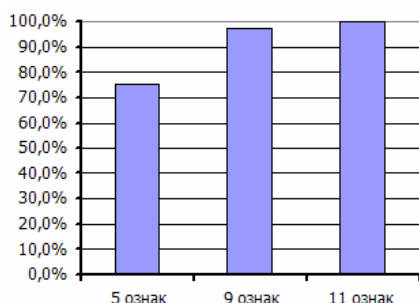


Рисунок 8 - Ймовірність виявлення DDoS-атак

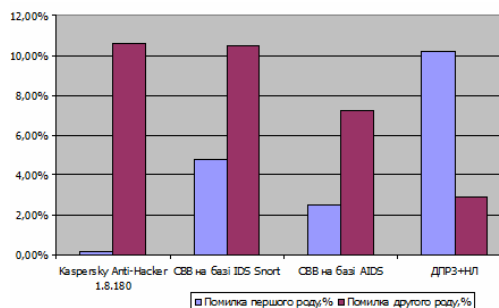


Рисунок 9 - Значення помилок виявлення DDoS-атак першого роду і другого роду для різних систем

В результаті означеного експерименту для розробленого методу інтелектуального розпізнавання DDoS/DDoS - атак були отримані наступні результати для помилок першого роду (кількість помилкових спрацьовувань) - 10,2%) і помилок другого роду (кількість невиявлених атак) - 2,9%, див. рис. 9.

Висновки

Робота присвячена дослідженню та розвитку теоретичних і методологічних питань захисту інформації у транспортній галузі України, розробці методів, моделей та програмних продуктів для забезпечення ІБ на транспорті в умовах формування єдиного інформаційно-комунікаційного середовища, створення державної єдиної інтегрованої інформаційної системи, впровадженні нових та модернізації існуючих ІСТГ, і збільшення кількості дестабілізуючих впливів на схоронність і цілісність інформації.

Основні результати досліджень полягають у такому:

1. Розроблено метод інтелектуального розпізнавання загроз на основі дискретних процедур з використанням апарату логічних функцій та нечітких множин, що дозволяє підвищити ефективність розпізнавання загроз ІКСТГ в залежності від класу до 85-98 %, створювати ефективні аналітичні, схемотехнічні та програмні рішення СЗІ ІКСТГ.

2. Удосконалено моделі інтелектуального розпізнавання загроз ІКСТГ в умовах реалізації комп'ютерних вторгнень «Відмова у обслуговуванні», з урахуванням можливостей зміни нападаючим інтенсивності неоднорідних потоків запитів. Запропоновані моделі, доведені до практичної реалізації шляхом створення відповідних програмних модулів, що дозволяє підвищити ефективність розпізнавання комп'ютерних вторгнень «Відмова у обслуговуванні» до 97-98 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вильский Г.Б. Информационные риски судовождения / Г.Б. Вильский // Наук. Вістник ХДМА - № 1(4) / Херсон: ХДМІ, 2012. - С.17-26.
2. Давиденко А.М. Аналіз дій загроз у автоматизованих системах обробки інформації / Давиденко А.М., Головань С.М., Щербак Л.М. // Моделювання та інформаційні технології Зб. наук. Пр. ІПМЕ НАН України. - 2006. - Вип. № 36 - С. 3-8.
3. Корниенко А.А. Средства защиты информации на железнодорожном транспорте. [учебное пособие] / Корниенко А.А. М.А. Еремеев, С.Е. Адагуров - М.: Маршрут. – 2006, 256 с.
4. Лахно В.А. Компьютерное моделирование DoS атаки на серверы компьютерных систем. / Лахно В.А., Петров А.С. // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал №2(25), 2011. С. 81-89.
5. Лахно В.А. Обеспечение защищенности автоматизированных информационных систем транспортных предприятий при интенсификации перевозок. Монография. / В.А. Лахно, А.С. Петров. - Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 280 с.

И.В. Добров, Н.Я. Гаркави, Е.Ф. Фёдоров,
В.В. Карпенко, И.В. Клименко, О.Н. Литвиненко
**К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
МОДЕЛЕЙ-АССОЦИАЦИЙ**

Анотація. На моделях-асоціаціях досліджуються ефекти, пов'язані з наявністю в системі сухого тертя. Знайдено траєкторію тіла, що рухається по похилій площині з початковою швидкістю, спрямованою поперек площини. Задача узагальнена на замет задніх коліс автомобіля в кривій при юзі. Показано, що в двохмасовій коливальній системі із сухим тертям можуть бути зафіксовані три «власні» частоти. Пояснено, чому при «скиданні з клинів» рухомого складу деякими датчиками можуть фіксуватися «зайві» резонансні частоти.

Постановка проблемы в общем виде

В своё время В.Л. Кирпичёв настоятельно рекомендовал пользоваться моделями, которые не представляют «точную картину физического явления», но «наводят на мысли и предположения о возможных явлениях» [1, с.369]. В данной статье показано, что, несмотря на наличие огромного количества лицензированных специализированных программных комплексов, для объяснения результатов, полученных в натурном эксперименте, иногда и сейчас целесообразно использовать эти предлагавшиеся В.Л. Кирпичёвым модели-ассоциации [2, с.42]).

Выделение части общей проблемы

Ниже приводятся объяснения эффектов, связанных с наличием трения скольжения. Как известно [3, с.26], сила трения покоя направлена против действующей на тело силы, а сила трения движения направлена против скорости тела:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = \begin{cases} -k \cdot Q \cdot (\vec{F}/|F|) & \Leftarrow (|v|=0) \wedge (|F| > k \cdot Q), \\ -\vec{F} & \Leftarrow (|v|=0) \wedge (|F| \leq k \cdot Q), \\ -k \cdot Q \cdot (\vec{v}/|v|) & \Leftarrow |v| \neq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где Q — сила нормального давления, \vec{v} и $|v|$ — скорость тела (векторная величина) и модуль скорости (скаляр), \vec{F} и $|F|$ — движущая сила (векторная величина) и модуль движущей силы (скаляр), k — коэффициент трения.

Постановка задачи 1

Пусть тело массой m находится в покое на наклонной плоскости (рис.1), угол наклона которой α . Тогда скатывающая сила, направленная вниз по наклонной плоскости, $F_{\text{ск}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$, наибольшая возможная сила трения $\max F_{\text{тр}} = k \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$, $k > \text{tg} \alpha$, фактическая сила трения $F_{\text{тр}} = m \cdot g \cdot \sin \alpha$ направлена против скатывающей силы. При этом вниз по наклонной плоскости скорость $v_x=0$ и перемещение $x=0$, а поперёк наклонной плоскости скорость $v_y=0$ и перемещение $y=0$.

Сообщим телу щелчком поперечную относительно наклонной плоскости скорость $v_y=v_0$ (количество движения $m \cdot v_0$). Определим траекторию тела.

Решение задачи 1

Сила трения теперь и в дальнейшем (пока тело движется) направлена против скорости (рис.2). Модуль скорости $|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, часть силы трения, действующая вниз вдоль наклонной плоскости, $F_{\text{тр}x} = -k \cdot m \cdot g \cdot (v_x/|v|) \cdot \cos \alpha$, часть силы трения, действующая в поперечном направлении, $F_{\text{тр}y} = -k \cdot m \cdot g \cdot (v_y/|v|) \cdot \cos \alpha$, ускорение тела вниз вдоль наклонной плоскости $a_x = (m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_{\text{тр}x})/m$, поперечное ускорение тела $a_y = F_{\text{тр}y}/m$. Уравнения движения тела по наклонной плоскости

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= v_x, \\
\dot{y} &= v_y, \\
\dot{v}_x &= \begin{cases} g \cdot \sin \alpha - k \cdot g \cdot \left(v_x / \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \right) \cdot \cos \alpha & \Leftarrow v_x^2 + v_y^2 \neq 0, \\ 0 & \Leftarrow v_x^2 + v_y^2 = 0, \end{cases} \\
\dot{v}_y &= \begin{cases} -k \cdot g \cdot \left(v_y / \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \right) \cdot \cos \alpha & \Leftarrow v_x^2 + v_y^2 \neq 0, \\ 0 & \Leftarrow v_x^2 + v_y^2 = 0 \end{cases}
\end{aligned} \quad (2)$$

при начальных условиях $x(0)=0$, $y(0)=0$, $v_x(0)=0$, $v_y(0)=v_0$. Траектория движения тела до полной остановки приведена на рис.3. График силы трения в течение всего времени движения тела приведен на рис.4. Зависимость от времени скоростей v_x и v_y приведена на рис.5. Что интересно (рис.4): сила трения в процессе движения постоянно меняет направление, при этом от времени $t < 0$ до времени $t = 0$ и от времени $t < t_{\text{кон}}$ до времени $t = t_{\text{кон}}$ скачком меняет величину ($t_{\text{кон}}$ — момент окончания движения).

Обобщение результатов задачи 1

Приведенное решение объясняет тот факт, что занос задних колёс при повороте автомашины наиболее вероятен, если колёса «идут юзом». Вращающееся без проскальзывания колесо имеет неподвижное относительно «земли» пятно контакта. В этом пятне сила трения препятствует поперечному движению колеса. При юзе в самом начале поперечного движения сопротивления поперечному движению нет, а затем при малой скорости поперечного движения и достаточно большой скорости проскальзывания сила трения мало препятствует заносу. Именно поэтому, чтобы прекратить занос, необходимо отпустить тормоза (а чтобы остаться на дороге, необходимо вывернуть руль в противоположную первоначальному направлению сторону).

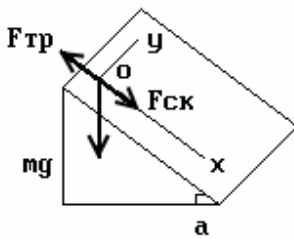


Рисунок 1 - Тело в состоянии покоя на наклонной плоскости.

$$|F_{тр}| = |F_{ск}| = m \cdot g \cdot \sin \alpha, \\ a \equiv \alpha.$$

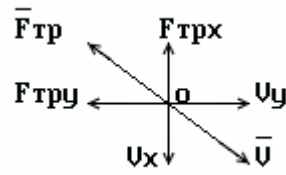


Рисунок 2 - Сила трения движения. Координаты x и y связаны с движущимся телом.

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \\ |F_{тр}| = k \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha.$$

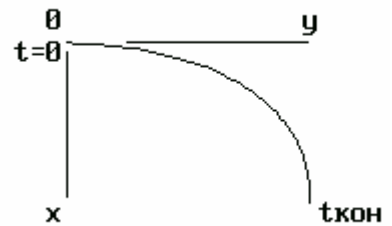


Рисунок 3 - Траектория тела.

Координаты x и y связаны с неподвижной точкой на наклонной плоскости.

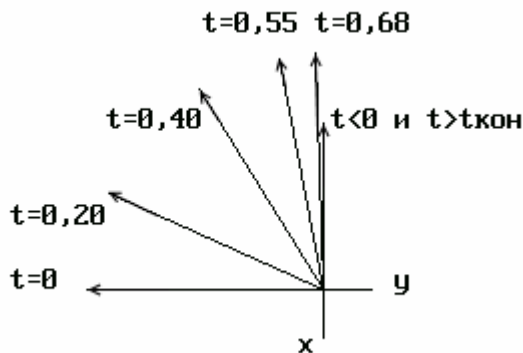


Рисунок 4 - Годограф силы трения.

$t_{кон} = 0,82$ сек. Координаты x и y связаны с движущимся телом. При $0 \leq t < t_{кон}$
 $|F_{тр}| = k \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$, при $(t < 0) \wedge (t \geq t_{кон})$
 $|F_{тр}| = m \cdot g \cdot \sin \alpha$

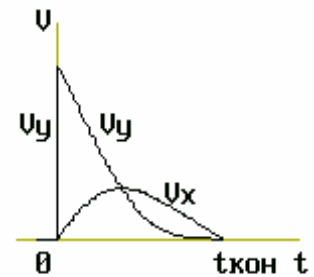


Рисунок 5 - Зависимость от времени скоростей v_x и v_y .

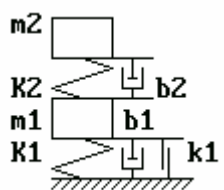
Постановка задачи 2

Согласно требованиям нормативной литературы [4, с.3; 5, с.3] в испытаниях тягового подвижного состава, называемых «сбрасыванием с клиньев», определяются собственные частоты и декременты основных форм колебаний (подпрыгивания, галопирования и боковой качки). Испытуемый экипаж при «сбрасывании с клиньев» заезжает на подложенные под его колеса клинья и, сбросив тягу, «соскакивает» с них на рельсы. Преобразование Фурье от переходных функций, зафиксированных датчиками, предлагается считать передаточными функциями испытуемой механической системы [6, с.20; 7, с.43] (что безусловно верно только для линейной системы, в то время, как под-

вижной состав в первой ступени подвешивания обычно содержит фрикционные гасители колебаний).

Решение задачи 2

Ниже на простейшем примере показано, что описанным выше способом в двухмассовой системе, содержащей фрикционный гаситель, (рис.6) некоторыми датчиками могут быть зафиксированы три «собственные» частоты. Частота f_3 на рис.7 — это собственная частота второй парциальной системы, с которой колеблется масса m_2 после заклинивания фрикционного гасителя в первой парциальной системе (отметим, что некоторые датчики системы фиксируют ещё и низкую частоту f_4 (рис.8), соответствующую времени колебаний фрикционного гасителя до заклинивания и связанную с величиной возбуждения).



$$F_d = \beta_1 \dot{x}_1 + \beta_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_1 x_1 + K_2 (x_1 - x_2) - F(t),$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = \begin{cases} -F_d - kQ \text{sign}(\dot{x}_1) & \Leftarrow \dot{x} \neq 0, \\ -(F_d - kQ \text{sign}(F_d)) & \Leftarrow (\dot{x} = 0) \wedge (|F_d| > kQ), \\ 0 & \Leftarrow (\dot{x} = 0) \wedge (|F_d| \leq kQ), \end{cases}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = \beta_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_2 (x_2 - x_1).$$

Рисунок 6 - Двухмассовая система

$m1$ и $m2$ — массы m_1 и m_2 ; $b1$ и $b2$ — вязкости β_1 и β_2 ; $K1$ и $K2$ — жёсткости K_1 и K_2 ; $k1$ — коэффициент трения k ; $x_1(t)$ и $x_2(t)$ — перемещения масс m_1 и m_2 относительно «земли»; $F(t)$ — силовое возбуждение, приложенное к m_1 .

Обобщение результатов задачи 2

Несмотря на наличие нелинейности, результаты обработки «сбрасывания с клиньев», справедливые только для линейных систем, дают достаточно информации о резонансных частотах и демпфировании в механической конструкции. Отметим, что частоты f_1 и f_2 (рис.7) при случайном возбуждении являются резонансными для «больших» колебаний (с незаклиненным фрикционным гасителем и соответственно с достаточно большими амплитудами), а частота f_3 является резонансной для «малых» колебаний с заклиненным фрикционным гасителем.

Выводы

Результаты математического моделирования на моделях-ассоциациях дают достаточно информации для понимания эффектов, зафиксированных в натуральных испытаниях.

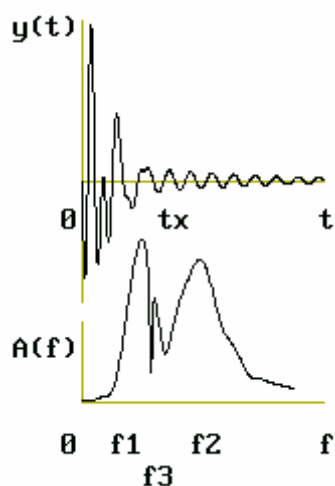


Рисунок 7 - «Переходная» функция $y(t)=(x_2(t)-x_1(t))$ и АЧХ $A(f)$ процесса $y(t)$.
 f — частота, t_x — момент заклинивания
фрикционного гасителя

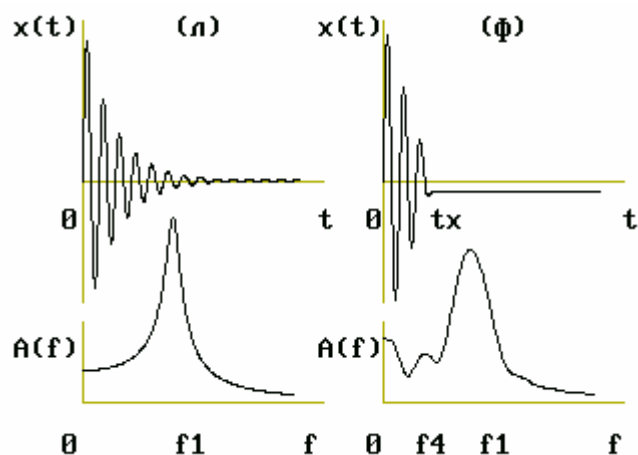


Рисунок 8 - Сравнение «переходных» функций и АЧХ одномассовых систем: линейной системы (л) и системы с фрикционным гасителем (ф).

Величина f_4 связана с величиной начальной скорости массы m . $A(0)$ связана с величиной $x(t_x)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесъды о механикѣ В.Л. Кирпичёва. [Текст] – С.-Петербургъ: Изданіе К.Л. Риккера, 1907. – 371 с.
2. Гаркави Н.Я. К вопросу о формализации физического моделирования поведения механических конструкций на подобных моделях. [Текст] /Гаркави Н.Я., Литвиненко О.Н., Добров И.В. // Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця: ВДАУ, 2005. - №4(42). - С.39-44.
3. Добров И.В. Вероятностный подход к математическому моделированию физических процессов. [Текст] /Добров И.В., Гаркави Н.Я., Гаркави О.Н. // Вибрации в технике и технологиях. Всеукраинский научно-технический журнал. – Винница: ВГАУ, 2002. - №5(26). - С.25-27.
4. СТ ССФЖТ ЦТ 15-98. Стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний локомотивов.

[Текст] - М.: МПС России. Введен в действие 15.02.99 г. указанием МПС России №Г-165у. - 26 с.

5. СТ ССФЖТ ЦТ 16-98. Стандарт системы сертификации на федеральном железнодорожном транспорте. Тяговый подвижной состав. Типовая методика динамико-прочностных испытаний электропоездов и дизель-поездов. [Текст] - М.: МПС России. Введен в действие 17.11.99 г. указанием МПС России №А-2641у. - 25 с.
6. Блохин Е.П. Прогнозирование наиболее опасных режимов ходовых испытаний подвижного состава. [Текст] /Блохин Е.П., Коротенко М.Л., Мямлин С.В. и др. // Вестник машиностроения. – М.: «Издательство “Машиностроение”», США: «Аллертон Пресс», 2003. - №7. - С.20-23.
7. Приходько В.И. Использование преобразования Фурье при обработке результатов натурных испытаний подвижного состава. [Текст] /Приходько В.И., Мямлин С.В., Фёдоров Е.Ф., Гаркави Н.Я. // XVI международная конференция. Математика. Экономика. Образование. V международный симпозиум. Ряды Фурье и их приложения. Тезисы докладов. - Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008. - С.43-44.

В.П. Малайчук, И.И. Деревянко

ОБРАБОТКА ИСКАЖЕННЫХ МОДУЛИРУЮЩЕЙ ПОМЕХОЙ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

Аннотация. Исследованы возможности уменьшения влияния контактной (модулирующей) помехи на оценки неизвестного параметра различными методами обработки экспериментальных измерений при недостатке априорных знаний об их статистических закономерностях.

Ключевые слова: модулирующая помеха, метод оценивания, выборка измерений, гистограмма оценок, среднее значение, разброс.

Постановка задачи

В задачах ультразвукового неразрушающего контроля имеют место искажения измерений не только электронными шумами, но и за счет случайных изменений неконтролируемого контакта между пьезопреобразователем и поверхностью контролируемого объекта. Если измеряется параметр b , то модель измерений в этом случае записывается выражением

$$x(k) = m(k)b + n(k), \quad (1)$$

где b - измеряемый параметр; k - номер измерений; $m(k)$ - контактная (модулирующая) помеха; $n(k)$ - измерительный шум с плотностью распределения вероятностей Гаусса; $x(k)$ - измерение.

Располагая выборкой независимых измерений $x(k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, необходимо оценить параметр b . Метод решения этой задачи известен, если известны статистические закономерности измерений. Это метод максимума функции правдоподобия [1, 2]. Контактная помеха изменяется от нуля до единицы и в качестве модели ее статистической закономерности можно использовать закон бета-распределения вероятностей

$$W(m) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} m^{\alpha-1} (1-m)^{\beta-1}, \quad (2)$$

где $\Gamma(\alpha)$, $\Gamma(\beta)$ - гамма функции.

В работе [3] представлены результаты исследования параметров статистической модели модулирующей помехи при экспериментальном ультразвуковом контроле. Показано, что статистические закономерности контактных помех можно описывать бета-распределением с параметрами $4 \leq \alpha \leq 6$ и $1 \leq \beta \leq 2$.

Располагая этими априорными данными и выборкой независимых измерений $x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_N$, необходимо оценить неизвестный параметр b и исследовать ошибки оценивания, если неизвестны параметры закона распределения вероятности измерений.

Разработка алгоритмов оценивания параметров по выборкам измерений, искаженных помехами

Рассмотрим сначала вариант оценки, когда измерительным шумом можно пренебречь. В этом случае закон распределения измерений запишется в виде

$$W(x_k/b) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{b\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{x_k}{b}\right)^{\alpha-1} \left(\frac{b-x_k}{b}\right)^{\beta-1}. \quad (3)$$

Располагая независимой выборкой измерений, сформируем условную логарифмическую функцию правдоподобия

$$L(|x_k|/b) = \sum_{k=1}^N \ln(W(x_k/b)), \quad (4)$$

приравняв ее производную к нулю и, решив это уравнение, получим оценку измеряемого параметра в виде

$$b^* = \frac{\alpha + \beta - 1}{\alpha \cdot N} \sum_{k=1}^N x_k. \quad (5)$$

Учитывая, что математическое ожидание $M[x_k]$ и дисперсия $D[x_k]$ равны

$$M[x_k] = \frac{\alpha b}{\alpha + \beta}, \quad D[x_k] = \frac{b^2 \alpha \beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)}, \quad (6)$$

для вычисления математического ожидания оценки b^* и ее дисперсии получим формулы

$$M[b^*] = \frac{\alpha + \beta - 1}{\alpha + \beta} b, \quad D[b^*] = \frac{b^2 \beta (\alpha + \beta - 1)^2}{\alpha N (\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)}. \quad (7)$$

Из их рассмотрения следует, что оценка по методу максимума функции правдоподобия смещенная, а дисперсия зависит от величин

ны измеряемого параметра и чем больше параметр, тем больше разброс оценок. Формулы для несмещенной оценки и ее дисперсии запишутся в виде

$$b_H^* = \frac{1}{N} \frac{\alpha + \beta}{\alpha} \sum_{k=1}^N x_k, \quad D[b_H^*] = \frac{b^2 \beta}{\alpha N (\alpha + \beta + 1)}. \quad (8)$$

При наличии измерительного шума, используя метод максимума гауссовой условной функции правдоподобия

$$L(|x|/b|m) = -\left(N \ln(\sqrt{2\pi}\sigma)\right) - \sum_{k=1}^N \frac{(x_k - bm_k)^2}{2\sigma^2}, \quad (9)$$

приравняв ее производную к нулю, получим уравнение вида

$$\sum_{k=1}^N (x_k - bm_k) m_k = 0. \quad (10)$$

Определим его условное математическое ожидание и решим уравнение

$$\sum_{k=1}^N M(x_k m_k) - bM(m_k^2) = 0. \quad (11)$$

Учитывая, что математические ожидания равны

$$M[m_k] = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}, \quad D[m_k^2] = \frac{\alpha^2}{(\alpha + \beta)^2} + \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)}, \quad (12)$$

получим оценку

$$b^* = \frac{\alpha + \beta + 1}{(\alpha + 1)N} \sum_{k=1}^N x_k. \quad (13)$$

Эта оценка тоже смещенная. Ее математическое ожидание и дисперсия будут равны

$$M[b^*] = \frac{\alpha(\alpha + \beta + 1)}{(\alpha + 1)(\alpha + \beta)} b, \quad D[b^*] = \frac{(\alpha + \beta + 1)^2}{N(\alpha + 1)^2} \left(\frac{b^2 \alpha \beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} + \sigma^2 \right). \quad (14)$$

Несмещенная оценка и ее дисперсия будут равны

$$b_H^* = \frac{1}{N} \frac{\alpha + \beta}{\alpha} \sum_{k=1}^N x_k, \quad D[b_H^*] = \frac{(\alpha + \beta)^2}{N\alpha^2} \left(\frac{b^2 \alpha \beta}{(\alpha + \beta)^2 (\alpha + \beta + 1)} + \sigma^2 \right). \quad (15)$$

Рассмотрим теперь оценивание в условиях полной неопределенности, полагая неизвестными параметры α и β , и пренебрегая наличием измерительного шума. Используя выборку логарифма измерений $\ln[x(k)]$ и метод наименьших квадратов, оценим логарифм $\ln(b)$. Средний квадрат ошибки по выборке $\ln[x(k)]$ запишется в виде

$$\Delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\ln(x_k) - \ln(b))^2. \quad (16)$$

Приравняв производную к нулю, получим уравнение оценивания

$$\sum_{k=1}^N (\ln(x_k) - \ln(b))^2 = 0 \quad (17)$$

и оценку параметра

$$b^* = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \ln(x_k)\right). \quad (18)$$

Рассмотрим второй метод решения этой задачи. Максимальное значение, которое может принять случайная величина, описываемая бета-распределением, равна единице, а для закона распределения $W(x/b)$ граничное значение x равно b , а наиболее вероятное зависит от параметров закона α и β и равно

$$x_H = \frac{\alpha - 1}{\alpha + \beta - 2} b. \quad (19)$$

Из рассмотрения (19) следует, что измеряемый параметр b , если $\beta = 1$, равняется $x_H = x_{\max}$, где x_{\max} - максимальное значение, среди измерений в рассматриваемой выборке, может служить оценкой параметра $b^* = x_{\max}$. Если $\beta = 2$, то наиболее вероятное измерение равняется $x_H = b(\alpha - 1)\alpha^{-1}$. Так как $x_{\max} > x_H$, а $(\alpha - 1)\alpha^{-1} < 1$, то при больших α максимальное измерение x_{\max} также может служить оценкой неизвестного параметра $b^* = x_{\max}$, если $\beta < \alpha$. Статистические закономерности x_{\max} неизвестны. Информацию о них можно получить путем проведения вычислительных экспериментов, по результатам которых можно сделать выводы и предложить практические рекомендации.

Рассмотрим еще одну возможность решения задачи при полной неопределенности о статистических закономерностях измерений, используя метод моментов. Начальные моменты бета-распределения зависят от измеряемого параметра b и от неизвестных коэффициентов α и β и равны

$$M_i = \frac{B(\alpha, \beta + i)}{B(\alpha, \beta)}, \quad (20)$$

где $B(x, y)$ - бета-функция; i - порядок момента.

Первые три момента $M_i[x]$ можно представить в виде

$$M_1 = \frac{b\alpha}{\alpha + \beta}, \quad M_2 = M_1 \frac{b(\alpha + 1)}{\alpha + \beta + 1}, \quad M_3 = M_2 \frac{b(\alpha + 2)}{\alpha + \beta + 2}. \quad (21)$$

Если моменты известны, то эти формулы можно рассматривать как систему нелинейных уравнений с неизвестными b , α и β . Запишем их в виде

$$b = M_1 \frac{(\alpha + \beta)}{\alpha}, \quad \frac{(\alpha + \beta)(\alpha + 1)}{\alpha(\alpha + \beta + 1)} = \frac{M_2}{M_1^2} = A_1, \quad \frac{(\alpha + \beta)(\alpha + 2)}{\alpha(\alpha + \beta + 2)} = \frac{M_3}{M_1 M_2} = A_2. \quad (22)$$

Последние два уравнения после нелинейных преобразований можно упростить

$$\beta = \frac{(A_2 - A_1)(\alpha + 1)(\alpha + 2)}{A_1(\alpha + 2) - A_2(\alpha + 1)}, \quad \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = \frac{2A_1 - A_2 - 1}{A_1 A_2 + A_1 - 2A_2}. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) следует, что для оценки параметра b^* можно использовать формулу

$$b^* = \frac{M_1^*(A_1^* A_2^* + A_1^* - 2A_2^*)}{2A_1^* + A_2^* - 1}, \quad (24)$$

где M_1^* , A_1^* и A_2^* определяются через оценки трёх начальных моментов.

Анализ результатов вычислительных экспериментов

Теоретические результаты исследований и эффективность оценивания параметра b определялись путём проведения вычислительных экспериментов. При помощи генераторов формировались выборки размером $N = 10, 25, 50$ измерений случайных величин с бета-распределениями параметрами $b = 10, \alpha = 5, \beta = 1, 2$. По этим выборкам оценивался параметр b^* , строились гистограммы оценок, определялись выборочные значения средних и их нормированные разбросы (отношение корня квадратного из выборочной дисперсии к среднему значению) и влияние на них размеров выборок измерений. Для анализа результатов вычислительного эксперимента использовался визуально-аналитический метод представления экспериментальных данных.

Результаты исследования несмещенных оценок методом максимума функции правдоподобия с известными значениями парамет-

ров законов распределения помех без учета измерительного шума представлены на рисунке 1 и в таблице 1. Их можно рассматривать как эталоны сравнения.

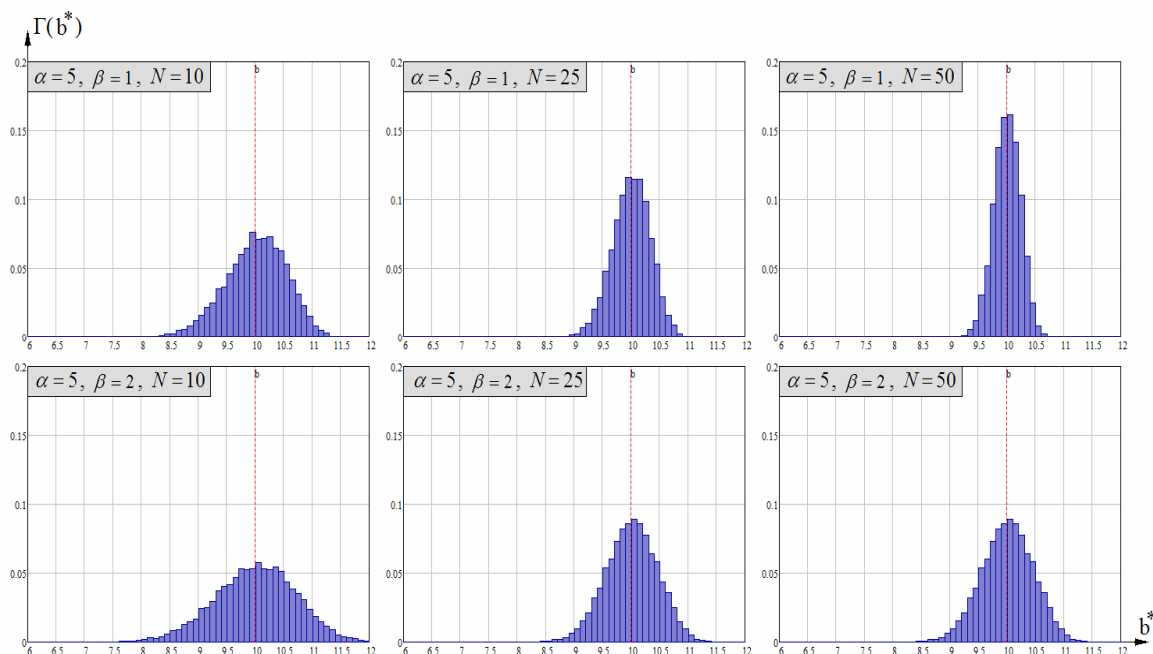


Рисунок 1 – Гистограммы несмещенных оценок b^* , полученных методом максимума функции правдоподобия

Таблица 1

Среднее \bar{b}^* и нормированный разброс $\Delta b^*/\bar{b}^*$ оценок параметра b

$b=10$			смещенная			несмещенная		
			$N=10$	$N=25$	$N=50$	$N=10$	$N=25$	$N=50$
$\alpha=5 \beta=1$	\bar{b}^*	теорет	8,333			10		
		экспер	8,378	8,328	8,342	10,054	9,993	10,01
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	теорет	0,0534	0,0337	0,0240	0,0535	0,0338	0,0239
		экспер	0,0534	0,0346	0,0249	0,0536	0,0346	0,0246
$\alpha=5 \beta=2$	\bar{b}^*	теорет	8,571			10		
		экспер	8,539	8,556	8,599	9,962	9,982	10,032
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	теорет	0,0707	0,0447	0,0315	0,0707	0,0447	0,0316
		экспер	0,0737	0,0465	0,0331	0,0737	0,0456	0,0330

Как видно, оценки смещенные, а несмещенные оценки близки к измеряемому параметру и их нормированный разброс уменьшается в 1,41,6 раза при увеличении размеров выборок. Нормированный разброс оценок тоже увеличивается в 1,35 при увеличении параметра β от 1 до 2.

На рисунке 2 и в таблице 2 представлены результаты вычислительного эксперимента в условиях полной неопределенности о статистических закономерностях измерений без учета измерительного шума методом наименьших квадратов логарифма оцениваемого параметра.

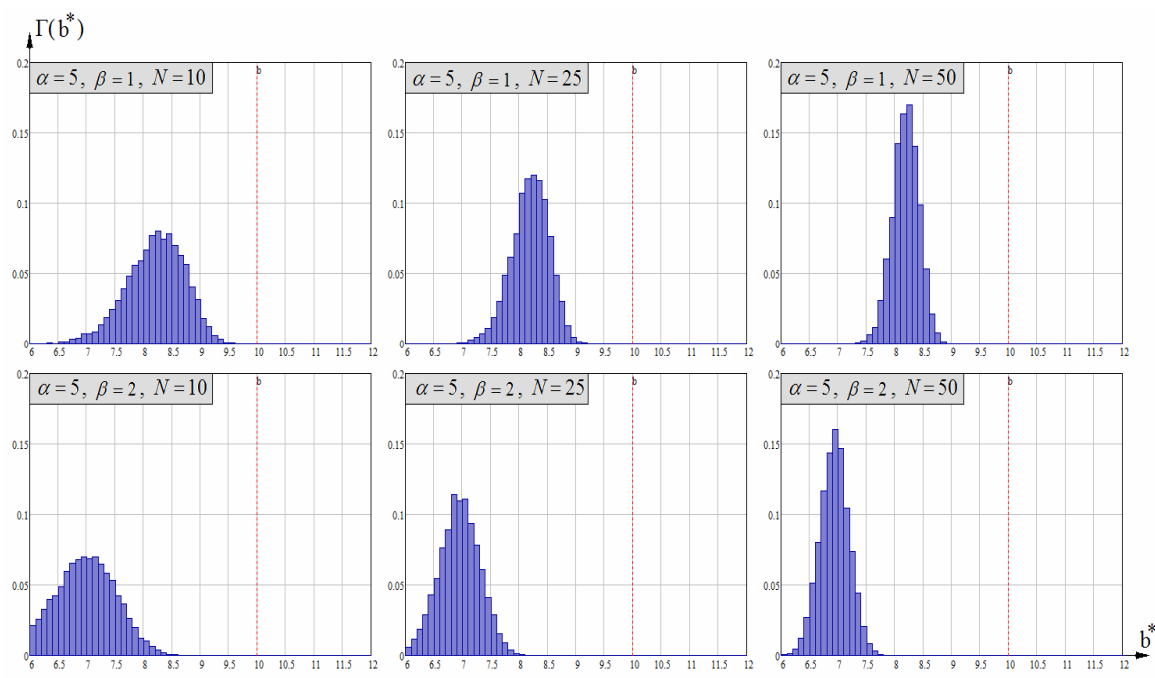


Рисунок 2 – Гистограммы оценок b^* , полученных методом наименьших квадратов логарифма

Таблица 2

Среднее \bar{b}^* и нормированный разброс $\Delta b^*/\bar{b}^*$ оценок параметра b

b=10		N=10	N=25	N=50
$\alpha=5 \beta=1$	\bar{b}^*	8,21	8,2	8,191
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,0619	0,0399	0,0283
$\alpha=5 \beta=2$	\bar{b}^*	6,959	6,941	6,935
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,0808	0,0514	0,0370

При использовании этого метода имеют место большие ошибки за счет смещения среднего значения от величины измеряемого параметра. При $\beta = 1$ оценки незначительно отличаются от смещенных оценок, полученных методом максимума функции правдоподобия. При $\beta \geq 2$ ошибки оценок за счет смещения резко увеличиваются.

На рисунке 3 и в таблице 3 представлены гистограммы оценок, их средние значения и нормированный разброс при нескольких параметрах β , полученные методом измерения максимальных значений выборок. При их использовании следует учитывать большое влияние параметра бета-распределения β на смещение и разброс.

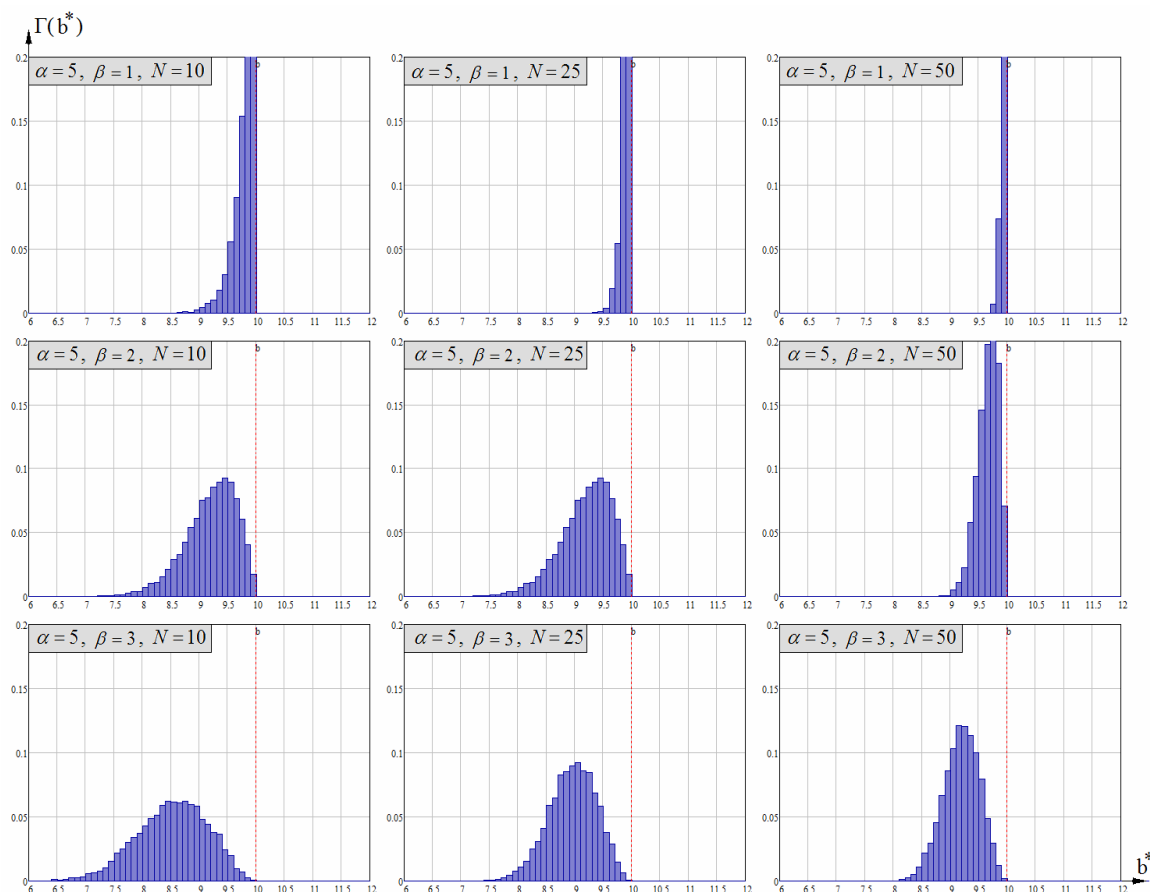


Рисунок 3 – Гистограммы оценок b^* , полученных методом максимума

Таблица 3

Среднее \bar{b}^* и нормированный разброс $\Delta b^*/\bar{b}^*$ оценок параметра b

b=10		N=10	N=25	N=50
$\alpha=5 \beta=1$	\bar{b}^*	9,807	9,921	9,96
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,0200	0,0079	0,0039
$\alpha=5 \beta=2$	\bar{b}^*	9,2	9,507	9,663
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,0487	0,0286	0,0190
$\alpha=5 \beta=3$	\bar{b}^*	8,513	8,953	9,189
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,0715	0,0462	0,0344

Как следует из анализа табличных данных, при значениях параметра $\beta \leq 2$ смещение отрицательное и не превышает $0,05b$, а разброс меньше $0,03b$ при $N \geq 25$. При $\beta \geq 3$ смещения оценок увеличивается и их значения мало отличаются от смещений метода наименьших квадратов.

Результаты исследования оценок по экспериментальным данным методом моментов представлены на рисунке 4 и в таблице 4.

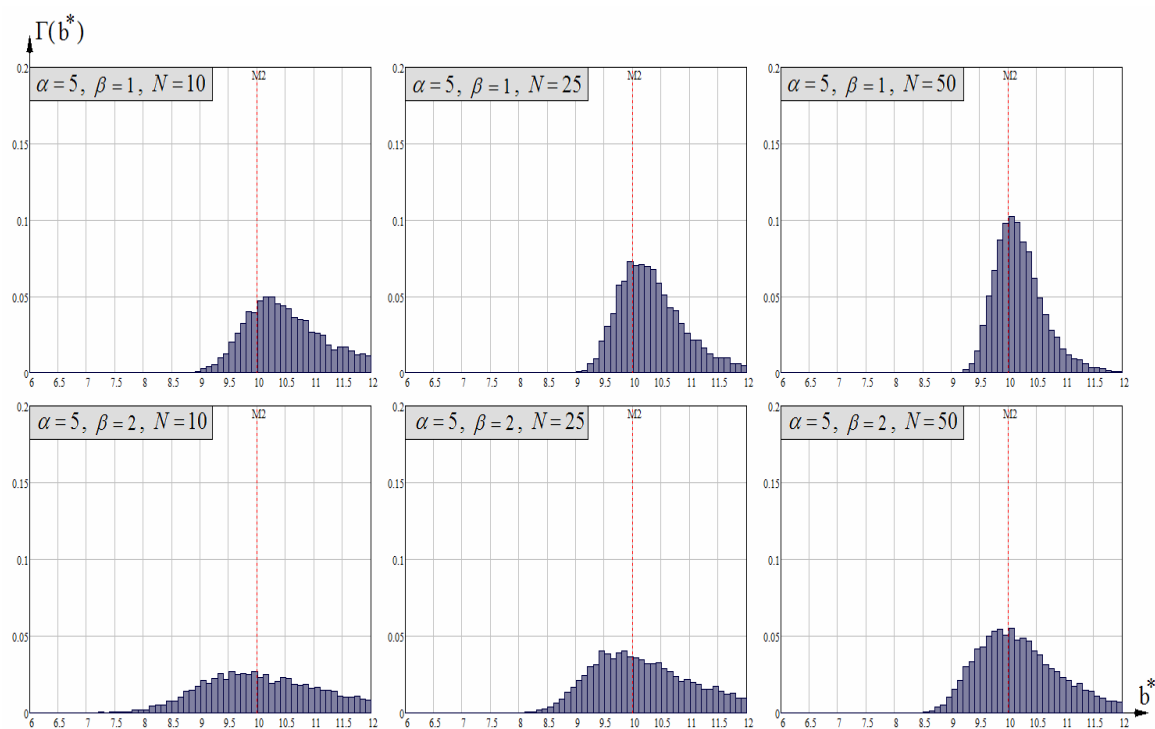


Рисунок 4 – Гистограммы оценок b^* , полученных методом моментов

Таблица 4

Среднее \bar{b}^* и нормированный разброс $\Delta b^*/\bar{b}^*$ оценок параметра b

b=10		N=10	N=25	N=50
$\alpha=5 \beta=1$	\bar{b}^*	10,817	10,428	10,205
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,1130	0,0749	0,0460
$\alpha=5 \beta=2$	\bar{b}^*	10,607	10,551	10,349
	$\Delta b^*/\bar{b}^*$	0,1463	0,1281	0,0953

При тех же условиях ($\beta \leq 2$ и $N \geq 25$) смещения положительные и не превышают $0,05b$, а разбросы меньше $0,1b$, что в 3 раза больше, чем разброс оценок по методу максимума измерений выборки.

Выводы

По результатам визуально-аналитического анализа гистограмм оценок измеряемого параметра и их статистических характеристик (средних значений и нормированных разбросов), представленных в виде графиков и таблиц, можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1) оценивание путем измерения максимального значения в выборке является наиболее эффективным и высокоточным, если есть уверенность, что параметр β гамма-распределения не превышал 2;

2) на втором месте из-за разброса измерений находится оценивание параметра b методом моментов в условиях полной неопределенности про статистические закономерности измерений;

3) учитывая, что в смещениях этих двух оценок различные знаки (больше и меньше измеряемого параметра), предлагается использовать в качестве обобщенной оценки их среднее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маєвський С.М. Основа побудови систем аналізу сигналів у неруйнівному контролі / СМ. Маєвський, В.П. Бабак., Л.М. Щербак // Навчальний посібник – К.: Либідь, 1993. – 200 с.
2. Білецький А.Я. Оцінювання частоти дискретно-експоненціального сигналу на фоні корельованого шуму / А.Я. Білецький, Д.С. Дем'яник // Наукоємні технології, 2012. № 1 (13). – с. 39-44.
3. Михайленко В.І. Статична обробка інформації в процесі ультразвукового контролю / В.І. Михайленко, Б.М. Сарафанюк, С.М. Клименко // Технологія будівництва нафтових і газових свердловин та автоматизація виробничих процесів: зб. наук. праць. – К.: Наукова думка, – 1999. – Вип.1. – с. 110-115.

SUBSYSTEM STABILIZATION APPROACH TO ROBUST DECENTRALIZED INVENTORY CONTROL IN SUPPLY NETWORKS

Abstract. A problem of the robust decentralized inventory control strategy synthesis for supply networks under uncertain external demand and transport time-delays and with presence of asymmetric structural constraints on states and controls is considered. Decentralized control is designed in the form of linear non-stationary feedback with respect to deviation of the current stock level from the chosen safety level and is based on solving convex optimization problems of subsystems dimension. Solvability conditions of the synthesis problem are stated in the form of linear matrix inequalities and reduced to solving semidefinite programming and one-dimensional convex optimization problems. To analyze the stability of the controlled supply network with decentralized controllers the comparison method and mathematical tool of vector Lyapunov functions is used.

Keywords: supply network, inventory control, invariant ellipsoids method, linear matrix inequality, semidefinite programming, comparison method, vector Lyapunov function.

Introduction

A supply network is a complex system consisting of interconnected agents which is engaged in the extraction of raw materials, production, storage, transportation and distribution of products to satisfy consumer demand [1]. Supply network may be represented as a directed graph with vertices corresponding to the network nodes which define types and volumes of controllable inventory and arcs which are controllable and uncontrollable flows in the network. Controllable flows describe processes of resource reprocessing and redistributing between network nodes and external supply processes for raw materials. Uncontrollable flows describe the resource demand formed by external consumers.

Operation of production links associated with supply network nodes and influence of demand from external consumers make resource

stock in the network nodes change with time. This leads to the need in control methods for supply networks to construct optimal inventory control strategies, with various uncertainty factors taken into account. We take a supply network control strategy as a structure of rules of determining instants and volumes of the resupply order.

In terms of supply network control, it is reasonable to consider volumes of demand on the resources that are received at the network nodes from the external environment as external disturbances. The choice of inventory control model is defined by nature of demand. At present, the inventory control strategy with the given demand model is synthesized using the Model Predictive Control [2].

In practice, generally, there is no information for constructing a proper model of external demand needed to construct the predictive control. One of approaches to the solution of the inventory control problem under demand uncertainty is use of the concept of "unknown, but bounded" inputs [3]. The respective demand model is characterized by the interval uncertainty.

Analysis of recent research and publications

Most of the procedures for the analysis and synthesis of automatic control systems in recent decades were developed using a centralized approach, where all the information about the current system state is transferred to a single regulator, which formed the control actions for all system nodes. A lot of results on the stability and robustness of centralized control algorithms, recently obtained [4].

However, a centralized approach to the construction of the control system is characterized by significant computational complexity and the need a centralized system for collecting information. Therefore, for the control problems of supply networks the decentralized approach is perspective, in which the original optimization problem is replaced by a set of local problems of smaller dimension that can be solved in parallel and independently. At once, it is necessary to ensure the robust stability of the whole system, taking into account the availability of relationships.

Main attention focuses on the problem of robustness of a decentralized control structure [5, 6]. Synthesis of stabilizing control algorithms in the form of a static output feedback was performed with the help of Lyapunov's function using the estimate of the upper bound of

non-linear terms or relationships between local subsystems using the estimate of the upper bound of non-linear terms or relationships between local subsystems. To get the results that are acceptable from the point of view of computational complexity, the stability conditions are formulated using the technique of Linear Matrix Inequalities (LMI) [7]. However, in this approach, decentralized control is found by solving the optimization problem whose dimension is determined by the dimension of the complete system.

To reduce the dimension of decentralized control problem for large-scale systems synthesis the concept of a diagonal or block-diagonal dominance can be applied. Using of this concept, in [8] an approach to the synthesis of decentralized control is proposed, which is based on the method of equivalent subsystems. Initially, a suitable method of synthesis decentralized controllers has been developed as a technique in the frequency domain on the basis of the Nyquist method. In this work an approach similar to the method of equivalent subsystems used for the synthesis of decentralized control in the state space. The main advantage of these approaches is that the static output feedback, providing robust stability and given performance values, is constructed for the individual subsystems, which reduces the dimension of the problem to the dimension of the subsystems. In this case, the estimates of the degree of subsystems stability obtained as a result of the optimization problem solution are considered as constraints on the level of the relationships between the subsystems. However, in this approach in the model does not take into account the structural constraints, as well as external disturbances, while they are highly significant for supply networks control.

A characteristic feature of the inventory control problem is the presence of transport time-delays caused by delays in replenishment about the moment of ordering. Also it should be noted that in the works devoted to the problem of suppression of bounded external disturbances, LMI technique is usually applied to suppress disturbances that are limited in some norm. While the specifics of the inventory control problem is a non-negative values of variables that leads to the presence of asymmetric constraints on values of the states and control actions.

The aim of this work is the synthesis of robust decentralized inventory control strategy for supply network under the action of an unknown, but bounded external demand and transport delays with the de-

efined structural constraints on the states and control actions.

Problem formulation

Consider the supply network S , consisting of interconnected nodes $S_i, i = \overline{1, N}$, each of which is multinomenclature system, described by the discrete state-space model. As the state variables available inventory levels of resources are considered. Control actions are orders volumes for the resources supply, which are formed by nodes in the current period, as well as external disturbances is the demand orders, which arrive at the network nodes from the outside.

System behavior is determined by the equations describing the change in the stock levels of each node S_i . It is assumed that the supply network structure is known, and the states are available to direct measurement. It is also assumed that the measured values of the local states come only on their local controllers.

Transport time-delays are described using the discrete delay model. Values of delays that give the time duration of transportation and resource reprocessing at the network nodes are supposed to be known and are multiples of the sampling period. Then each node is described by a difference equation with delay

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \sum_{t=0}^{A_i^{\max}} \mathbf{B}_i^t \mathbf{u}_i(k-t) + \mathbf{E}_i \mathbf{w}_i(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

where $k = 0, 1, 2, \dots$ is number of discrete time interval; $\mathbf{x}_i(k) \in \mathbf{R}^{n_i}$ is state vector of node S_i ; $\mathbf{u}_i(k) \in \mathbf{R}^{m_i}$ is control actions vector; $\mathbf{w}_i(k) \in \mathbf{R}^{n_i}$ is external disturbances vector; A_i^{\max} is discrete variable, multiple of the sampling period, that determines the maximum value of the time-delays of controlled flows between the node S_i and the network nodes that are resource suppliers for him; $\mathbf{B}_i^t \in \mathbf{R}^{n_i \times m_i}$, $t = 0, \overline{1, A_i^{\max}}$ are control influence matrices, $\mathbf{E}_i \in \mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ is disturbances influence matrix. Obviously, the network structure is determined by the matrices $\mathbf{B}_i^t, \mathbf{E}_i$, which are constructed by the methods, described in [9]. The vector $\mathbf{x}(k) = [\mathbf{x}_1^T(k), \mathbf{x}_2^T(k), \dots, \mathbf{x}_N^T(k)]^T$, which composed of the individual nodes state vectors, is the state vector of the whole system S and has dimen-

sion $n = \sum_{i=1}^N n_i$.

External actions for each node S_i include the functions of external demand generated outside the network, and internal demand generated by nodes for which the node S_i is a resources supplier:

$$\mathbf{w}_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{\Pi}_{ij} \mathbf{u}_j(k) + \mathbf{\Pi}_i \mathbf{d}(k),$$

where $\mathbf{d}(k) \in \mathbf{R}^q$ is external demand vector; $\mathbf{\Pi}_{ij} \in \mathbf{R}^{n_i \times n_j}$, $i, j = \overline{1, N}$ are technological matrices, which are formed on the basis of the process description being implemented by the supply network: the element value $\mathbf{\Pi}_{ij}(s, t)$ is equal to the amount of resource units $s = \overline{1, n_i}$ of node S_i required to produce one resource unit $t = \overline{1, n_j}$ by node S_j ; $\mathbf{\Pi}_i \in \mathbf{R}^{n_i \times q}$ is external demand influence matrix. Obviously, a matrix

$$\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{\Pi}_{12} & \cdots & \mathbf{\Pi}_{1N} \\ \mathbf{\Pi}_{21} & 0 & \cdots & \mathbf{\Pi}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{\Pi}_{N1} & \mathbf{\Pi}_{N2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

completely characterizes the nodes interactions that define the supply network structure and given technological process.

During the system's operation, the structural constraints should hold:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i(k) &\in X_i = \left\{ \mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^{n_i} : 0 \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^{\max} \right\} \\ \mathbf{u}_i(k) &\in U_i = \left\{ \mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^{m_i} : 0 \leq \mathbf{u}_i \leq \mathbf{u}_i^{\max} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

where the vectors \mathbf{x}_i^{\max} and \mathbf{u}_i^{\max} setting maximal storage capacities of the network nodes and maximal transportation volumes are considered given.

We assume that the vectors of external disturbances satisfy the constraints:

$$\mathbf{d}(k) \in D = \left\{ \mathbf{d} \in \mathbf{R}^q : \mathbf{d}^{\min} \leq \mathbf{d} \leq \mathbf{d}^{\max} \right\}$$

where the vectors \mathbf{d}^{\min} and \mathbf{d}^{\max} give the boundary values of demand and are supposed to be known.

Sets of admissible values of the states X_i , controls U_i and demand D are bounded polyhedrons given by intersection of finite number

of closed semispaces, i.e. they are compact convex sets, with the coordinate origin being outside their interior: $0 \notin \text{int}(X_i)$, $0 \notin \text{int}(U_i)$, $0 \notin \text{int}(D)$.

For a system consisting of the nodes, the dynamics of which is described by equations (1) and the relationship defined by the matrix (2), we consider the problem of synthesizing a decentralized robust with respect to an unknown, but bounded demand $\mathbf{d}(k) \in D$ inventory control strategy that for any initial state $\mathbf{x}(0)$, where $\mathbf{x}_i(0) \in X_i, i = \overline{1, N}$ provides:

- full and timely satisfaction of both external and internal demand;
- minimization of the local quality criteria;
- the asymptotic robust stability of the whole interconnected system;
- fulfillment the given constraints on the state and control (3).

Synthesis of local controllers

Perform the transformation node model (1) to the standard form without delays with extending the state vector [10]:

$$\xi_i(k) = \left[\mathbf{x}_i^T(k), \mathbf{u}_i^T(k-1), \mathbf{u}_i^T(k-2), \dots, \mathbf{u}_i^T(k - A_i^{\max}) \right]^T.$$

Then the equations of the extended model of the node take the form:

$$\begin{aligned} \xi_i(k+1) &= \mathbf{A}_i \xi_i(k) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(k) + \mathbf{G}_i \mathbf{w}_i(k), \\ \mathbf{x}_i(k) &= \mathbf{C}_i \xi_i(k), \end{aligned} \quad (4)$$

where the matrices $\mathbf{A}_i \in \mathbf{R}^{N_i \times N_i}$, $\mathbf{B}_i \in \mathbf{R}^{N_i \times m_i}$, $\mathbf{G}_i \in \mathbf{R}^{N_i \times q_i}$, $\mathbf{C}_i \in \mathbf{R}^{n_i \times N_i}$, $N_i = n_i + m_i A_i^{\max}$ have the respective block structure [9].

Execute approximation of the external actions set for each local node by an ellipsoid of minimum volume. The boundary values of the external actions of network nodes may be found by the following algorithm:

1. $\mathbf{d}_i^{\min} = \mathbf{\Pi}_i \mathbf{d}^{\min}$, $\mathbf{d}_i^{\max} = \mathbf{\Pi}_i \mathbf{d}^{\max}$, $i = \overline{1, N}$.
2. $\forall i = \overline{1, q}$: $\mathbf{\Pi}_i^{\min} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \mathbf{\Pi}_{ij} \mathbf{d}_j^{\min}$, $\mathbf{\Pi}_i^{\max} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \mathbf{\Pi}_{ij} \mathbf{d}_j^{\max}$,
 $\mathbf{w}_i^{\min} = \mathbf{d}_i^{\min} + \mathbf{\Pi}_i^{\min}$, $\mathbf{w}_i^{\max} = \mathbf{d}_i^{\max} + \mathbf{\Pi}_i^{\max}$.
3. $\forall i = \overline{q+1, N}$: $\mathbf{\Pi}_i^{\min} = \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{\Pi}_{ij} (\mathbf{\Pi}_j^{\min} + \mathbf{d}_j^{\min})$, $\mathbf{\Pi}_i^{\max} = \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{\Pi}_{ij} (\mathbf{\Pi}_j^{\max} + \mathbf{d}_j^{\max})$,
 $\mathbf{w}_i^{\min} = \mathbf{d}_i^{\min} + \mathbf{\Pi}_i^{\min}$, $\mathbf{w}_i^{\max} = \mathbf{d}_i^{\max} + \mathbf{\Pi}_i^{\max}$.

Then the external actions set for node S_i can be approximated by ellipsoid:

$$E(\mathbf{w}_i^*, \mathbf{P}_i^w) = \left\{ \mathbf{w}_i \in \mathbf{R}^{n_i} : (\mathbf{w}_i(k) - \mathbf{w}_i^*)^T (\mathbf{P}_i^w)^{-1} (\mathbf{w}_i(k) - \mathbf{w}_i^*) \leq 1 \right\}, \quad (5)$$

whose matrix \mathbf{P}_i^w and vector \mathbf{w}_i^* defining the center coordinates are determined by solving a semidefinite programming problem:

$$-\log \det \mathbf{W} \rightarrow \min \quad (6)$$

subject to constraints on the matrix $\mathbf{W} = \mathbf{W}^T \in \mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ and vector $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^{n_i}$ variables:

$$\mathbf{W} \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (\mathbf{W}\mathbf{w}_j - \mathbf{z})^T \\ \mathbf{W}\mathbf{w}_j - \mathbf{z} & \mathbf{I}_{n_i \times n_i} \end{bmatrix} \succeq 0, \quad j = \overline{1, 2^{n_i}},$$

where \mathbf{w}_j are the vectors which contain all possible combinations of values of the vectors \mathbf{w}_i^{\min} and \mathbf{w}_i^{\max} .

The solution of (6) $\hat{\mathbf{W}}, \hat{\mathbf{z}}$ defines the parameters of the ellipsoid (5):

$$\mathbf{P}_i^w = \hat{\mathbf{W}}^{-2}, \quad \mathbf{w}_i^* = \hat{\mathbf{W}}^{-1} \hat{\mathbf{z}}.$$

The local control law is designed in the form of linear non-stationary feedback with respect to the error signal between the available and safety stock levels

$$\mathbf{u}_i(k) = \mathbf{K}_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad (7)$$

where $\mathbf{K}_i(k) \in \mathbf{R}^{m_i \times N_i}$ is the non-stationary feedback gain matrix at the instant k .

The values of the vector ξ_i^* that consists of $A_i^{\max} + 1$ vectors \mathbf{x}_i^* and gives the amount of safety stock levels are calculated based on the upper boundary values \mathbf{w}_i^{\max} of external actions for the node S_i considering the time-delay value A_i^{\max} :

$$\xi_i^* = \underbrace{\left[\mathbf{x}_i^{*T}, \dots, \mathbf{x}_i^{*T} \right]^T}_{A_i^{\max} + 1}, \quad \mathbf{x}_i^* = A_i^{\max} \mathbf{w}_i^{\max}.$$

Then the extended model of the closed-loop subsystem takes the following form

$$\begin{aligned}\xi_i(k+1) &= \mathbf{A}_{f_i}(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*) + \mathbf{A}_i \xi_i^* + \mathbf{G}_i(\mathbf{w}_i(k) - \mathbf{w}_i^*) + \mathbf{G}_i \mathbf{w}_i^*, \\ \mathbf{x}_i(k) &= \mathbf{C}_i \xi_i(k), \quad \mathbf{A}_{f_i}(k) = \mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i(k).\end{aligned}\quad (8)$$

Local control synthesis problem reduces to the computation of the feedback gain matrices $\mathbf{K}_i(k)$ such that closed subsystems (8) is asymptotically robustly stable. The stability conditions of the whole controlled supply network with decentralized controllers will be discussed below.

Synthesized controller should ensure the minimizing of the following local subsystem criteria in case of an infinite time horizon:

$$J_i^\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \left((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \mathbf{R}_i^\xi (\xi_i(k) - \xi_i^*) + \mathbf{u}_i^T(k) \mathbf{R}_i^u \mathbf{u}_i(k) + \Delta \mathbf{u}_i^T(k) \mathbf{R}_i^\Delta \Delta \mathbf{u}_i(k) \right), \quad (9)$$

where $\mathbf{R}_i^\xi \in \mathbf{R}^{N_i \times N_i}$, $\mathbf{R}_i^u \in \mathbf{R}^{m_i \times m_i}$, $\mathbf{R}_i^\Delta \in \mathbf{R}^{m_i \times m_i}$ are diagonal positive definite weighting matrices; $\Delta \mathbf{u}_i(k) = \mathbf{u}_i(k) - \mathbf{u}_i(k-1)$.

The first term in (9) determines the amount of penalties for deviation of available resources levels from safety stock levels, the second one – take into account the cost of resources transportation and storage, and the third – is introduced for smoothing of control actions jumps, since the change in resources production volumes should be carried out smoothly.

Stabilizing control algorithms are generally based on the estimation of the upper boundary value of the system performance criterion using a Lyapunov function. We define the quadratic Lyapunov function, which is built on the subsystem (8) solutions:

$$V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \mathbf{P}_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad \mathbf{P}_i(k) = \mathbf{P}_i^T(k) \succ 0. \quad (10)$$

We require that $\forall k \geq 0$ and any value of the external action belonging approximating ellipsoid $\mathbf{w}_i(k) \in E(\mathbf{w}_i^*, \mathbf{P}_i^w)$ for the first difference of the Lyapunov function computed by k the inequality guaranteeing decrease with time of the function (10) value is occurred:

$$V_i(\xi_i(k+1) - \xi_i^*) - V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) \leq -J_i^\infty(k). \quad (11)$$

If inequality (11) holds we can show that $\forall k \geq 0$ the following inequality is valid:

$$V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) \geq \max_{\mathbf{w}_i(k) \in E(\mathbf{w}_i^*, \mathbf{P}_i^w)} J_i^\infty(k). \quad (12)$$

Local control actions $\mathbf{u}_i(k)$ will be determined from the minimization condition of the criterion (9) upper bound. Then in accordance with (12) we find the control actions from the minimization condition of the

Lyapunov function:

$$\mathbf{u}_i(k) = \arg \min_{\mathbf{u}_i(k) \in U_i} V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*). \quad (13)$$

The problem (13) is equivalent to the problem of minimum value computation of a scalar $\gamma_i(k) > 0$ such that $\forall k \geq 0$ the following inequality is valid:

$$(\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \mathbf{P}_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) \leq \gamma_i(k). \quad (14)$$

In accordance with [11], introduce the matrix variables

$$\mathbf{Q}_i(k) = \gamma_i(k) \mathbf{P}_i^{-1}(k) \quad (15)$$

and using Schur lemma we present the problems of minimizing the scalar value $\gamma_i(k)$ under the condition (14) as a semidefinite programming (SDP):

$$\min_{\mathbf{Q}_i(k)} \gamma_i(k), \quad \gamma_i(k) > 0, \quad \mathbf{Q}_i(k) \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \\ (\xi_i(k) - \xi_i^*) & \mathbf{Q}_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0. \quad (16)$$

Thus the synthesis problem of local robustly stable control is to calculate at each instant k of the feedback gain matrix $\mathbf{K}_i(k)$ which stabilizes the closed subsystem (8) and minimizes the Lyapunov function (10). The appropriate results are presented in the following theorem.

T h e o r e m. Consider the subsystem (4) with constraints (3) which is closed-loop with the control law (7), and let the feedback gain matrix $\mathbf{K}_i(k) = \mathbf{Y}_i(k) \mathbf{Q}_i^{-1}(k)$

is obtained by solving the optimization problem

$$\min_{\mathbf{Q}_i(k), \mathbf{Y}_i(k), \alpha_i} \gamma_i(k) \quad (17)$$

subject to constraints on the matrix variables $\mathbf{Q}_i(k), \mathbf{Y}_i(k) \in \mathbf{R}^{m_i \times N_i}$ and scalar parameters $\alpha_i, \gamma_i(k)$: (16),

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_i(k) & \mathbf{Y}_i^T(k) \mathbf{R}_i^\Delta \mathbf{K}_{k-1} & 0 & 0 & \Sigma_i^T(k) & 0 & \mathbf{Q}_i(k) \mathbf{R}_i^{\xi/2} & \mathbf{Y}_i^T(k) \mathbf{R}_i^{1/2} \\ \mathbf{K}_{k-1}^T \mathbf{R}_i^\Delta \mathbf{Y}_i(k) & \gamma_i(k) \mathbf{K}_{k-1}^T \mathbf{R}_i^\Delta \mathbf{K}_{k-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (\mathbf{A}_i - \mathbf{I})^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{G}_i^T & 0 & 0 & 0 \\ \Sigma_i(k) & 0 & \mathbf{A}_i - \mathbf{I} & \mathbf{G}_i & \mathbf{Q}_i(k) & \gamma_i(k) \mathbf{G}_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_i(k) \mathbf{G}_i^T & \gamma(k) \alpha_i (\mathbf{P}_i^w)^{-1} & 0 & 0 \\ \mathbf{R}_i^{\xi/2} \mathbf{Q}_i(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_i(k) \mathbf{I} & 0 \\ \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{Y}_i(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_i(k) \mathbf{I} \end{bmatrix} \succeq 0,$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_i^x & \gamma_i(k)\mathbf{C}_i \\ \gamma_i(k)\mathbf{C}_i^T & \mathbf{Q}_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \mathbf{Y}_i(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*) \succeq 0, \\ \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_i^T(k) \left((\mathbf{u}_i^{\max})^+ \right)^T (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T & \mathbf{Y}_i^T(k) \left((\mathbf{u}_i^{\max})^+ \right)^T (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \\ (\xi_i(k) - \xi_i^*) (\mathbf{u}_i^{\max})^+ \mathbf{Y}_i(k) & \mathbf{Q}_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0,$$

where $\Sigma_i(k) = \mathbf{A}_i \mathbf{Q}_i(k) + \mathbf{B}_i \mathbf{Y}_i(k)$, $\mathbf{K}_{k-1} = \mathbf{K}_i(k-1)$, $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_i^u + \mathbf{R}_i^\Delta$, « $+$ » is Moore-Penrose pseudoinverse, \mathbf{P}_i^x is the matrix of the ellipsoid that approximates the set X_i of admissible state values and is calculated by solving the problem, which is similar to the problem (6).

If the problem (17) which can be viewed as a set of one-dimensional convex optimization problem respect to the parameter α_i and SDP has a solution, then the subsystem (4), which is closed using control law (7), for any initial state $\mathbf{x}_i(0) \in X_i$ under the action of external disturbances $\mathbf{w}_i(k) \in E(\mathbf{w}_i^*, \mathbf{P}_i^w)$ is asymptotically robustly stable under constraints (3).

The proof is analogous to the proof of the Theorem 2 in [12].

Stability analysis of the decentralized supply network control system

If under the decentralized control synthesis for each subsystem S_i the optimization problem (17) is solved, it may be argued that all closed local subsystems are asymptotically robustly stable. In order to analyze the stability of the whole controlled supply network S with decentralized controllers, represent the equations of the extended node model (4), taking into account the relationships (2), by analogy with [5] as follows:

$$\xi_i(k+1) = \mathbf{A}_i \xi_i(k) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{B}_{ij} \mathbf{u}_j(k) + \mathbf{F}_i \mathbf{d}(k), \quad (18)$$

where $\mathbf{B}_{ij}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_i \mathbf{\Pi}_{ij} & \mathbf{0}_{m_i \times m_j} & \cdots & \mathbf{0}_{m_i \times m_j} \end{bmatrix}$, $\mathbf{F}_i^T = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_i \mathbf{\Pi}_i & \mathbf{0}_{m_i \times q} & \cdots & \mathbf{0}_{m_i \times q} \end{bmatrix}$.

The dynamic equation (18) under the control (7) takes the form:

$$\xi_i(k+1) = \mathbf{A}_{f_i}(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) + \mathbf{A}_i \xi_i^* + \sum_{j=1, j \neq i}^N \mathbf{F}_{ij}(k) (\xi_j(k) - \xi_j^*) + \mathbf{F}_i \mathbf{d}(k),$$

where $\mathbf{F}_{ij}^T(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_i \mathbf{\Pi}_{ij} \mathbf{K}_j(k) & \mathbf{0}_{m_i \times N_j} & \cdots & \mathbf{0}_{m_i \times N_j} \end{bmatrix}$

To analyze the stability of the controlled supply network S with decentralized controllers the method of comparison and the mathemati-

cal tool of vector Lyapunov functions is used [13].

Consider vector Lyapunov function:

$$V(\xi(k) - \xi^*) = \left[v_1(\xi_1(k) - \xi_1^*), \dots, v_N(\xi_N(k) - \xi_N^*) \right]^T, \quad (19)$$

where $\xi(k) = [\xi_1^T(k), \dots, \xi_N^T(k)]^T$ and $\xi^* = \left[(\xi_1^*)^T, \dots, (\xi_N^*)^T \right]^T$ are a composite vectors of appropriate dimension. The components of the function (19) is a Lyapunov functions of local subsystems in the Siljak form [14]:

$$v_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = \left((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T \mathbf{P}_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) \right)^{1/2}, \quad i = \overline{1, N},$$

where the matrices $\mathbf{P}_i(k)$ in accordance with (15) are equal $\mathbf{P}_i(k) = \gamma_i(k) \mathbf{Q}_i^{-1}(k)$.

On the basis of function (19), the general Lyapunov function for system S may be formed as follows:

$$V_0(\xi(k) - \xi^*) = \mathbf{P}_0 V(\xi(k) - \xi^*), \quad (20)$$

where $\mathbf{P}_0 = [p_{01}, \dots, p_{0N}]$, $p_{0i} > 0$, $i = \overline{1, N}$.

Thus the linear comparison system for system defined by difference equations:

$$v(k+1) = \Lambda(k)v(k), \quad \eta(k) = \mathbf{P}_0 v(k), \quad (21)$$

where $v = [v_1^T, \dots, v_N^T]^T$ is the state vector of comparison system; η is scalar function, which is the output of comparison system; $\Lambda(k) \in \mathbf{R}^{N \times N}$ is non-stationary matrix with non-negative elements.

In [15] was formulated the theorem according to which for the vector (19) and general (20) Lyapunov functions following inequalities hold

$$V(\xi(k) - \xi^*) \leq v(k), \quad V_0(\xi(k) - \xi^*) \leq \eta(k),$$

if the elements of the matrix $\Lambda(k)$ is determined by characteristic equation of the quadratic forms beam:

$$\begin{aligned} \det(\mathbf{A}_{f_i}^T(k) \mathbf{P}_i(k) \mathbf{A}_{f_i}(k) - \mu_{ii} \mathbf{P}_i(k)) &= 0, \quad i = \overline{1, N}, \\ \det(\mathbf{F}_{ij}^T(k) \mathbf{P}_i(k) \mathbf{F}_{ij}(k) - \mu_{ij} \mathbf{P}_j(k)) &= 0, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad j \neq i. \end{aligned} \quad (22)$$

Herewith $\lambda_{ij}(k) = [\mu_{ij}^{\max}]^{1/2}$, where μ_{ij}^{\max} is the maximum value of the appropriate characteristic equation (22) root. Thus the comparison system (21) majorizes componently vector Lyapunov function (19) and

gives an upper estimate of the processes behavior of the composite system S . As a result stability analysis of the controlled supply network S with decentralized controllers reduces to the analysis of the comparison system (21).

Under supply network model construction, the nodes are numbered and grouped according to the stages of processing of raw materials and semi-finished products, starting with those that receive external demand. Moreover, any layer of the network combines nodes that are resource suppliers for the nodes belonging to the layers with numbers strictly less than l and at least for one node of the layer $l-1$. As a result, if a directed graph showing the supply network, is a tree, that is, has no cycles, then non-stationary dynamic matrix $\Lambda(k)$ of the comparison system (21) is lower triangular. Since the diagonal elements values of the matrix $\Lambda(k)$ are calculated based on the first of equations (22), their values are positive and no larger than 1: $0 < \lambda_{ii}(k) < 1$. As a result, non-stationary matrix $\Lambda(k) \forall k$ is nilpotent and therefore, the comparison system (21) is stable. Consequently, the whole controlled supply network S consisting of interconnected subsystems $S_i, i = \overline{1, N}$, which are closed by local feedback decentralized controllers (7) is Lyapunov stable.

Conclusions

In this paper the approach to robust decentralized inventory control problem solving in supply networks is proposed. The specific features of this problem are uncertainty, but boundedness of external demand and availability of asymmetric structural constraints on the states and control actions values.

To suppress influence of disturbances that simulate the change of external demand together with ensuring stability of the closed-loop local subsystems, the invariant ellipsoid technique was applied that allowed stating the problem in terms of LMI and reduce the control synthesis to SDP and one-dimensional convex optimization problems. The most important property of obtained solution is the Lyapunov stability of the whole controlled supply network with decentralized controllers which is guaranteed by use of the comparison method and the technique of constructing vector Lyapunov functions.

The resulting control depends on the chosen desirable value of the safety stock levels. One can choose optimal values of local safety levels

within the proposed technique since the solution of the robust decentralized control synthesis problem involved actually gives the algorithmic dependence between the local safety stock level and the optimal value of the local performance criterion.

REFERENCES

1. Bartmann D. Inventory control: models and methods. / D. Bartmann, M. Beckmann. – Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. – 252 p.
2. Bemporad A. Robust model predictive control: a survey / A. Bemporad, M. Morari // Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 1999. – Vol. 245. – P. 207-226.
3. Bertsekas D. P. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D. P. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Trans. Automat. Control. – 1971. – Vol. 16. – P. 117–128.
4. Mayne D.Q. Constrained model predictive control: stability and optimality / D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao, P.O.M. Scokaert // Automatica. – 2000. – Vol. 36 (6). – P. 789-814.
5. Siljak D.D. Decentralized Control of Complex Systems / D.D. Siljak. – New York: Academic Press, 1991.
6. Siljak D.D. Robust stabilization of nonlinear systems: the LMI approach / D.D. Siljak, D.M. Stipanovic // Mathematical Problems in Engineering. – 2000. – Vol. 6. – P. 461-493.
7. Boyd S., Ghaoui E., Feron E., Balakrishnan V. Linear matrix inequalities in system and control theory / S. Boyd, E. Ghaoui, E. Feron, V. Balakrishnan. – Philadelphia: SIAM, 1994. – 187 p.
8. Rosinova D. Robust decentralized controller design: subsystem approach / D. Rosinova, N.Q. Thuan, V. Vesely, L. Marko // Journal of Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 63. – No. 1. – P. 28-34.
9. Dorofieiev Yu.I. Constructing mathematical models of controllable supply networks given flow delays / Yu.I. Dorofieiev, A.A. Nikulchenko // System Research & Information Technologies. – 2013. – No. 1, p. 16-27 (in russian).
10. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi and W. Ukovich // IEEE Transaction on Robotics and Automation, Special Issue on Automation of Manufacturing Systems. – 2000. – Vol. RA-16. – No. 3. – P. 313-317.
11. Kothare M.V. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities / M.V. Kothare, V. Balakrishnan, M. Morari // Automatica. – 1996. – Vol. 32(10). – P. 1361-1379.
12. Dorofieiev Yu.I. Robust stabilizing inventory control in supply networks under uncertainty of external demand and supply time-delays / Yu.I. Dorofieiev, L.M. Lyubchik, A.A. Nikulchenko // J. of Computer and Systems Sciences Int. – 2014. – Vol. 53. – No. 5. – P. 761-775.
13. Воронов А. А. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / А. А. Воронов, В. М. Матросов. – М.: Наука, 1987. – 312с.
14. Siljak D.D. Robust stability of discrete systems / D.D. Siljak, M.E. Sezer // Int. J. Control. – 1988. – Vol. 48(5). – P. 2055–2063.
15. Бобцов В. В. Управление непрерывными и дискретными процессами / В. В. Бобцов, Г. И. Болтунов, С. В. Быстров, В. В. Григорьев. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2010 – 175 с.

А.Ю. Хитько, Л.Х. Иванова, М.А. Хитько, Л.А. Шапран
**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ
КОНСТРУКЦИИ РОЛИКОВ МНЛЗ**

Аннотация. В работе показано, что толщина наружного рабочего слоя биметаллического ролика из высоколегированной стали может быть уменьшена на 20 мм при общей толщине стенке бочки ролика 75-90 мм, что позволяет усовершенствовать технологию его изготовления.

Ключевые слова: сталь, непрерывное литье, биметаллический ролик, конструкция, МНЛЗ

Постановка проблемы и состояние вопроса. Перспективным направлением является разработка бандажированных роликов для зоны вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с повышенной жаропрочностью, абразивной и коррозионной стойкостью.

Условия работы роликов в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ характеризуются: малой скоростью вращения (до 1 об/мин), значительными и переменными термическими и механическими нагрузками, интенсивным абразивным и гидроэрозионным износом, ударами при прохождении холодного конца заготовки. Максимальная температура поверхности роликов достигает 550°C , перепад температуры по сечению до 470°C , по длине – 220°C . В итоге в роликах развиваются сетка разгара, кольцевые трещины, износ поверхности или происходит налипание материала заготовки на поверхность роликов. Все перечисленные повреждения сокращают срок службы роликов МНЛЗ.

Повышение ресурса работы роликов достигается в частности выбором материала бандажа, устойчивого к абразивному износу, коррозионному и термическому разрушению в условиях контакта с горячим слябом, наружным и внутренним охлаждением водой.

В США, ФРГ, Японии, Франции и Великобритании изготавливают в промышленных масштабах биметаллические центробежнолитые изделия в виде износостойких труб, заготовок для горячей де-

формации, различных втулок, а также заготовок для бандажей и бочек роликов.

Из большого количества возможных сочетаний металлов, составляющих биметаллические пары, наиболее распространены стали и сплавы на основе железа, например, сталь – сталь, сталь – чугун.

Опорные ролики МНЛЗ работают в условиях, при которых факторами, определяющими их долговечность и работоспособность, являются износ и образование сетки трещин разгара от термоциклического нагружения.

Целью исследования являлось повышение конструкционной прочности бандажных роликов, отвечающих условиям службы роликов МНЛЗ.

Результаты исследований и их обсуждение. Повысить конструкционную прочность биметаллических роликов можно путем изменения соотношения толщин слоев биметалла в сторону увеличения слоя из более прочного материала, уменьшения диаметра внутренней полости и подбором более прочного материала для одного или обоих слоев ролика.

Наружный диаметр роликов определяется конструкцией конкретной МНЛЗ, а внутренний – возможностью литья трубных заготовок центробежным способом и необходимой интенсивностью охлаждения ролика. Геометрические параметры роликов радиального участка слябовых криволинейных МНЛЗ с наружным диаметром 0,27 и 0,3 м практически исчерпываются возможностью получения диаметра внутренней полости способом центробежного литья соответственно 0,15 и 0,13 м.

Расчетным методом по методике, приведенной в [1, 2], были определены минимально возможные толщины слоев для бочек роликов исследуемых исполнений диаметром 270 и 300 мм (табл. 1).

Исходя из условий работы роликов, глубины прогрева при контакте со слитком, возможности ремонта проточкой и наплавкой, толщина износостойкого слоя может быть уменьшена с 20...25 до 7...15 мм. Из данных таблицы 1 видно, что оптимальное значение для обоих исполнений роликов не превосходит этих величин.

Таблица 1

Минимально возможные толщины слоев биметаллических роликов

Исполнение ролика	Основные размеры слоев в заготовках			
	Диаметр ролика D , мм	Диаметр границы слоев d_H , мм	Оптимальная толщина наружного слоя l_H , мм	Отношение модулей упругости $\frac{E_H}{E_B}$
20X25H19C2Л–20Л	270	254	8,0	0,94
	300	282	9,0	
17X12МФЛ–20Л	270	268	1,0	0,991
	300	297	1,5	

Для нахождения соотношения между толщинами наружного износостойкого и внутреннего несущего слоев в биметаллической заготовке определяли напряжения в этих слоях от силовых и температурных нагрузок.

Например, при расчете напряжений в биметаллическом ролике диаметром 300 мм исполнения 20X25H19C2Л–20Л показано, что максимальные напряжения были в зоне контакта со слитком, они достигали 616 МПа в наружном слое и 481 МПа во внутреннем слое (табл.2). Со стороны, противоположной слитку, напряжения – более низкие, соответственно 104 и 67 МПа, но возросли напряжения на внутренней поверхности ролика – до 167 МПа.

Таблица 2

Распределение суммарных напряжений по глубине ролика

ρ , м	Напряжения, МПа			Слой ролика
	$\sigma_{\text{верхн}}$	$\sigma_{\text{нижн}}$ (контактирует со слитком)	Допускаемое напряжение $[\sigma]$	
0,150	-104	-616	260	Наружный
0,145	-79	-554		
0,140	-55	-492		
0,140	-67	-481	201	Внутренний
0,130	-18	-368		
0,120	28	-261		
0,110	72	-164		
0,100	121	-76		
0,090	150	-5		
0,085	167	47		

Таким образом, наружный слой в зоне контакта на всю глубину работает за пределом текучести, а напряжения во внутреннем слое на нижней части ролика и на верхней его границе превосходят допускаемые более чем в 2 раза. По толщине они меняют знак и на

нижней границе равны половине допускаемых напряжений. Поэтому выполнили расчет напряжений по толщине внутреннего слоя через каждые 10 мм (см. табл. 2).

Напряжения во внутреннем слое для верхней половины ролика по всей глубине не превышают допускаемых, а в нижней половине до глубины 60 мм от наружной поверхности ролика превосходят допускаемые (см. табл. 2).

Повысить несущую способность внутреннего слоя можно двумя способами – увеличить его толщину за счет уменьшения внутреннего отверстия или выбрать материал с более высокими механическими свойствами. Второй путь более перспективен, так как позволяет сохранить преимущества биметаллического ролика не только по износу, но и выполнить его более легким по сравнению с кованым.

Расчет выполняли для ролика исполнения 20X25Н19С2Л–20Л. В расчетные формулы входили отношения модулей упругости для наружного и внутреннего слоев, которые близки к отношениям модулей упругости материалов для ролика исполнения 17X12МФЛ–20Л, а так как допускаемые напряжения для этого сочетания более высокие, то напряженно-деформированное состояние роликов из этого материала будет более благоприятным.

Расчет напряжений проводили исходя из температурного поля ролика в установившемся режиме. Даже в этом, наиболее благоприятном случае напряжения в нем были велики для исполнения 20X25Н19С2Л–20Л, так как ролики диаметром 300 мм испытывают значительные силовые нагрузки. Этот биметалл, имеющий хорошую термостойкость, может быть использован для роликов менее нагруженного участка технологической линии.

Ролики МНЛЗ работают в таких условиях, что напряжения в некоторых местах сечения ролика практически всегда будут превосходить допускаемые, но они носят локальный характер и ограничены зоной контакта со слитком. Поэтому воздействие их на материал ролика кратковременное и распространяется неглубоко. Если добиваться снижения напряжений во всех частях сечения ниже допускаемых, то ролики будут очень дорогими с дефицитными добавками легирующих элементов. Значительно проще и экономичнее добиться увеличения несущей способности внутреннего слоя – упрочнить его. Под упрочнением надо понимать не столько увеличение толщины его,

сколько повышение механических свойств материала. При этом образующиеся термические трещины в наружном слое будут разгружать его от температурных напряжений, а высокую прочность и долговечность ролика обеспечит внутренний слой.

Подбор материалов дает более широкую возможность увеличения конструкционной прочности роликов. Материал наружного слоя, например, сталь 17Х12МФЛ, должен обеспечить высокую износостойкость и разгаростойкость поверхности бочки ролика, а материал для внутреннего слоя (сталь 22ХМФЛ) с высоким уровнем прочностных и пластических свойств повышает конструкционную прочность ролика [3, 4].

Соотношение толщин слоев биметалла ролика определяли из условий получения минимальных по величине остаточных напряжений в заготовке и ролике и возможностью получения хорошей свариваемости сплавов биметаллов в процессе центробежного литья. В результате установлено, что оптимальная величина граничного диаметра, диаметра соединения слоев для роликов диаметром 0,30 м составляет 0,27 м, а для ролика диаметром 0,27 м – 0,24 м. Выбранные соотношения требуют проверки на допускаемые напряжения, исходя из условий эксплуатации, поэтому был выполнен расчет напряжений в биметаллических роликах исполнения 17Х12МФЛ–22ХМФЛ с утонченными внутренними слоями от воздействия силовых и температурных нагрузок.

Наиболее приемлемыми по геометрическим размерам для роликов с биметаллическими бочками диаметром 300 мм являются заготовки с размерами 330x250x150x3600 мм и для роликов диаметром 270 мм – 290x220x130x3600 мм.

С целью обоснования возможности изменения толщин слоев и граничных диаметров выполнены расчеты по корректировке геометрических размеров роликов радиального участка.

Исходные данные для расчета биметаллического ролика диаметром 300 мм: 1) диаметры: наружный (D) – 300 мм; границы слоев (d_n) – 250 мм; внутренний ($d_{вн}$) – 150 мм, диаметром 270 мм: 1) диаметры: наружный (D) – 270 мм; границы слоев (d_n) – 220 мм; внутренний ($d_{вн}$) – 130 мм.

2) С целью уменьшения скачка напряжений на границе слоев и увеличения прочностных характеристик выбраны материалы со сле-

дующими значениями модуля упругости и коэффициента термического расширения. Модули упругости: внутреннего слоя $E'_e=183900$ МПа, наружного слоя $E'_n=180900$ МПа. Допускаемые напряжения материала: наружного слоя $[\sigma'_n]=490$ МПа, внутреннего $[\sigma'_{en}]=308$ МПа. Коэффициенты линейного расширения слоев: наружного при температурах $t=60 \div 350^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,1 \cdot 10^{-5}$; $t=400^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,2 \cdot 10^{-5}$; $t=450^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,4 \cdot 10^{-5}$; $t=470^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,55 \cdot 10^{-5}$; внутреннего – при температурах $t=60 \div 350^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,66 \cdot 10^{-5}$.

Распределение температуры в верхней половине ролика описывается зависимостью

$$t = 37,37 + 97,63 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2, \quad (1)$$

где ρ – текущее значение радиуса;

R – наружный радиус ролика.

Температура в нижней половине ролика аппроксимируется формулой

$$t = \left[37,37 + 97,63 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \right] \cdot \left(1 - 2,5 \frac{\rho}{R} \sin \varphi \right). \quad (2)$$

Коэффициент линейного расширения наружного слоя в нижней половине ролика определяется по формуле

$$\alpha'_n = 1,1 \cdot 10^{-5} \left[1 - 0,41 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right]. \quad (3)$$

Модули упругости слоев в нижней половине ролика изменяются согласно следующим формулам:

$$E'_n = E'_e \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right], \quad (4)$$

$$E'_e = E'_e \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right]. \quad (5)$$

Температура на границе слоев в верхней половине ролика $t^*_e=105,1686^\circ\text{C}$, в нижней половине ролика – $t^*_n=324,2693^\circ\text{C}$. Силовые характеристики температурного изгиба в ролике диаметром 300 мм:

$N_t = 3,174126$ МН, $M = -94,61708$ кНм, $y^* = -0,0298$ м, а в ролике диаметром 270 мм - $N_t = 2,676829$ МН, $M = -62,08895$ кНм, $y^* = -0,0232$ м. Расчетные данные представлены в табл.3-6.

Таблица 3
Механические характеристики сечения ролика диаметром 300 мм

$\int_{(F_g)} E_g dF_g$	$\int_{(F_n)} E_n dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g \alpha_g t_g F_g$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n F_n$
$1,945338 E_g r^2$	$0,921 E_n R^2$	$4,099431 \cdot 10^{-3} E_g r^2$	$2,153887 \cdot 10^{-3} E_n R^2$
$\int_{(F_n)} E_n y^2 dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g y^2 dF_g$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n y dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g \alpha_g t_g y dF_g$
$0,38446 E_n R^4$	$0,6518319 E_g r^4$	$-6,790217 \cdot 10^{-4} E_n R^3$	$-8,644595 \cdot 10^{-4} E_g r^3$
a_g^*	a_n^*	$\epsilon_g^* \frac{1}{M}$	$\epsilon_n^* \frac{1}{M}$
$0,564334 \cdot 10^{-3}$	$2,3809535 \cdot 10^{-2}$	$-1,454828 \cdot 10^{-2}$	$-9,792644 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4
Напряжения от нагрузки в ролике диаметром 300 мм

D, м	d_n , м	d_g , м	Марка стали	$[\sigma_n]$, МПа	σ_n , МПа	$[\sigma_g]$, МПа	σ_g , МПа	$\frac{E_g}{E_n}$	$\frac{E_n}{E_g}$
0,3	0,25	0,15	ХМФ	490	103	308	87,3	1,01658	0,98369
Температурные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_g , МПа				
	Верхняя половина	Нижняя половина	Верхняя половина	Нижняя половина					
Верхняя	- 245,4	- 158,4	- 147,3	260,6					
Нижняя	- 142,0	- 687,1	118,0	- 152,8					
Суммарные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_g , МПа				
	Верхняя половина	Нижняя половина	Верхняя половина	Нижняя половина					
Верхняя	- 142,0	- 244,0	- 60,0	208,2					
Нижняя	- 59,2	- 790,0	170,4	- 240,0					

Таблица 5
Механические характеристики сечения ролика диаметром 270 мм

$\int_{(F_g)} E_g dF_g$	$\int_{(F_n)} E_n dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g \alpha_g t_g F_g$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n F_n$
$1,978995 E_g r^2$	$1,01388 E_n R^2$	$4,015113 \cdot 10^{-3} E_g r^2$	$2,326177 \cdot 10^{-3} E_n R^2$
$\int_{(F_n)} E_n y^2 dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g y^2 dF_g$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n y dF_n$	$\int_{(F_g)} E_g \alpha_g t_g y dF_g$
$0,4156209 E_n R^4$	$0,6577259 E_g r^4$	$-6,872724 \cdot 10^{-4} E_n R^3$	$-8,283844 \cdot 10^{-4} E_g r^3$

a_e^*	a_n^*	$\epsilon_e^* \frac{1}{M}$	$\epsilon_n^* \frac{1}{M}$
$3,424081 \cdot 10^{-3}$	$2,280587 \cdot 10^{-2}$	$-1,570679 \cdot 10^{-2}$	$-1,051373 \cdot 10^{-2}$

Таблица 6

Напряжения от нагрузки в ролике диаметром 270 мм

D , мм	d_n , мм	d_e , мм	Мар- ка стали	$[\sigma_n]$, МПа	σ_n , МПа	$[\sigma_e]$, МПа	σ_e , МПа	$\frac{E_e}{E_n}$	$\frac{E_n}{E_e}$
0,27	0,22	0,13	ХМФ	490	92,7	308	76,8	1,0165 8	0,9836 9
Температурные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_e , МПа				
	Верхняя половина		Нижняя половина		Верхняя половина		Нижняя половина		
Верхняя	- 236,9		- 141,7		- 73,7		283,3		
Нижняя	- 127,4		- 693,8		170,7		-130,6		
Суммарные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_e , МПа				
	Верхняя половина		Нижняя половина		Верхняя половина		Нижняя половина		
Верхняя	- 144,2		- 217,2		- 3,1		237,9		
Нижняя	- 51,9		- 786,5		216,1		-207,4		

При выбранных соотношениях геометрических и прочностных параметров напряжения в слоях не превышают допускаемых, за исключением узкого участка в зоне контакта слоев ($\sigma = -786,5$ МПа). Испытания показали, что это превышение не оказывает отрицательного влияния на стойкость роликов. Во внутреннем слое исключено циклическое изменение знака напряжений, что положительно сказалось на долговечности конструкции. Скачок напряжений в граничном слое невелик.

Выводы

1. В результате системных исследований установлено, что толщина наружного рабочего слоя из высоколегированного сплава может быть уменьшена на 20 мм при общей толщине стенке бочки ролика 75...90 мм.

2. Расчет напряженного состояния биметаллических роликов при эксплуатации показал, что напряжения в нижней половине роликов превосходят допускаемые.

3. Для повышения несущей способности внутреннего слоя ролика обосновали выбор для него стали 22ХМФЛ с более высокими механическими свойствами, чем у стали 20Л.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработать сплавы, усовершенствовать технологию изготовления и произвести промышленные испытания экспериментальных роликов с центробежнолитыми бочками для зоны вторичного охлаждения МНЛЗ: Отчет НИР / Днепроп. металлургич. ин-т (ДМетИ). – [Руков. Адамов И.В.]. – К522060006; № ГР 01860035487. – Д.: ДМетИ. – 1987. – 81 с.
2. Проведение испытаний с целью выявления причин отказов и разработка варианта подшипникового узла роликов МНЛЗ, обеспечивающего работоспособность в условиях повышенных нагрузок и температур: Отчет о НИР / Днепроп. металлургич. ин-т (ДМетИ). – [Руков. Кравченко Г.Ф.]. – 082401; № ГР 80027756. – Д.: ДМетИ. – 1980. – 60 с.
3. Адамов И.В. Сигма – фаза в сталях с 12 % хрома / И. В. Адамов, Ю. К. Бунина, Н. В. Сабанский, Л. А. Хитько // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 4. – С. 54 – 56.
4. Адамов И. В. Выбор сплавов и разработка технологии центробежного литья биметаллических заготовок для роликов МНЛЗ / И. В. Адамов, Л. А. Хитько // Центробежное литье – прогрессивный технологический процесс производства труб и заготовок ответственного назначения: сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т пробл. литья. – К..– 1990 – С. 73 – 78.

СИСТЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Описано использование системы математического моделирования (которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений, оптимизацию параметров) при исследовании механического разделения неоднородных конструкций на примере электрических аккумуляторов

Утилизация выработавших ресурс электрических аккумуляторов является актуальной хозяйственной и экологической проблемой [1]. Известен способ [2] утилизации электрических аккумуляторов, которые имеют неоднородные конструкции, основанный на механическом разделении их конструкции.

Для исследования возможностей механического разделения неоднородных конструкций электрических аккумуляторов целесообразно применить систему математического моделирования [3], которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров конструктивно-технологических предложений.

Рассмотрим решение такой задачи на примере конкретных видов электрических аккумуляторов.

Математическое моделирование. Целеполагание

Создать математические модели (ММ), учитывающие основные физико-механические и геометрические особенности неоднородных конструкций электрических аккумуляторов, для определения оптимальных параметров процесса их механического разделения. Погрешность моделирования не более 5%. Стоимость моделирования не должна превышать 5% стоимости аккумуляторов определенного вида.

Идеализация

Аккумулятор, освобожденный от жидких компонентов, как объект для разделения представляет собой композицию нескольких разнородных материалов (металлов и неметаллов), имеющих различные физико-механические свойства и обрабатываемость резанием. Например, составляющие железоникелевых аккумуляторов имеют физико-механические характеристики, представленные в таблице 1, а свинцовых – в таблице 2.

Таблица 1

Механические свойства элементов железоникелевых аккумуляторов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа	Относительное удлинение, %
Железо	7870	180-320	350-450	30-50
Никель	8900	360-430	730-800	35-50
Эбонит	1150 - 1680	52 - 67		

Таблица 2

Механические свойства элементов свинцовых аккумуляторов

Материал	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Твердость по Бринеллю, МПа	Относительное удлинение, %
Свинец	11340	15 - 25	40	30 - 50
Полиэтилен	918 - 930	10 - 17	14 - 25	500 - 600

Геометрические параметры аккумулятора и разделяемых элементов приведены на (рис. 1).

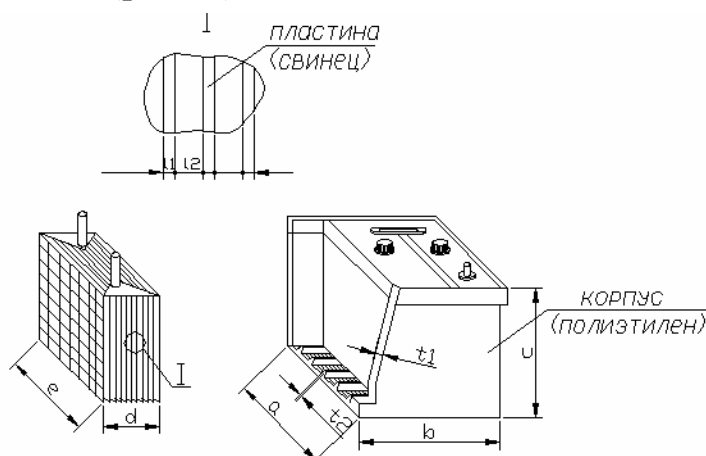


Рисунок 1 - Геометрические параметры аккумулятора и разделяемых элементов на примере свинцового аккумулятора

Разделение производится (с учетом известного опыта разделения труб [4-8]) на специальном отрезном станке с помощью дисковой фрезы, которая имеет ширину реза (толщину) равную ширине участка (рис. 1 и таблица 5) разделения.

Для использования математической модели при исследовании разделения многокомпонентной среды, каковой является аккумулятор, необходимо установить правило учета неоднородности свойств составляющих. Пусть свойства многокомпонентной среды определяются как средние по значениям свойств составляющих. Основным фактором, который определяет различия условий разделения, является прочность обрабатываемого материала. Влияние этого фактора, учитывается поправочными коэффициентами в формулах для скорости резания и силы резания. В свою очередь величины этих поправочных коэффициентов зависят величин приведенных пределов прочности многокомпонентного материала. Например, приведенный предел прочности многокомпонентной среды (из k составляющих, каждая из которых имеет предел прочности $\sigma_{\sigma i}$) можно определить по формуле:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{\sigma i}}{k}.$$

Формализация

Основными выходными переменными процесса разделения являются:

- длительность разделения;
- скорость резания;
- стойкость инструмента;
- сила и мощность резания.

Основными входными переменными процесса разделения являются кинематические параметры режима резания (глубина резания, подача и скорость резания). Эти же переменные следует выбрать в качестве входных и выходных переменных математической модели процесса разделения.

Условия обработки характеризуются также физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов и режущей части дисковой пилы, а также геометрическими параметрами режущей части дисковой пилы.

Длительность разделения можно оценить величиной основного времени [4 - 8] при резании T_o :

$$T_o = \frac{L}{n \cdot s_z \cdot z} \cdot \frac{Z}{t}, \quad (1)$$

где L – длина резания;

n – частота вращения дисковой пилы;

s_z – подача на один зуб фрезы;

z – число зубьев фрезы;

Z – величина припуска;

t – глубина резания.

Скорость резания (окружная скорость фрезы) v можно рассчитать по эмпирической формуле [7]:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \cdot K_v, \quad (2)$$

где C_v , q , m , x , y , u , p , K_v – справочные коэффициенты и показатели степени, учитывающие условия резания;

D – диаметр фрезы;

B – ширина фрезерования;

T – стойкость фрезы.

Общий поправочный коэффициент K_v определяется в зависимости от условий обработки [7]:

$$K = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv}, \quad (3)$$

где K_{mv} – учитывает вид обрабатываемого материала;

K_{nv} – учитывает состояние поверхности заготовки;

K_{uv} – учитывает материал инструмента.

При этом коэффициент K_{mv} , учитывающий вид обрабатываемого материала, определяется расчетным путем [4 - 8]:

$$K_{mv} = K_z \cdot \left(\frac{750}{\sigma_\sigma} \right)^{n_v}, \quad (4)$$

где K_z и n_v – справочный коэффициент и показатель степени, учитывающие условия резания;

σ_σ – прочность обрабатываемого материала.

Величина стойкости инструмента (дисковой фрезы) T может быть определена [4 - 8] с помощью выражения (5), полученного преобразо-

ванием формулы (2) для скорости резания:

$$T = \frac{A}{v^{1/m}}, \quad (5)$$

где A – коэффициент, учитывающий условия резания;

m – показатель относительной стойкости.

Частота вращения n и скорость резания v функционально связаны между собой для конкретных условий обработки выражением:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D}. \quad (6)$$

Для описания главной составляющей силы (P_z) и мощности N резания используются формулы теории резания [7]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp};$$

$$N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}, \quad (7)$$

где C_p , x , y , n , q , w , K_{mp} – справочные коэффициенты и показатели степени, учитывающие условия резания.

При этом поправочный коэффициент K_{mp} , учитывающий вид обрабатываемого материала, определяется расчетным путем [4 - 8]:

$$K_{mp} = \left(\frac{\sigma_b}{750} \right)^{n_p}, \quad (8)$$

где n_p – справочный показатель степени, учитывающий условия резания;

σ_b – прочность обрабатываемого материала.

Математическая модель процесса резания является комбинированной и включает все выражения (1) – (8).

Идентификация

Приведенные показатели степени n_v и n_p определяются как линейные комбинации величин соответствующих показателей для конструкционной углеродистой стали (для базового материала [7] $n_v=0,9$ и $n_p=0,3$) и многокомпонентного материала с учетом известных [7] рекомендаций (а именно, при $\sigma_b < 750$ МПа величина $n_v = -1,0$ и $n_p = 0,1$).

Другие эмпирические коэффициенты и показатели степени выбираются [7] соответственно обработке конструкционной углеродистой стали (таблица 3).

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты и показатели степени.

Формула	C	x	y	u	q	m	p	w
Скорость резания	68,5	0,3	0,2	0,1	0,25	0,2	0,1	-
Сила резания	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	-	-	0

Значения приведенных пределов прочности, показателей степени и соответствующих поправочных коэффициентов (рассчитанных по формулам (4) и (8)) указаны в таблице 4.

Таблица 4

Приведенные прочность, показатели и поправочные коэффициенты

Способ приведения	Предел прочности, МПа		Приведенные			K_{mv}	K_{mp}
	Полиэтилен	Свинец	Прочность, МПа	показатели			
				n_v	n_p		
Средняя величина	13,5	20	16,75	-0,1	0,4	0,683 3	0,2186

Основные характеристики инструмента для разделения (дисковой пилы) приведены в таблице 5.

Таблица 5

Основные параметры дисковой фрезы

Материал	Диаметр, мм	Ширина, мм	Число зубьев	Передний угол	Задний угол
Сталь 9ФХ	560	5	176	-8°	7,5°

Проверка адекватности

Соответствие математической модели и оригинала (процесса разделения) обеспечивается использованием апробированных выражений [4 - 8] теории резания и технологии машиностроения.

Дополнительно проверено соответствие модели и оригинала [9] по основной выходной переменной модели и оригинала, а именно по времени разделения аккумулятора.

Предельные допустимые отклонения значений выходных переменных оригинала ξ_{max} и ξ_{min} определены [9] по формулам (9, 10) с использованием статистических оценок математических ожиданий ξ и средних квадратических отклонений s экспериментальных данных.

Значения статистики $\zeta(n, Q)$ определены по таблице 4.8в [11] при $Q=5\%$.

$$\xi_{\max} = \xi + \zeta(n, Q) \cdot s \quad (9)$$

$$\xi_{\min} = \xi - \zeta(n, Q) \cdot s \quad (10)$$

Соотношение рассчитанных с помощью математической модели и экспериментальных значений времени разделения (таблица 6) показывает, что гипотеза о соответствии модели и оригинала не может быть отклонена [9].

Таблица 6

Проверка соответствия модели и оригинала.

Вид аккумулятора	Математическая модель разделения, мин.	ζ_{\max} , мин	ζ_{\min} , мин
АКБ 6СТ-60	4,267	5,159	2,443

Разработка конструктивно-технологических предложений

Технологическая схема разделения (рис. 2) описывает схему базирования и закрепления аккумулятора, кинематику инструмента и аккумулятора при разделении, основные кинематические и энергосиловые параметры режима резания.

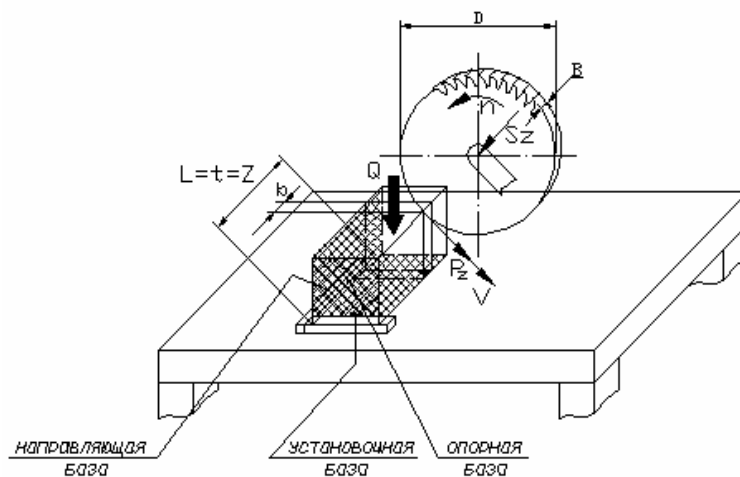


Рисунок 2 - Технологическая схема разделения

Для базирования используется комплект базовых поверхностей (установочная, направляющая и опорная базы), характерный для призматических деталей, к которым (по форме) относится аккумулятор.

Закрепление аккумулятора с силой зажима Q (которая определяется из условия неподвижности аккумулятора при действии силы резания P_z) производится вручную. Разделение производится с руч-

ной подачей при одновременном захвате всего поперечного сечения аккумулятора.

Оптимизация параметров конструктивно-технологических предложений

Задача оптимизации формулируется на основе математической модели процесса (1) – (8) как задача об определении значений кинематических параметров режима резания, при которых основное время резания (критерий оптимизации) минимально и одновременно выполняются ограничения по стойкости дисковой пилы и мощности резания:

$$\begin{aligned} T &= \frac{L}{n \cdot s} \cdot \frac{Z}{t} \rightarrow \min, \\ T &\geq [T], \\ N &\leq [N], \end{aligned} \quad (11)$$

где $[T]$ и $[N]$ – предельно допустимые значения стойкости инструмента и мощности резания.

В качестве примера рассмотрим решения задачи оптимизации для разделения конкретного вида свинцового аккумулятора, а именно, АКБ 6СТ-60. С учетом изложенного ранее формулировка задачи оптимизации примет вид:

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{1,625}{n \cdot s_z} \rightarrow \min, \\ \frac{A_v}{s \cdot n^5} &\geq [T], \end{aligned} \quad (12)$$

$$K_N \cdot s^{0.72} \cdot n \leq [N],$$

$$n < 20 \text{ об/мин}, \quad s_z < 0,2 \text{ мм.}$$

Учитывая нелинейный вид формулировки задачи оптимизации для ее решения использован известный [10] вариант градиентного метода оптимизации, основанный на имитационных экспериментах с ММ процесса разделения. Ход решения представлен в таблице 7.

Начальные значения (основни уровни) и интервалы варьирования оптимизируемых переменных (n и s_z) выбраны с учетом результатов теоретических исследований (приблизительно посередине установленных предельных диапазонов). После определения составляю-

щих градиента целевой функции их значения были уменьшены в десять раз (для обеспечения возможности реализации движения по градиенту). Для начала движения по градиенту выбрано сочетание факторов, которые имеют наиболее подходящие значения критерия оптимизации и ограничений (третий имитационный эксперимент в таблице 7).

Таблица 7

Решение задачи оптимизации

	Подача, мм	Частота, об/мин	Время, мин	Стойкость, мин	Мощность, кВт
Основной уровень	0,05	10	3,25	50,91156	2,4462799
Интервал	0,02	0,5			
Верхний уровень	0,07	10,5	2,210884	28,49324	3,2727108
Нижний уровень	0,03	9,5	5,701754	109,6597	1,6087874
Имитационные эксперименты					
1	0,07	10,5	2,210884	28,49324	3,2727108
2	0,07	9,5	2,443609	46,99702	2,961024
3	0,03	10,5	5,15873	66,48423	1,7781334
4	0,03	9,5	5,701754	109,6597	1,6087874
Градиент	-1,551497792	-0,19394			
Шаг движения	-0,031029956	-0,09697			
Шаг корректируемый	-0,003102996	-0,0097			
Движение по градиенту					
5	0,033102996	10,5097	4,67085	59,97471	1,9104795
6	0,036205991	10,51939	4,266603	54,58237	2,0396722
7	0,039308987	10,52909	3,926184	50,04264	2,1660712
8	0,042411982	10,53879	3,635584	46,16837	2,2899719
9	0,045514978	10,54848	3,384613	42,82346	2,4116202

Оптимальное решение соответствует второму шагу движения по градиенту, так как в этом случае достигается предельное значение ограничения по стойкости фрезы: $n_{opt} = 10,5$ об/мин,

$$s_{z\ opt} = 0,036 \text{ мм/зуб.}$$

Дополнительный анализ показывает, что решение задачи оптимизации зависит от выбора начальной области. Это объясняется особенностями ММ, в частности, очень сильным (и противоречивым) влиянием входных переменных на выходные переменные. Например, частота вращения входит в выражение для стойкости инструмента в пятой степени. Для уменьшения влияния такой неоднородности следует провести более глубокое исследование допустимой области изменения входных переменных, что выходит за пределы целей настоящего исследования.

Использование системы математического моделирования, которая включает

- математическое моделирование (целеполагание, идеализация, формализация, идентификация, проверка адекватности);
- разработку конструктивно-технологических предложений;
- оптимизацию параметров конструктивно-технологических предложений,

позволяет эффективно решать практические задачи повышения эффективности механического разделения неоднородных конструкций электрических аккумуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы Международной конференции «Сотрудничество для решения проблемы отходов», 28–31 марта 2012 г., г. Харьков, Украина
2. Патент №48930 Україна, H01M10/54, C22B7/00. Спосіб переробки відпрацьованих акумуляторних батарей / Гончаренко В.І. (Україна). - №2002064740; Заявлено 10.06.2002; Опубл. 15.08.2002, Бюл. №8.-2 с.
3. Ясев А.Г. Комплексный метод совершенствования технологической оснастки процессов обработки деталей металлургических машин // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. Том 10. Дніпропетровськ: Системні технології, 2007. – с. 68-82
4. Филоненко С.Н. Резание металлов. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.
5. Справочник по обработке металлов резанием / Ф.Н. Абрамов, В.В. Коваленко, В.Е. Любимов и др. – К.: Техніка, 1983. – 239 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 1 / Под ред.. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1972. – 694 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / Под ред.. А.Н. Малова – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.
8. Механическая обработка пластмасс / Семко М.Ф. и др. –М.: Машиностроение, 1965.
9. Ясев А.Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении. - Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. - 237 с.
10. Ясев А.Г. Применение методов оптимизации технологических процессов. С. 163-217 // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. - Т. 8: «Оптимизация технологических процессов в машиностроении» - Одесса: ОНПУ, 2004. - 509 с.
11. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики.- М.: Наука, 1983. - 416 с.

В.В. Гнатушенко, С.Ю. Серета

ГЕОМЕТРИЧНЕ ТРАНСФОРМУВАННЯ ТА ПРИВ'ЯЗКА ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРОЕКЦІЙНОЇ ПРИРОДИ

Анотація. У роботі розглядається технологія геометричної обробки та прив'язки сканерних стереознімків високого просторового розрізнення, що дозволяє в подальшому отримувати цифрові моделі рельєфу на великі території. Наведено інформацію про структуру та використання програмного комплексу стереообробки, а також ілюстрації, що пояснюють особливості й елементи розглянутої технології на прикладі обробки стереозображень, отриманих від космічного апарату «Ikonos».

Ключові слова: сканерне проекційне зображення, прив'язка, геометрична корекція, опорні точки.

Постановка проблеми

При реальній зйомці орбітальними засобами дистанційного зондування на цифрових знімках мають місце геометричні спотворення, викликані нерівностями рельєфу, кривизною поверхні Землі, параметрами руху супутника та іншими причинами. Більшість сучасних супутників, особливо високого просторового розрізнення, надають можливість користувачеві одержання стереозображень (рис.1). При використанні лінійних матричних сканерів стереоефект може бути досягнутий одним з наступних способів: 1) використання одного сканера — стереоефект досягається креном камери поперек напрямку польоту. Це реалізовано, наприклад, в космічному апараті SPOT; 2) використання одного сканера та зміна кутів тангажу. У цьому випадку камера нахилена вперед та назад вздовж напрямку польоту. Цей тип стереохоплення використовується в КА IKONOS. Метод має перевагу скорочення проміжку часу між сценами стереопари та, як наслідок, зменшення радіометричних чи геометричних розходжень між ними; 3) використання трьох сканерів (трилінійна камера). У цьому випадку, використовуються три сканера, які “працюють” одночасно у надирному напрямку, у напрямках вперед та назад. Для

того, щоб вихідна видова інформація, отримана за допомогою дистанційного зондування, була придатна для її використання, вимагається фотограмметрична обробка космічних знімків. У зв'язку з цим виникає питання забезпечення високої точності географічної прив'язки знімків та правильного підбору способу трансформації.

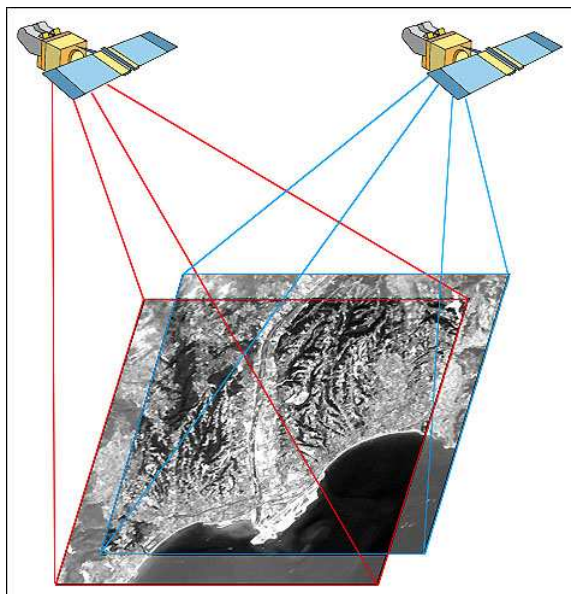


Рисунок 1 - Фіксація стереопари

Аналіз останніх досліджень

Ототожнення зображень, або прив'язка фрагментів, являє собою важливу задачу, що виникає в багатьох додатках машинного зору. Екологічний моніторинг, аналіз лісових ресурсів, моніторинг міських територій, автоматичний пошук даних дистанційного зондування у великих базах даних - тільки деякі з додатків, при вирішенні яких виникає задача розпізнавання і прив'язки фрагментів зображення. Істотні зміни в застосуванні методів такого типу пов'язані з розробкою та реалізацією нового покоління пристроїв, безпілотних літальних апаратів та наземних автономних роботів з елементами штучного інтелекту. Цим пояснюється збільшена актуальність розробки спеціалізованих алгоритмів для обробки даних різних видів зйомки, включаючи, в першу чергу, авіаційну та космічну. За сформованою до теперішнього часу класифікації виділяють алгоритми низького, середнього та високого рівнів [2], причому два останніх типа використовують для розпізнавання характерних особливостей зображення (FBM, feature based methods), такі, як точки, контури чи області [3]. На відміну від низькорівневих, майданних (ABM, area-based methods) FBM-методи мають більш високу стійкість щодо умов реєст-

рації зображень. Ця властивість дозволяє більш успішно використовувати FBM-методи в ситуаціях, коли умови освітлення або геометрія зйомки змінюються або точна інформація про масштаб і орієнтації зображень відсутня. З іншого боку, вони, природно, є більш наукомісткими і вимагають більш високих обчислювальних витрат. У роботі [4] розглядаються питання впливу помилок топографічної прив'язки опорних точок та їх кількості на характеристики скоригованого зображення. Вибір опорних точок на знімках пов'язаний з трудомісткістю процесу. Вони повинні бути рівномірно розподілені по знімку. Для того щоб знизити ймовірність помилкової ідентифікації фрагментів, у праці [4] було запропоновано методіку пошуку опорних точок проєкційних зображень. В результаті пошук виконувався не на всьому зображенні, а тільки уздовж епіполлярної лінії. Автори [5] пропонують алгоритм автоматичного пошуку контрольних точок, який дозволяє ідентифікувати значну кількість контрольних точок у складних умовах зйомки.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Але існуючі моделі і методи попередньої обробки стереозображень не дозволяють ефективно компенсувати геометричні та радіометричні спотворення з урахуванням динаміки формоутворення унаслідок відсутності адекватної фізичної моделі формування сканерних стереозображень. Це приводить до зниження рівня вірогідності дешифрування об'єктів на цифровому знімку, а зазначені особливості вимагають розробки та застосування специфічних алгоритмів трансформування та прив'язки стереозображень.

Основна частина

Одним із способів геометричної корекції є метод DLT (Direct Linear Transformation), при якому використовуються співвідношення афінної відповідності між точками місцевості і знімка [6]:

$$\begin{aligned}x &= \frac{a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}Z + a_{14}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}Z + 1} \\y &= \frac{a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}Z + a_{24}}{a_{31}X + a_{32}Y + a_{33}Z + 1}.\end{aligned}\quad (1)$$

Цей спосіб трансформування реалізований у вигляді команди *Registration* (Реєстрація) пункту головного меню *Map* (Карта) програмного комплексу ENVI [7]. Команду *Registration* (Реєстрація) можна використовувати для геоприв'язки зображень, геометричної корекції, перепроєціювання знімка у задану проєкцію.

В інтерактивному режимі оператор в залежності від виду вихідної інформації має можливість виконати наступні операції: *Select GCPs: Image to Image* - вибір наземних опорних точок і реєстрація зображення в зображення; *Select GCPs: Image to Map* - вибір наземних опорних точок і реєстрація зображення в карту місцевості.

Розглянемо реєстрацію зображень першим способом, для якого потрібно щоб були відкриті два зображення. В головному меню ENVI вибираємо *Map > Registration > Select GCPs: Image to Image*. Для визначення наземних опорних точок на двох зображеннях одне з них вибираємо як базове зображення, а друге зображенням є те, для якого виконується прив'язка. Відповідно до цього у вікні *Image to Image Registration* вказуємо в якому дисплеї завантажено кожне із них (рис. 2).

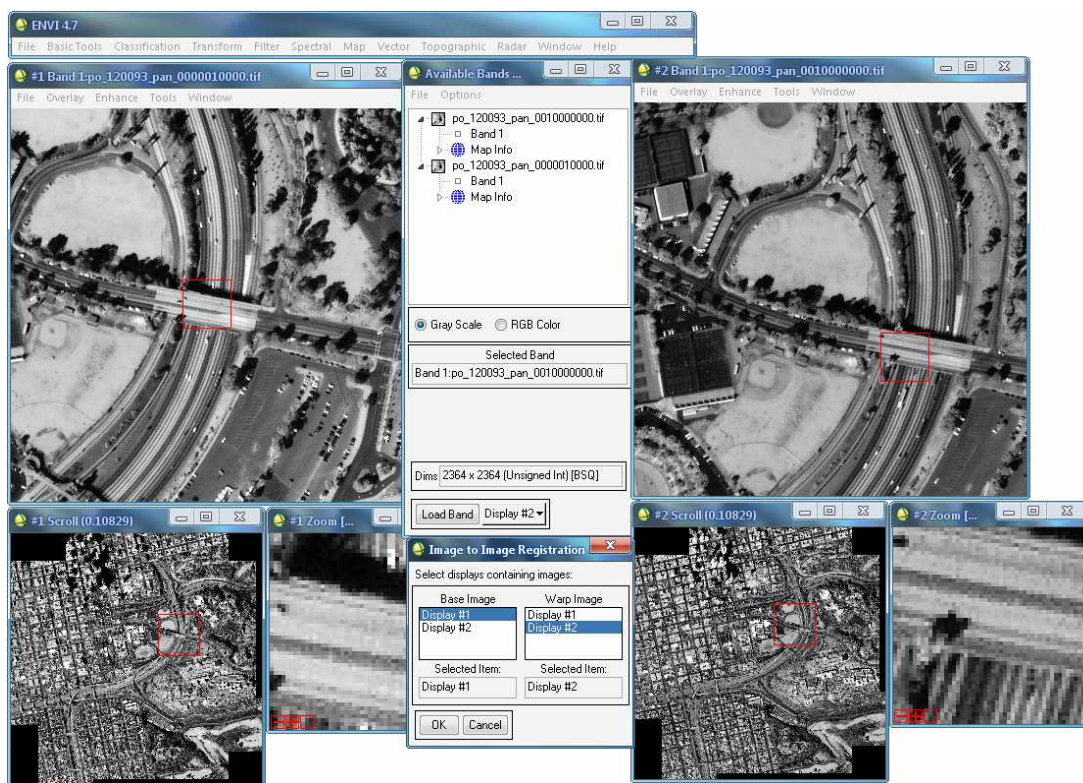


Рисунок 2 - Зображення для геоприв'язки, вибір базового зображення та відповідного вихідного зображення

На наступному етапі знаходимо характерні точки місцевості на базовому зображенні та зображенні, яке буде трансформовано. Цими точками можуть служити кути, створених людиною, якихось об'єктів, сільськогосподарських полів, перехрестя доріг. Для цього обираємо об'єкт, який можна розпізнати на двох зображеннях, і перемістимо на нього рамку вікна *ZOOM* (Масштабування), а безпосередньо

у вікні *ZOOM* поставимо перехрестя курсору на вершину кута фігури цього об'єкта. Таким же чином відбирається піксель і на другому зображенні. В діалоговому вікні *Ground Control Points Selection* (Вибір опорних точок) з'явиться інформація про пікселі (рис. 3). Додамо відбрану опорну точку до списку наземних опорних точок. Виберемо опорні точки на знімках так, щоб вони рівномірно були розподілені по всьому зображенню. Оцінимо якість набраних точок, проаналізувавши *RMS Error* (середньоквадратичну помилку точок прив'язки). В результаті чого видно, що проєкції зображень незначно відрізняються одна від одної, оскільки значення *RMS Error* менше 1 (рис. 4). Результат подано на рис.5.

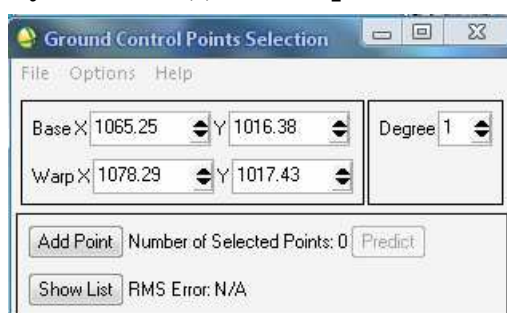


Рисунок 3 - Діалогове вікно Ground Control Points Selection

	Warp X	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS
#1+	860.71	1177.0702	861.3239	0.2102	0.6139	0.6489
#2+	640.00	1970.4306	640.4108	0.1406	0.4108	0.4342
#3+	1428.86	1603.2040	1428.1998	-0.2260	-0.6602	0.6978
#4+	1471.57	2148.6213	1471.7199	0.0513	0.1499	0.1585
#5+	135.75	1546.8239	135.2356	-0.1761	-0.5144	0.5437

Рисунок 4 - Список опорних точок і оцінка їх якості

Висновки та перспективи подальших досліджень

При аналізі знімків ДЗЗ важливими процедурами є геоприв'язка, геометрична корекція, відновлення зображень. Залежно від ефективності їх виконання залежить якість кінцевого продукту. Якщо коректно вибрати опорні точки, то обробку знімка можна провести з субпіксельною точністю. Слід зазначити, що зіставлення околиць опорних точок не піддається строгій формалізації, оскільки в його основі лежить проблема ідентифікації по зображенням фрагментів реальної тривимірної поверхні, що важко піддаються адекватному формальному опису. Виникаючи при зйомці і залежні від ракурсу проєктивні та яскравісні перетворення приводять до того, що в зображеннях ділянки сцени, знятої під різними ракурсами, з'являються значні відмінності. Принципово важливо те, що ці відмінності залежать не тільки від геометрії зйомки, але і від геометричних і фізичних характеристик самої сцени. Розташування джерел світла стосовно поверхні сцени впливає на розподіл освітленості. По-

ложення елементів сцени, їх відбивні властивості визначають кількість енергії, що попадає до систем реєстрації, а отже, і локальні відмінності в яскравостях опорних фрагментів зображень.



Рисунок 5

Проведення подальших досліджень буде пов'язано з спільною обробкою багатоканальних зображень надвисокого просторового розрізнення та присвячено визначенню критерію «подібності» опорних фрагментів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Белозерский Л.А. Особенности полиномиальной геометрической коррекции применительно к задачам анализа изображений разновременной космической съемки / Л.А. Белозерский Л.А., Н.И. Мурашко, Д.С. Суценья // Штучний інтелект. — 2010. — № 3. — С. 299—311.
2. Davis E.R. Machine Vision, Third Edition: Theory, Algorithms, Practicalities. — Amsterdam: Elsevier, 2005. — 934 p.
3. Schenk T. Digital Photogrammetry. V.1. — Dayton: TerraScience, 1999. 422 p.
4. Гнатушенко В.В. Геометрія пошуку опорних точок при обробці зображень / В.В. Гнатушенко, О.В. Реута // Прикладна геометрія та інженерна графіка. — К., 2003. — Вип. 73. — С. 184—189.
5. Кравченко А.Н. Алгоритм географічної прив'язки знімків супутника «СІЧ-2» / А.Н. Кравченко, Н.С. Лавренюк, Н.М. Куссуль // Наукові праці ДонНТУ.— 2013. — № 2(18). — С. 71—79.
6. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва, Техносфера, 2010, 560 с.
7. Совзонд. Программный комплекс ENVI. Учебное пособие.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОВ В ЗАДАЧЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С РЕГЕНЕРАТОРАМИ

Достоверность моделирования тепловой работы печных агрегатов зависит от правильности определения теплофизических свойств газов и их смесей. В работе приведена методика расчёта вязкости, теплоёмкости, коэффициента диффузии и теплопроводности печных газов применительно к математической модели нагревательной печи с регенераторами.

Ключевые слова: математическое моделирование, расчёт, теплофизические свойства.

Введение

Математическое моделирование сегодня является основным инструментом конструирования печных агрегатов. Разработке проектных решений, выполнению рабочих чертежей и другим традиционным этапам проектирования всегда предшествуют численные исследования и расчёты печных процессов. Сложные математические модели печных агрегатов всё активнее вытесняют эксперимент, который необходим при проверке адекватности расчётов натурным объектам и исследовании сложных многопараметрических процессов.

Математическая модель нагревательной печи с регенераторами

Модель разработана на кафедре теплотехники и экологии металлургических печей НМетАУ и реализована в виде комплекса программ для исследования совмещённых процессов горения топлива, движения газов и теплообмена. Для расчёта поля скоростей в модели используются уравнения Навье – Стокса и неразрывности. Обобщенное дифференциальное уравнение движения газа для трёх направлений и уравнение неразрывности запишется в виде:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \frac{\partial(\rho U\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W\phi)}{\partial z} = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad } \phi) + S_{\phi} + S_P. \quad (1)$$

Турбулентность движения газов учитывается с помощью двух-параметрической $k-\varepsilon$ модели в RNG-модификации. В модели решается уравнение энергии для смеси печных газов (2) с соответствующими краевыми условиями:

$$\frac{\partial(\rho CT)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho CTU)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho CTV)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho CTW)}{\partial z} = \text{div}(\lambda_f \text{grad} T) + Q_R + Q_F. \quad (2)$$

На поверхностях нагреваемого металла задаётся закон теплообмена, связывающий модель с внутренней задачей нагрева. Для случая турбулентного движения конвективный тепловой поток рассчитывается как

$$q_w = \frac{\rho C v_\tau (T_\delta - T_w)}{T^+}. \quad (3)$$

Для описания оптических свойств и расчёта излучения селективных неизотермических печных газов принята модель взвешенной суммы серых газов Х. Хоттеля (WSGGM). Объемная плотность лучистого теплового потока в газе для формулы (2) находится как

$$Q_R = \sum_{n=1}^N k_n \left(4a_n \sigma_0 T^4 - \int_{4\pi} I_n d\Omega \right). \quad (4)$$

Горение предполагается с бесконечной скоростью протекания реакций и с учётом турбулентности согласно Eddy Break-Up – модели разрушения вихрей Д.Б. Сполдинга. Скорость протекания химических реакций при турбулентном движении:

$$S_{fu} = -\rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(C_R m_{fu}, C_R \frac{m_{ox}}{s}, C'_R \frac{m_{pr}}{l+s} \right). \quad (5)$$

Для решения уравнений движения, турбулентности, энергии и горения, используется метод контрольного объема. Уравнение переноса излучения газа совместно с моделью WSGGM решается с помощью метода дискретных ординат. Решение всех уравнений комплекса моделей осуществляется последовательно на одной прямоугольной сетке, кроме уравнения движения, для которого вводятся дополнительные узлы сетки. В них определяются компоненты вектора скорости. Для получения стойкого решения всех уравнений используется нижняя релаксация. Критерием сходимости при решении уравнения движения служит невязка уравнения неразрывности для расчетной области, а для уравнения энергии используется невязка теплового баланса.

Более подробно математическая модель нагревательной печи с высокотемпературным подогревом воздуха в регенераторах и обозначения величин, входящих в уравнения (1)-(5) приведены в статье [1].

Для получения корректных решений с помощью математического моделирования необходимо задание физических свойств газовых смесей (динамической вязкости, теплопроводности, теплоемкости, диффузии, плотности и др.) в зависимости от их температуры и состава. В настоящей работе приведены сведения о методике определения теплофизических свойств газов, принятой в математической модели.

Динамическая вязкость газов и их смесей

Динамическая вязкость элементарных газов может быть определена в рамках кинетической теории газов Чэпмена и Энскога по уравнению [2]:

$$\mu = \frac{2,6693 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{MT}}{\sigma^2 \cdot \Omega_v}, \quad (6)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с; M – молекулярная масса газа, кг/кмоль; T – температура газа, К; σ – характеристическая длина, Å; Ω_v – интеграл столкновений, учитывающий межмолекулярное взаимодействие и зависящий от потенциальных функций Леннарда – Джонса для неполярных газов и Штокмайера для полярных газов.

Интеграл столкновений зависит от безразмерной температуры $T^* = kT/\varepsilon_0$. Величины ε_0/k и σ являются параметрами потенциальной функции Леннарда – Джонса и для элементарных печных газов приведены в табл. 1.

Зависимость интеграла столкновений от безразмерной температуры можно представить в виде аппроксимации, предложенной Нойфельдом для неполярных газов [3]:

$$\Omega_v = \frac{A}{(T^*)^B} + \frac{C}{\exp(D \cdot T^*)} + \frac{E}{\exp(F \cdot T^*)}, \quad (7)$$

где $A=1,16145$, $B=0,14874$, $C=0,52487$, $D=0,7732$, $E=2,16178$, $F=2,43787$.

Для полярных газов используется метод Брокау:

$$\Omega_{v,Sh} = \Omega_{v,LD} + \frac{0,2 \cdot \delta^2}{T^*}, \quad (8)$$

где $\Omega_{v,Sh}$ - интеграл столкновений, определенный на основе констант потенциала Штокмайера; $\Omega_{v,LD}$ - интеграл столкновений, определенный на основе констант потенциала Леннарда-Джонса, рассчитываемый по формуле (7).

Расчетные значения вязкости элементарных газов $\mu \cdot 10^{-6}$ в зависимости от температуры приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры потенциальной функции Леннарда – Джонса
для элементарных печных газов [4]

№, п/п	Газ	M , кг/кмоль	ε_0/k , К	σ , Å
1	Водород (H_2)	2,016	59,7	2,827
2	Азот (N_2)	28,016	71,4	3,798
3	Кислород (O_2)	32,000	106,7	3,467
4	Окись углерода (CO)	28,01	91,7	3,69
5	Диоксид углерода (CO_2)	44,01	195,2	3,941
6	Водяной пар (H_2O)	18,02	485,25	3,437
7	Метан (CH_4)	16,04	148,6	3,758
8	Этилен (C_2H_4)	28,05	224,7	4,163
9	Этан (C_2H_6)	30,07	215,7	4,443
10	Пропан (C_3H_8)	44,09	237,1	5,118
11	Бутан (C_4H_{10})	58,12	531,4	4,687

Таблица 2

Значение коэффициента динамической вязкости газов в газовой смеси

№, п/п	Газ	Вязкость газов μ в зависимости от температуры, Па·с, 10^6			
		300	800	1300	1800
1	Водород (H_2)	8,89	16,99	23,28	28,76
2	Азот (N_2)	8,10	21,47	32,25	41,29
3	Кислород (O_2)	17,68	34,85	47,79	59,02
4	Окись углерода (CO)	14,84	33,79	47,66	59,20
5	Диоксид углерода (CO_2)	17,70	34,17	46,82	57,83
6	Водяной пар (H_2O)	20,57	41,21	56,57	69,87

№, п/п	Газ	Вязкость газов μ в зависимости от температуры, Па·с, 10^6			
		300	800	1300	1800
7	Метан (CH_4)	11,19	23,47	32,43	40,08
8	Этилен (C_2H_4)	10,22	23,18	32,66	40,56
9	Этан (C_2H_6)	8,27	18,98	26,83	33,36
10	Пропан (C_3H_8)	7,46	19,97	30,33	39,01
11	Бутан (C_4H_{10})	8,89	16,99	23,28	28,76

Вязкость газовых смесей (в частности бинарных) может быть больше вязкости любого элементарного газа. Она зависит от состава смеси.

Для смеси, состоящей из N компонентов, вязкость может быть определена из зависимости

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{1 + \sum_{j=1}^N \phi_{ij} \left(\frac{y_i}{y_j} \right)}. \quad (9)$$

Величина $\phi_{i,j}$ определяется из выражения:

$$\phi_{i,j} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4} \right]^2}{\left\{ 2\sqrt{2} \left[1 + (M_i/M_j)^{1/2} \right] \right\}}. \quad (10)$$

Теплопроводность газов

Теплопроводность элементарных газов может быть определена аппроксимирующими степенными функциями по экспериментальным данным для каждого газа в зависимости от температуры. Аппроксимирующая зависимость может иметь вид:

$$\lambda = A + BT + CT^2 + DT^3, \quad (11)$$

где λ – теплопроводность газа, Вт/(м·К); T – температура, К; A , B , C , и D – коэффициенты аппроксимации.

Значения коэффициентов аппроксимации для элементарных газов при нормальном давлении приведены в табл. 3.

Теплопроводность газовой смеси может быть рассчитана по следующей зависимости:

$$\lambda_{см} = \frac{\sum_{j=1}^N y_j \cdot \lambda_j}{\sum_{j=1}^N y_j \cdot A_{ij}}, \quad (12)$$

где $A_{ij} = 1,065 \cdot \phi_{ij}$.

Таблица 3

Значения коэффициентов аппроксимации
теплопроводности для газов [5]

№, п/п	Газ	A	B	C	D
1	Водород (H_2)	$8,099 \cdot 10^{-3}$	$6,689 \cdot 10^{-4}$	$-4,158 \cdot 10^{-7}$	$1,562 \cdot 10^{-10}$
2	Азот (N_2)	$3,919 \cdot 10^{-4}$	$9,816 \cdot 10^{-5}$	$-5,067 \cdot 10^{-8}$	$1,504 \cdot 10^{-11}$
3	Кислород (O_2)	$-3,273 \cdot 10^{-4}$	$9,966 \cdot 10^{-5}$	$-3,743 \cdot 10^{-8}$	$9,732 \cdot 10^{-12}$
4	Окись углерода (CO)	$5,067 \cdot 10^{-4}$	$9,125 \cdot 10^{-5}$	$-3,524 \cdot 10^{-8}$	$8,199 \cdot 10^{-12}$
5	Диоксид углеро- да (CO_2)	$-7,215 \cdot 10^{-3}$	$8,015 \cdot 10^{-5}$	$5,477 \cdot 10^{-9}$	$-1,053 \cdot 10^{-11}$
6	Водяной пар (H_2O)	$7,341 \cdot 10^{-3}$	$-1,013 \cdot 10^{-5}$	$1,801 \cdot 10^{-7}$	$-9,100 \cdot 10^{-11}$
7	Метан (CH_4)	$-1,869 \cdot 10^{-3}$	$8,727 \cdot 10^{-5}$	$1,179 \cdot 10^{-7}$	$-3,614 \cdot 10^{-11}$
8	Этилен (C_2H_4)	$-1,760 \cdot 10^{-2}$	$1,200 \cdot 10^{-4}$	$3,335 \cdot 10^{-8}$	$-1,366 \cdot 10^{-11}$
9	Этан (C_2H_6)	$-3,174 \cdot 10^{-2}$	$2,201 \cdot 10^{-4}$	$-1,923 \cdot 10^{-7}$	$1,664 \cdot 10^{-10}$
10	Пропан (C_3H_8)	$1,858 \cdot 10^{-3}$	$-4,698 \cdot 10^{-6}$	$2,177 \cdot 10^{-7}$	$-8,409 \cdot 10^{-11}$
11	Бутан (C_4H_{10})	$-1,052 \cdot 10^{-2}$	$5,771 \cdot 10^{-5}$	$1,018 \cdot 10^{-7}$	$-4,271 \cdot 10^{-11}$

Коэффициент диффузии

Для расчета диффузии компонента газовой смеси в многокомпонентной смеси используется приближенная зависимость:

$$D_{1,m} = \frac{(1 - y_1)}{\sum_{i=2}^N (y_i / D_{1,i})}, \quad (13)$$

где $D_{1,i}$ – коэффициент бинарной диффузии газа 1 в газе i , m^2/c ;

y_1, y_i – мольная доля 1-го и i -го компонента.

Значения бинарной диффузии может быть рассчитано на основании потенциала Леннарда – Джонса:

$$D_{1,2} = \frac{1,858 \cdot 10^{-12} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \left[\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \cdot \sigma_{1,2}^2 \cdot \Omega_D}, \quad (14)$$

где $\sigma_{1,2} = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$ - параметр потенциала Леннарда – Джонса соответствующий параметру σ для элементарного газа; P - давление газовой смеси, Па; Ω_D - интеграл столкновений для диффузии, основанный на потенциале Леннарда – Джонса, значение которого аппроксимировано в работе [3] и имеет вид:

$$\Omega_D = \frac{A}{(T^*)^B} + \frac{C}{\exp(D \cdot T^*)} + \frac{E}{\exp(F \cdot T^*)} + \frac{G}{\exp(H \cdot T^*)}, \quad (15)$$

где $A=1,06036$, $B=0,1561$, $C=0,193$, $D=0,47635$, $E=1,03587$, $F=1,52996$, $G=1,76474$, $H=3,89411$.

Для расчета значений Ω_D необходимо определить параметр T^* , где значение $\varepsilon_{1,2}/k$ рассчитывается по формуле:

$$\frac{\varepsilon_{1,2}}{k} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{k k}}. \quad (16)$$

Теплоемкость газов

Значение удельной массовой теплоемкости газов при постоянном давлении в зависимости от температуры может быть рассчитано по следующей аппроксимирующей формуле:

$$C_p = A + BT + CT^2 + DT^3, \quad (17)$$

где C_p - удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); T - температура, К;

A , B , C , и D – коэффициенты аппроксимации.

Значения постоянных A, B, C, D для каждого элементарного газа приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов аппроксимации
теплоемкости для газов [5]

№, п/п	Газ	A	B	C	D
1	Водород (H_2)	$1,346 \cdot 10^4$	4,6	$-6,850 \cdot 10^{-3}$	$3,792 \cdot 10^{-6}$
2	Азот (N_2)	$1,112 \cdot 10^3$	$-4,844 \cdot 10^{-1}$	$9,566 \cdot 10^{-4}$	$-4,169 \cdot 10^{-7}$

№, п/п	Газ	A	B	C	D
3	Кислород (O_2)	$8,784 \cdot 10^2$	$-1,150 \cdot 10^{-4}$	$5,456 \cdot 10^{-4}$	$-3,328 \cdot 10^{-7}$
4	Окись углерода (CO)	$1,789 \cdot 10^3$	$1,068 \cdot 10^{-1}$	$5,855 \cdot 10^{-4}$	$-1,996 \cdot 10^{-7}$
5	Диоксид углерода (CO_2)	$1,102 \cdot 10^3$	$-4,588 \cdot 10^{-1}$	$9,957 \cdot 10^{-4}$	$-4,541 \cdot 10^{-7}$
6	Водяной пар (H_2O)	$4,499 \cdot 10^2$	1,669	$-1,273 \cdot 10^{-3}$	$3,897 \cdot 10^{-7}$
7	Метан (CH_4)	$1,200 \cdot 10^3$	3,25	$7,463 \cdot 10^{-4}$	$-7,057 \cdot 10^{-7}$
8	Этилен (C_2H_4)	$1,357 \cdot 10^2$	5,583	$-2,976 \cdot 10^{-3}$	$6,257 \cdot 10^{-7}$
9	Этан (C_2H_6)	$1,799 \cdot 10^2$	5,923	$-1,741 \cdot 10^{-3}$	$-6,378 \cdot 10^{-8}$
10	Пропан (C_3H_8)	$9,580 \cdot 10^1$	6,947	$-3,597 \cdot 10^{-3}$	$7,292 \cdot 10^{-7}$
11	Бутан (C_4H_{10})	$1,632 \cdot 10^2$	5,7	$-1,906 \cdot 10^{-3}$	$-4,855 \cdot 10^{-8}$

Теплоемкость смеси газов рассчитывается по правилу аддитивности по известной массовой доле газов.

Выводы

Корректное определение теплофизических свойств газов в задаче математического моделирования нагревательной печи с регенераторами позволило выполнить ряд расчётов, достоверность которых подтверждена практикой [1]. Математическая модель нагревательной печи с высокотемпературным подогревом воздуха в регенераторах может быть использована для проектирования новых и реконструкции существующих топливных печей, выбора эффективных режимов их работы с целью высокого качества нагрева металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерёмин А. О. Применение численных методов математического моделирования при разработке современной конструкции промышленных печей и их элементов / А. О. Ерёмин // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: зб. наук. пр. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія. – 2012. – Вип. 4. – С. 97–116.
2. Joseph O. Hirschfelder. Molecular Theory of Gases and Liquids / Joseph O. Hirschfelder, Charles Francis Curtiss, Robert Byron Bird. – New York, John Wiley & Sons, Inc., 1954. – 1249 p.
3. Neufeld P. D., Janzen A. R., Aziz R. A. Empirical equations to calculate 16 of the transport collision integrals for the Lennard-Jones (12-6) potential // J. Chem. Phys. – 1972. – Vol. 57. – 1100 p.
4. Svehla R.A. Estimated viscosities and thermal conductivity of gases at high temperatures NASA Tech. Rep. NR-132, 1962, – 115p.
5. Reid R. C., Prausnitz J. M., Poling B. E. The properties of gases and liquids (4 ed.), 1987. – 753 p.

Альрабаба Хамза

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ И ПРАВИЛА РАБОТЫ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ И УПРАВЛЯЕМЫХ КЛЕТОЧНЫХ ТЕТРААВТОМАТОВ

Аннотация. Сформулировано определение клеточных тетраавтоматов как одного из видов постбинарных клеточных автоматов. Предложено использование неуправляемых и управляемых клеточных тетраавтоматов для совершенствования алгоритмической базы клеточных автоматов. Даны их формальные описания. Рассмотрен способ задания начальных значений клеточных тетраавтоматов, дающий наглядное представление о преимуществах двух дополнительных состояний тетракода (множественности M и неопределенности A) для задания исходных значений КА. Выполнены количественные оценки параметров распределения множества точек в пространстве клеточного автомата, заданные тетракодами. Показано возможность эффективного использования тетралогика и тетракодов дальнейшего развития теории и практики КА.

Ключевые слова: постбинарный клеточный автомат, тетраавтомат, расширенный кодо-логический базис, тетралогика, тетракоды, игра Конвея «Жизнь».

Введение

В цикле работ [1–3] отмечено, что к постбинарным клеточным автоматам (ПКА) могут быть отнесены такие клеточные автоматы (КА), число состояний ячеек в которых больше двух. При этом предполагается также возможность использования постбинарной логики и постбинарного кодирования. В работах [5–7] в их качестве рассматриваются тетралогика и тетракодирование соответственно. Таким образом, частным случаем постбинарных клеточных автоматов могут выступать клеточные тетраавтоматы (КТА), которые исследуются в данной работе.

Целью данной работы является разработка и исследование управляемых (УКТА) и неуправляемых (НКТА) тетраавтоматов с пре-

доставлением формального описания и правил перехода состояний автоматов на базе тетракодов.

Определение и основные параметры КТА

КТА – такой вид ПКА, в котором исходные комбинации задаются с помощью тетракодов, а при задании состояний клеток и локальных зависимостей используется тетралогика.

Любой клеточный тетраавтомат задается полем из четырех компонентов:

$$KTA = \langle Z, T, N, h \rangle \quad (1)$$

Формула (1) включает в себя следующие компоненты:

1. Z – дискретное пространство КТА, которое определяется аналогично тривиальному КА как целочисленная двумерная решетка: все клетки решетки (ячейки, элементы пространства Z) равноудалены друг от друга на конечное расстояние.

2. T – алфавит внутренних состояний, который, по сути, представляет собой элемент тетракода [4]. В свою очередь n -разрядный тетракод может быть задан набором из n тетритов, каждый из которых может содержать одно из четырех значений:

$$T = \{t_i \mid i = \overline{0, n-1}, t_i = 0 \wedge t_i = A \wedge t_i = M \wedge t_i = 1\} \quad (2)$$

3. N – вектор соседства, который служит для определения соседей для любого единичного автомата структуры:

$$N = \{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_{n-1}, \vec{x}_n\} \quad (3)$$

В случае с КТА, как и в КА, $n = 4$ для соседства фон Неймана и $n = 8$ для соседства Мура (рис. 1).

4. h – локальная функция переходов, которая задает правила поведения каждой клетке-автомату структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних автоматов (в зависимости от вектора соседства N) и основана на тетралогике [4–5].

	$(i, j+1)$		$(i-1, j+1)$	$(i, j+1)$	$(i+1, j+1)$
$(i-1, j)$	(i, j)	$(i+1, j)$	$(i-1, j)$	(i, j)	$(i+1, j)$
	$(i, j-1)$		$(i-1, j-1)$	$(i, j-1)$	$(i+1, j-1)$

Рисунок 1 - Типы соседства в КТА для ячейки с координатами (i, j) (слева – соседство фон Неймана, справа – соседство Мура)

На каждом дискретном шаге времени осуществляется пересчет функции переходов для каждой ячейки автомата. Шаг считается завершенным после определения нового состояния каждой клетки. Обновление значений состояний всех клеток происходит одновременно.

В работе предложены два вида КТА:

– неуправляемые (НКТА) – вид КТА, в котором пользователь не может вмешиваться в процесс эволюции;

– управляемые (УКТА) – вид КТА, в котором пользователь может корректировать процесс эволюции, задавая некий набор новых условий в процессе работы автомата.

Задание начальных состояний КТА

Одним из важных этапов при моделировании КА является задание начальных условий. В существующих версиях программных реализаций КА этот процесс осуществляется различными способами, однако для ускорения процесса задания начальных условий эффективным можно назвать способ, при котором используются тетракоды как разновидность постбинарных кодов [4, 6–9].

Понятие тетракодов впервые было введено в 1996 году в работе [7] как расширение традиционного двоичного кодо-логического базиса. Каждый разряд тетракода фактически представляет (кодирует) одно из значений тетралогии. Впервые использовать тетралогии и тетракоды для усовершенствования КА было предложено в работе [8].

Тетралогия является кортежем четырех состояний:

$$L_4 = \{0, 1, A, M\}, \quad (4)$$

где: 0 – «Ложь»; 1 – «Истина»; A – значение неопределенности или равновероятности (или «Ложь», или «Истина»); M – значение множественности или равновозможности (и «Ложь», и «Истина»).

Дополнение к двум традиционным состояниям (0 – «Ложь» и 1 – «Истина») состояний множественности M и неопределенности A дает возможность существенно расширить диапазон кодируемых значений: в отличие от традиционного бинарного кода, определяющего единственное (точечное) значение на числовой оси, появляется возможность задания сразу множества значений [9].

Особый интерес к тетракодам обусловлен тем, что они позволяют задавать не единичное значение, а определенное множество значений, специфическим образом расположенных на числовой оси. Наличие хотя бы в одном разряде значения M приводит к увеличению

числа фиксированных значений множества, а значения A в одном из разрядов – к неопределенности соответствующего числового значения [10].

Для чисел в формате тетракода справедливо следующее:

1) количество возможных точек K_L на оси для числа в формате тетракода зависит от количества разрядов k_M , содержащих значение множественности M :

$$K_L = 2^{k_M}. \quad (5)$$

2) количество возможных перестановок K_N из точек на оси для числа в формате тетракода зависит от количества разрядов k_A , содержащих значение неопределенности A :

$$K_N = 2^{k_A}. \quad (6)$$

Среди способов задания исходных значений в пространстве КА с помощью тетракодов, наиболее эффективной видится матричная форма представления (МФП) в пространстве двумерного (2D) КТА с соответственно двумя координатами X и Y .

Таким образом, учитывая двухмерность КА, формулы (5) и (6) можно представить в виде произведения количеств точек для каждой координаты:

$$K_L^{(x,y)} = K_L^{(x)} \cdot K_L^{(y)} = 2^{k_M^{(x)}} \cdot 2^{k_M^{(y)}} = 2^{k_M^{(x)} + k_M^{(y)}}. \quad (7)$$

$$K_N^{(x,y)} = K_N^{(x)} \cdot K_N^{(y)} = 2^{k_A^{(x)}} \cdot 2^{k_A^{(y)}} = 2^{k_A^{(x)} + k_A^{(y)}}. \quad (8)$$

Так, на рис. 2а каждая координата содержит по 4 значения M , т. е. $k_M^{(x)} = k_M^{(y)} = 4$. Отсюда, согласно (7), $K_L = 2^8 = 256$ исходных значений. Для рис. 2б $k_M^{(x)} = k_M^{(y)} = 5$, откуда $K_L = 2^{10} = 1024$ исходных значений.

Присутствие в значениях координат неопределенности A и множественности M приводит к заданию исходных значений в количестве вариантов K , равных значению сочетания количества разрядов M и A :

$$K^{(x,y)} = K_L^{(x,y)} \cdot K_N^{(x,y)} = 2^{k_M^{(x)} + k_A^{(x)} + k_M^{(y)} + k_A^{(y)}}. \quad (9)$$

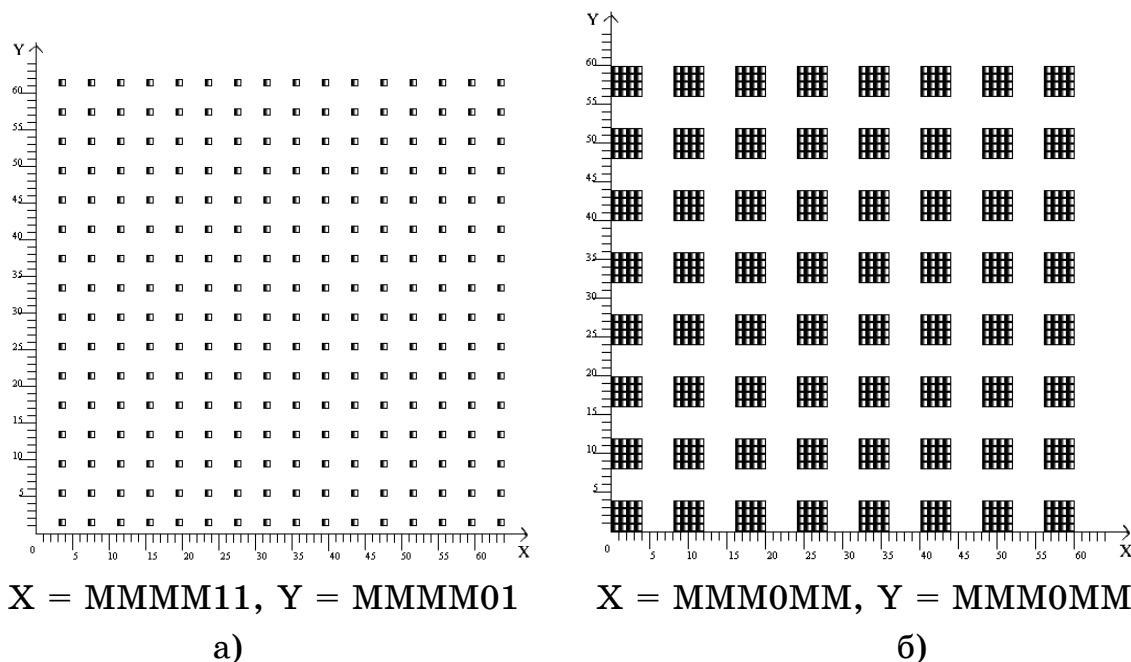


Рисунок 2 - Варианты задания исходных значений 2D КТА

На рис. 3 приведены несколько вариантов из множества возможных исходных значений КТА при одних и тех же координатах $x = \text{MMMM}0$, $y = \text{ММААМА}$. Количество всех возможных вариантов задания исходных значений для данных координат можно найти по формуле (9):

$$K^{(x,y)} = K_L^{(x,y)} \cdot K_N^{(x,y)} = 2^{5+0+3+3} = 2^{11} = 2048.$$

Формальное описание и правила работы КТА

Обозначим рассматриваемую ячейку клеточного автомата в момент времени t – $a_0(t)$, а ее соседей $a_i(t)$. Очевидно, что в общем случае для 2D КА клетку окружают 8 соседей (см. рис. 1), поэтому для $a_i(t)$ $i = \overline{1, k}$ при $k = 8$. Тогда правила поведения рассматриваемой ячейки классического клеточного автомата в следующий момент времени $(t + 1)$ можно записать следующим образом:

$$a_0(t+1) = \begin{cases} 0, & \text{if } \bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3, \\ 1, & \text{if } \bigvee_{i=1}^k a_i(t) = 1 \wedge \left(\sum_{i=1}^k a_i(t) < 2 \vee \sum_{i=1}^k a_i(t) > 3 \right), k = 8. \end{cases} \quad (10)$$

Формула (9) представляет собой алгоритмическое описание классических «генетических законов» (правил) КА Конвея [1].

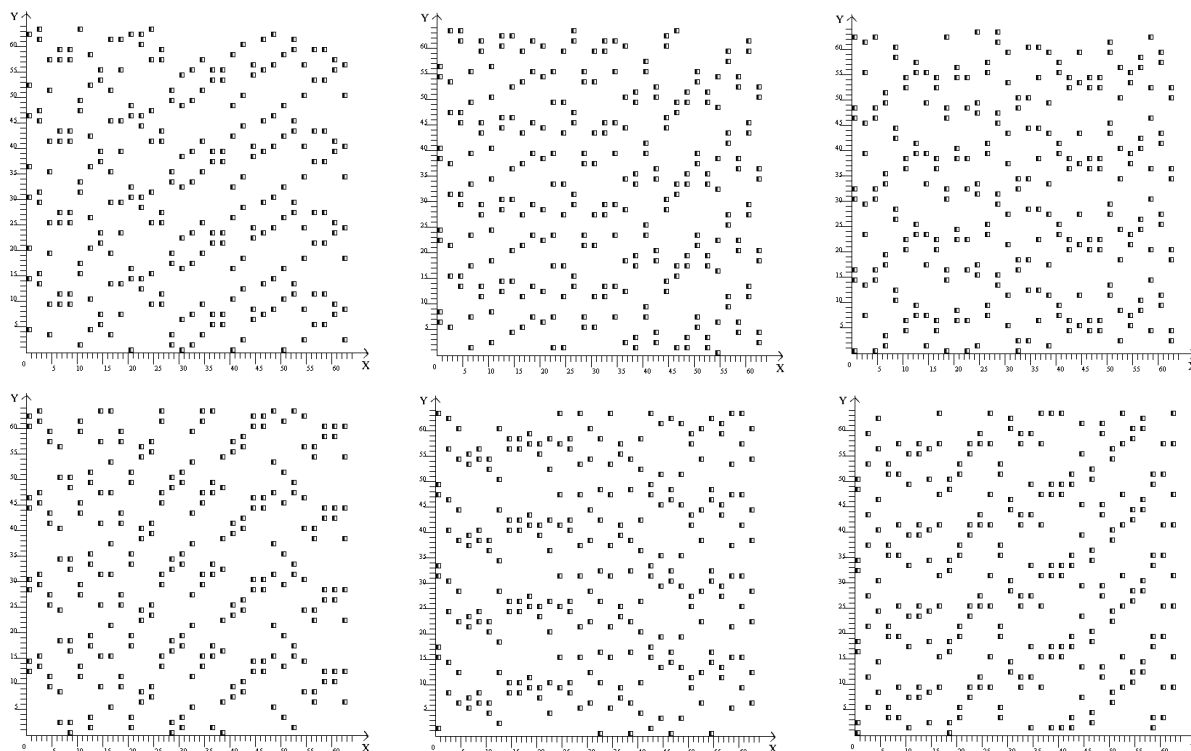


Рисунок 3 - Варианты задания исходных значений 2D КТА при одних и тех же координатах (МММММ0, ММААМА)

Правила управляемого и неуправляемого клеточных тетраавтоматов основаны на модификации классических «генетических законов» Конвея. В НКТА и УКТА кроме двух традиционных состояний (1 и 0) вводятся два дополнительных состояния, соответствующих значениям А и М тетракодов.

При этом каждая клетка может находиться в одном из четырех следующих состояний, которые могут быть интерпретированы в терминологии автомата «Жизнь» Конвея:

- 0 – пустая («мертвая») клетка;
- 1 – непустая («живая») нормальная клетка;
- М – «суперклетка», обладающая специфическими особенностями, обусловленными множественным характером поведения клетки и, как следствие, ее повышенной адаптивностью;
- А – «слабая» («больная») клетка, что делает ее более неустойчивой.

Таким образом, на основании (10), формула, задающая правила работы НКТА примет вид:

$$a_0(t+1) = \left\{ \begin{array}{l}
 0, \text{ if } (\forall a_i(t) = A) \wedge \left(2 < \sum_{i=1}^k a_i(t) > 3 \right), \\
 1, \text{ if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge [\forall a_i(t) = 1] \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \right) \vee \\
 \quad \vee \left(a_i(t) = A \wedge [\exists a_i(t) = M] \wedge 2 \geq \sum_{i=1}^k a_i(t) \leq 3 \right), \\
 A, \text{ if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge [\forall a_i(t) = A] \wedge [\forall a_i(t) = M] \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \right) \vee \\
 \quad \vee \left(\bigvee_{i=1}^k a_i(t) = 1 \wedge [\exists a_i(t) = M] \wedge 2 \geq \sum_{k=1}^k a_i(t) \leq 3 \right) \vee \\
 \quad \vee \left(a_i(t) = M \wedge 2 \geq \sum_{i=1}^k a_i(t) \leq 3 \right), \\
 M, \text{ if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge [\exists a_i(t) = M] \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \right) \vee \\
 \quad \vee \left(\bigvee_{i=1}^k a_i(t) = 1 \wedge [\exists a_i(t) = M] \wedge 2 \geq \sum_{i=1}^k a_i(t) \leq 3 \right) \vee \\
 \quad \vee \left(a_i(t) = A \wedge [\exists a_i(t) = M] \wedge 2 \geq \sum_{i=1}^k a_i(t) \leq 3 \right), k = 8.
 \end{array} \right. \quad (11)$$

В УКТА пользователь задает определенный набор параметров. Таким образом, на основании (10), основная формула УКТА примет вид (nb – допустимое количество слабых соседей, ns – допустимое количество суперсоседей, задаваемое пользователем в процессе эволюции автомата):

$$a_0(t+1) = \begin{cases} 0, & \text{if } (\forall a_i(t) = A) \wedge \left(2 < \sum_{i=1}^k a_i(t) > 3 \right), \\ 1, & \text{if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = A) < nb \right] \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = M) < ns \right] \right) \vee \\ & \vee \left(a_i(t) = A \wedge 2 \geq \sum_{k=1}^8 a_k(t) \leq 3 \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = M) < ns \right] \right), \\ A, & \text{if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = A) \geq nb \right] \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = M) < ns \right] \right) \vee \\ & \vee \bigvee_{i=1}^k a_i(t) = 1 \vee a_i(t) = M, \\ M, & \text{if } \left(\bigwedge_{i=1}^k a_i(t) = 0 \wedge \sum_{i=1}^k a_i(t) = 3 \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = M) \geq ns \right] \right) \vee \\ & \vee \left(\bigvee_{i=1}^k a_i(t) = 1 \wedge 2 \geq \sum_{i=1}^k a_i(t) \leq 3 \wedge \left[\sum_{i=1}^k (a_i(t) = M) < ns \right] \right), k = 8. \end{cases} \quad (12)$$

Выводы

На сегодняшний день КА широко применяются во многих отраслях знания для исследования реальных различных сложных процессов. Решение задач на базе клеточных автоматов требует большого объема памяти для хранения состояний решетки и позволяет выполнять большое количество итераций, что требует существенного повышения производительности КА.

Формальное описание и рассмотрение правил работы неуправляемых и управляемых клеточных тетраавтоматов позволяют сделать вывод о том, что тетралогика и тетракоды могут быть эффективно использованы для дальнейшего развития теории и практики КА, в том числе и в плане повышения их производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коноплева А.П. Игра «Жизнь» Дж. Конвея на базе гиперкодов / А.П. Коноплева, А.Я. Аноприенко // Материалы III международной научно-технической конференции «Информатика и компьютерные технологии - 2007», 11-13 декабря 2007 г. / - Донецк : ДонНТУ, 2007. - С. 254–257.
2. Аноприенко А.Я. Развитие идеи применения гиперкодов в моделировании клеточных автоматов / А. Я. Аноприенко, А. П. Коноплева // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» / - Вып. 9 (132). - Донецк : ДонНТУ, 2008. - С. 115–118.

3. Аноприенко А.Я. Управляемый постбинарный клеточный автомат / А.Я. Аноприенко, А.П. Коноплева // Материалы II всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ 2011)», 12–13 апреля 2011 г. Т. 2. – Донецк : ДонНТУ, 2011.
4. Аноприенко А.Я. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции / А.Я. Аноприенко, С.В. Иваница. – Донецк : ДонНТУ, УНИТЕХ, 2011. - 248 с.
5. Аноприенко А.Я. Особенности реализации постбинарных логических операций / А.Я. Аноприенко, С.В. Иваница // Искусственный интеллект. – 2011. - № 2. - С. 110–121.
6. Аноприенко А.Я. Тетралогика, тетравычисления и ноокомпьютинг / А.Я. Аноприенко, С.В. Иваница. – Донецк : ДонНТУ, УНИТЕХ, 2012. – 308 с.
7. Аноприенко А.Я. Эволюция алгоритмического базиса вычислительного моделирования и сложность реального мира / А.Я. Аноприенко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Вып. 52. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем» (МАП-2002). – Донецк : ДонНТУ, 2002. - С. 6–9.
8. Аноприенко А.Я. Grid-технологии: развитие, моделирование и перспективы постбинарного компьютеринга / А.Я. Аноприенко, А.П. Коноплева, В.В. Дзьоба, Х. Аль-Абабнех // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Информатика, кибернетика и вычислительная техника (ИКВТ-2009). Выпуск 10 (153). – Донецк : ДонНТУ, 2009. - С. 324–327.
9. Аноприенко А.Я. Оценка производительности при моделировании постбинарных клеточных автоматов и способы ее повышения / А.Я. Аноприенко, А.П. Коноплева, А.Ю. Василенко // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-2009). – Вып. 147. – Донецк : ДонНТУ, 2009. - С. 96–104.
10. Аноприенко А.Я. Концепция расширенного кодо-логического базиса компьютерного моделирования // А.Я. Аноприенко. Археомоделирование: Модели и инструменты докомпьютерной эпохи. – Донецк : УНИТЕХ, 2007. – 318 с.

ЗАСТОСУВАННЯ КІЛЬКІСНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАННЯ НА ПЕРВИННУ СТРУКТУРУ ДОЕВТЕКТИЧНИХ БІЛИХ ЧАВУНІВ

Анотація. Робота присвячена визначенню впливу модифікаторів на структурні параметри білих чавунів, що здатні деформуватися. Розроблена методика кількісного мікроструктурного аналізу для економно легованих високо вуглецевих сплавів дозволила отримати кількісні характеристики структурних складових і прогнозувати вплив модифікування на пластичність білих дактильовних чавунів.

Ключові слова: кількісний аналіз, оптична мікроскопія, структурні складові, розподіл ймовірних величин, модифікування чавуну, переріз дендритів, карбідна складова.

Постановка проблеми. Властивості сплавів евтектичного типу, до яких належать білі чавуни, визначаються їх первинною структурою. Основними параметрами, що характеризують цю структуру є кількість та морфологія евтектичної складової, а також розмір так званого «карбідного зерна». Карбідним зерном називають перетин дендритів первинного аустеніту, що обмежується евтектичними колоніями. Розмір та розгалуженість аустенітних дендритів, що оточені евтектичною сіткою суттєво впливають на пластичність білих чавунів. Гаряча пластична деформація сприяє покращенню властивостей білих чавунів і є перспективним напрямком їх обробки. є [1]. Найбільш економічним методом впливу на структуру є використання компонентів, що додаються в невеликій кількості та мають дію модифікаторів. Визначити вплив модифікування на параметри первинної структури можна при застосуванні методів кількісної металографії та розробки особливих методик її використання.

Аналіз останніх досліджень. Методи кількісної металографії широко застосовують для оцінки якості структури сталей, для визначення забруднення сталі неметалевими включеннями, для вивчення

розподілу та кількості графітних включень в сірих чавунах [2]. Значні перспективи кількісний аналіз має для дослідження закономірностей формування структури в дактильованих чавунах, тобто в ледебуритних економнолегованих чавунах з підвищеною пластичністю [3]. Ці сплави є гетерофазними сплавами, і складність отримання кількісних показників їх структурних параметрів полягає по-перше, в їх просторовій розгалуженості, а по-друге, в різноманітності фазового складу.

Формулювання мети статті. Таким чином, виникає необхідність визначення впливу різних модифікаторів на кількісні параметри структури економнолегованих білих чавунів для прогнозування властивостей, а саме пластичності цих сплавів, що в свою чергу вимагає розробки спеціальної методики кількісного мікроструктурного аналізу.

Основна частина. Дослідження проводили на зразках, що виплавляли на основі сплаву що містить 2,7% С і 2,5% V з добавками азоту, ітрію, титану, цирконію, кальцію (табл. 1).

Таблица 1

Хімічний склад досліджених модифікованих сплавів *

Маркування плавки	Склад модифікаторів, %						
	С	V	Ca	Y	Ti	Zr	N
503	2,71	2,54	-	-	-	-	-
505	2,74	2,50	0,1	-	-	-	-
506	2,72	2,51	-	0,1	-	-	-
512	2,70	2,47	-	-	-	0,1	-
504	2,73	2,49	-	-	-	-	0,15
504 а	3,05	3,01	-	-	-	-	0,15
506 а	3,07	2,54	-	0,1	-	-	-
511 а	3,01	2,54	-	-	0,1	-	-

* Вміст домішок не перевищував значень відповідних промислових білих чавунів

У всіх сплавах виявлено два види евтектичної складової: ледебуритної колонії стільникової будови і в невеликій кількості ванадієво-карбідна евтектика (рис.1). Ітрій і цирконій сприяють погрубщенню колоній аустеніто-цементитної евтектики Евтектика на базі карбиду

ванадію найбільш сильно розгалужена в сплавах, модифікованих ітрієм і азотом. Введення титану сприяє утворенню компактних карбідів типу MC. Визначення розміру карбідного зерна проводили двома способами:

1) методом випадкових січних;

2) за методикою, що була спеціально розроблена, згідно з якою проводили вимірювання величини параметрів перерізів гілок дендритів первинного аустеніту залежно від їх форми. Схема, за якою проводили вимірювання показана на рис.2. Умовно прийняли, що перерізи дендритів наближаються до двох видів форми: витягнутої й круглої. Вимірювання проводили в декількох напрямках на кожному з цих зразків. На підставі цих вимірів були побудовані гістограми, що відображають нормальний розподіл розмірів карбідного зерна. Розраховували найбільш ймовірне значення ширини й довжини перерізу, або діаметру і середнє арифметичне.

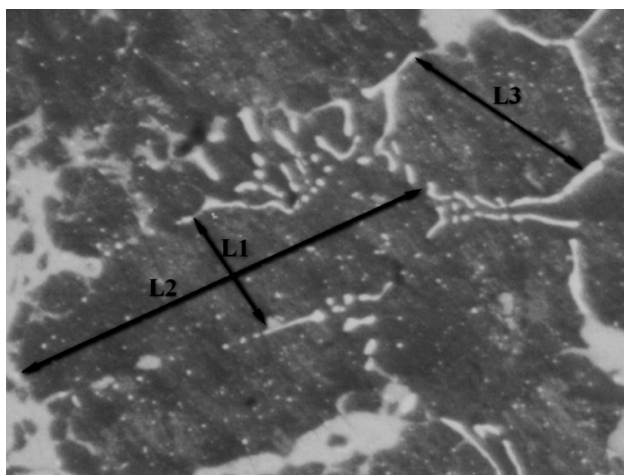


Рисунок 1 - Схема структурних параметрів карбідного зерна:

L1-ширина витягнутого перерізу; L2-довжина витягнутого перерізу;

L3-діаметр круглого перерізу

Отримані масиви даних дендритних параметрів обробляли за допомогою спеціальної програми TableCurve 2D v5.01, яка дозволяє на основі двох параметрів (значення і кількість) обчислювати похідну і будувати графік, який є функцією щільності розподілу з піком. Цей пік характеризує ймовірне значення параметра дендритних гілок. Середнє арифметичне вираховували з усіх даних, проводили понад 20 вимірювань. При значній різниці між простим середнім та найбільш ймовірним, розроблена методика давала результат більш відповідний

останньому. Для розрахунку середнього лінійного розміру гілок дендритів аустеніту використовували структурний аналізатор «Епіквант» фірми «Карл Цейс Йена», який працює за принципом лінійного аналізу зі скануванням об'єкта.

Поверхнево-активні елементи кальцій та ітрій, зменшуючи розмір дендритів, зменшують відповідно розмір «карбідного зерна». До такого ж результату приводять добавки титану та цирконію, які сприяють розгалуженню гілок дендритів аустеніту (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив модифікування на середній лінійний розмір перетину гілок дендритів аустеніту, мкм

модифікатор	базовий	N	Ca	Y	Ti	Zr
розмір перетину	22,95	22,44	20,15	18,68	20,58	21,56

Крім лінійний розмір гілок дендритів аустеніту визначено нормальний розподіл карбідного зерна представлений у вигляді гістограми (рис. 2).

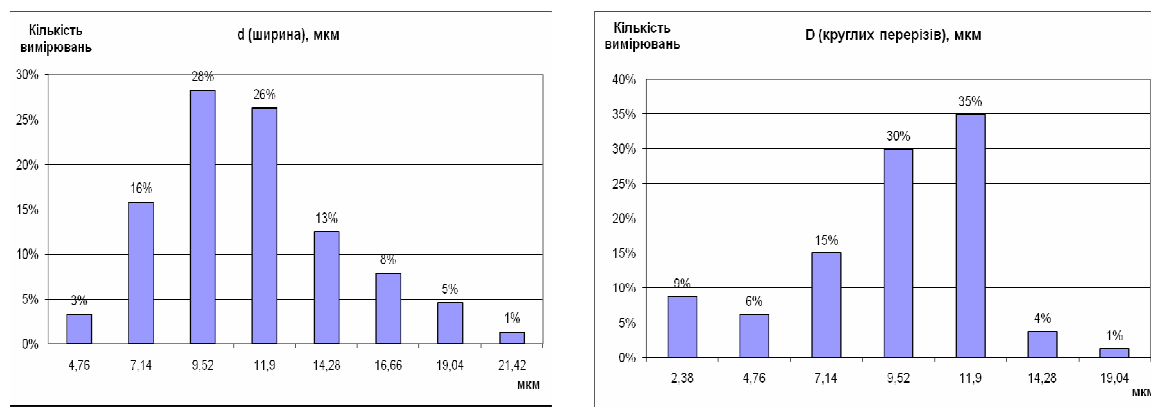


Рисунок 2 - Нормальний розподіл розмірів карбідного зерна

Подальший розрахунок отриманих даних був проведений за допомогою методики розрахунку найбільш імовірних значень гілок дендритів аустеніту (рис.3). Наприклад, у порівнянні з базовим зразком, модифікування азотом зменшує розмір діаметра гілок дендритів аустеніту.

З метою вивчення впливу модифікування на пластичність чавуну, легованого ванадієм проводили випробування методом гарячого кручення (рис. 4).

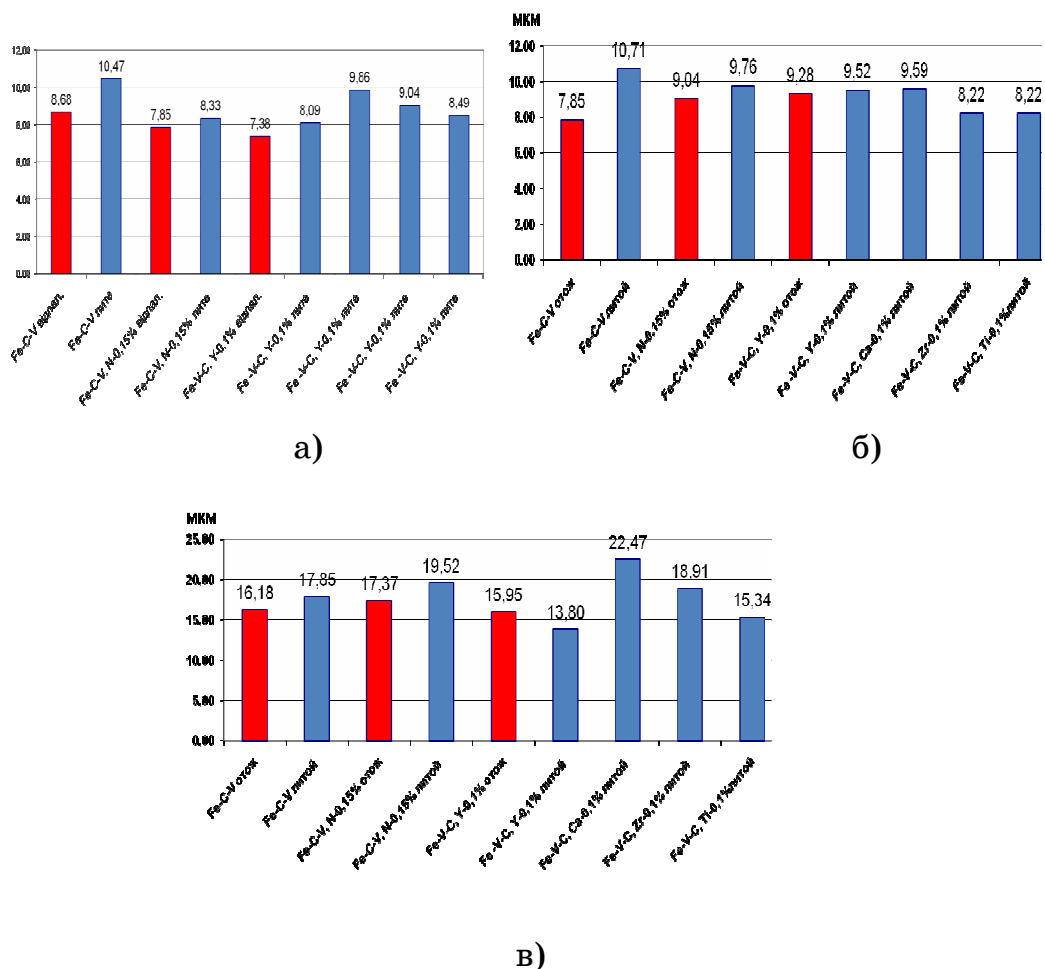


Рисунок 3 - Найбільш ймовірні значення гілок дендритів аустеніту: а) - D діаметр (L3); б - d (ширина, L1); в) - L (довжина, L2)

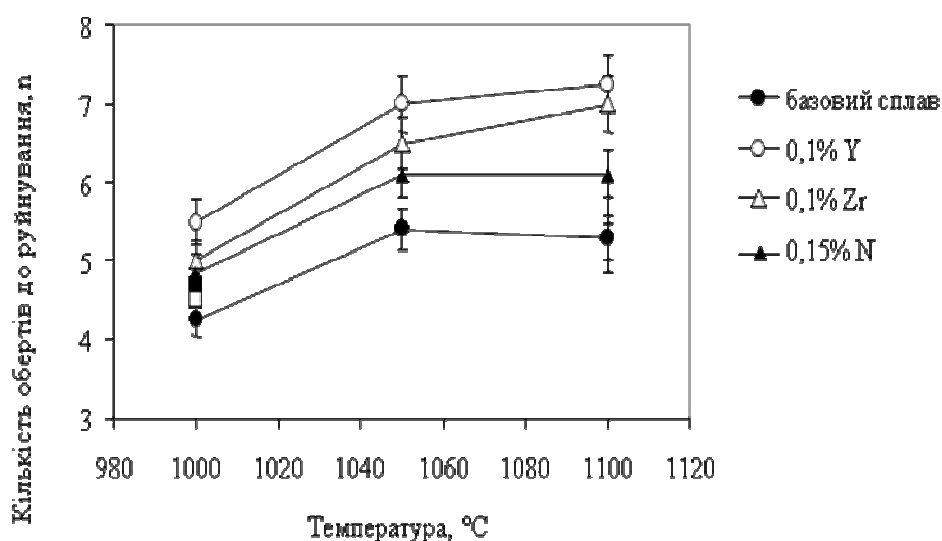


Рисунок 4- Вплив модифікування на - пластичність чавуну, що містить 2,7% С і 2,5% V при гарячому крученні

Вибрані за результатами мікроструктурних досліджень для і модифікування хімічні елементи сприяють підвищенню пластичності дактильованного білого чавуну. Слід зазначити, що найбільш відчутний вплив ітрію і цирконію пояснюється тим, що вони сприяють збільшенню у структурі об'ємної частки ванадієво-карбідної евтектики і зменшення кількості ледебуриту.

Висновки: 1. Вивчено вплив модифікаторів азота, ітрію, кальцію, цирконію та титана на розмір перерізу гілок дендритів первинного аустеніту (карбідного зерна) за допомогою розробленої методика кількісного мікроструктурного аналізу.

2. З метою подрібнення структури (поперечного перерізу гілок дендритів аустеніту і розміру евтектичних колоній) можна рекомендувати модифікування кальцієм (0,2% за масою), а також ітрієм і цирконієм (0,1% за масою), причому останні сприяють зміні співвідношення об'ємних часток евтектики на користь ванадієвокарбідної, а також зменшенню кількості цементиту за рахунок фазових переходів.

3. Встановлено, що модифікування азотом, цирконієм та ітрієм сприяє підвищенню пластичності дактильованого чавуну за рахунок збільшення ванадієвої евтектики та зменшення розмірів карбідного зерна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Миронова Т. М. Структура и свойства деформируемых чугунов / Т.М.Миронова, В.З. Куцова. – Днепропетровск: Дриант, 2009. -190 с.
2. Филинов, М. В. Оптическая структуроскопия: проблемы моделирования и анализа Текст. / М. В. Филинов, Ф. С. Фурсов// Контроль и диагностика 2003. - № 7. - С. 8, 13 - 17.
3. Миронова Т.М. О механизмах влияния фазовых переходов на поведение эвтектических карбидов при деформировании. / Миронова Т.М., Донская Т.Р., Сидорова А.Ю. - Вісник Дніпропетровського університету. -2012, т.20, №2 – Серія Фізика. Радіоелектроніка, випуск19, с.97-104.

ПЛАНИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ПОЛИРОВКЕ

Аннотация. В статье рассмотрен статистический метод построения математической модели электролитно-плазменной полировки (ЭПП) трубной заготовки по плану Бокса-Бенкина. Разработана модель электролитно-плазменной полировки для конструкционной стали Ст3. Выведена зависимость конечной шероховатости поверхности при ЭПП от основных факторов, влияющих на ход процесса. По выведенной зависимости построены поверхности отклика исследуемого параметра от факторов эксперимента.

Ключевые слова. Электролитно-плазменная полировка, шероховатость, плотность тока, напряжение, время обработки, план Бокса-Бенкина.

Актуальность. Для получения требуемого качества поверхностного слоя деталей существует целый ряд различных методов обработки, в том числе электрохимическое, химическое, механическое полирования, однако, получить заданную шероховатость поверхности трудно, дорогостояще, а зачастую затруднительно, особенно используя экологически чистые методы обработки материалов [1]. В этом отношении электролитно-плазменное полирование является высокоэффективным процессом обработки изделий из токопроводящих материалов в нетоксичных средах, имеющих более высокие экологические и экономические показатели. Наиболее близким, по получаемым параметрам качества обрабатываемой поверхности и технологическому оснащению, к ЭПП является электрохимическое полирование, но в отличие от него, в электролитно-плазменной технологии используются экологически безопасные водные солевые растворы, которые в несколько раз дешевле токсичных кислотных компонентов. Однако, отсутствие в литературе зависимостей изменения качества обрабатываемой поверхности от параметров процесса ЭПП и диапазона рациональных режимов обработки конструкционных сталей затрудняет

разработку технологических процессов с применением метода ЭПП и установлении режимов работы оборудования.

Целью работы является моделирование процесса ЭПП, для определения рациональных режимов обработки, получения заданной шероховатости, повышения качества поверхности и снижения энергозатрат технологического процесса.

Методика экспериментов. Эксперименты проводились на разработанной установке с дистанционным управлением процесса ЭПП (рис. 1). В качестве исследуемых образцов использовалась трубная заготовка Ш20х1.15 длиной 6 мм из конструкционной стали марки Ст3 с исходной шероховатостью $Ra=0.8$ мкм. Полировка осуществлялась в диапазоне рабочих напряжений $U=280-380$ В; при плотности тока $J=0,2-0,3$ А/см²; в 3%-ом водном растворе $(NH_4)_2SO_4$; температура электролита поддерживалась постоянной $t_e=90-95$ °С. Параметры шероховатости и металлографические исследования осуществлялись с помощью бесконтактного интерференционного 3-D профилографа «Micron-alpha». Моделирование процесса ЭПП осуществлялось по трехфакторному плану Бокса-Бенкина. Полученные результаты обрабатывались вероятностно-статистическим методом с использованием программ MICROSOFT Excel 2007 и модуля STATISTICA 10.

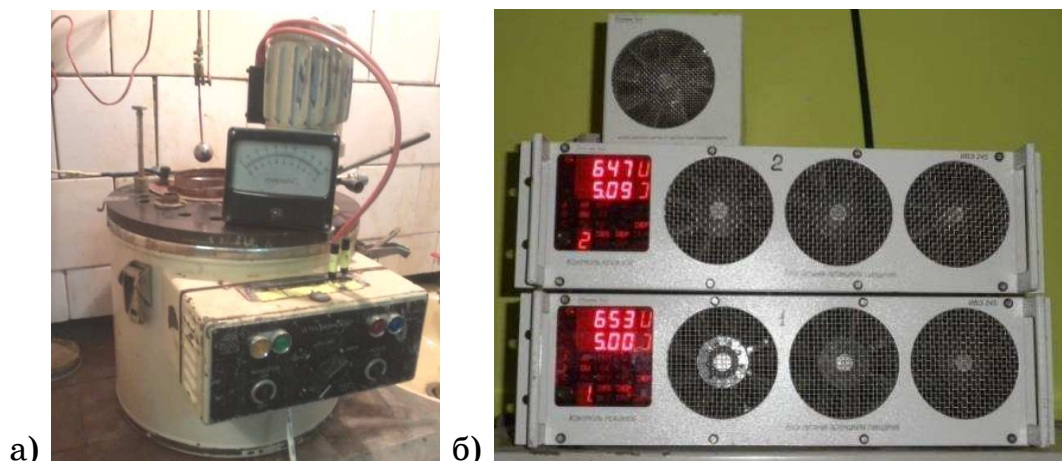


Рисунок 1 – Экспериментальная электролитно-плазменная установка:

а) Общий вид установки без блока питания;

б) Блок питания для установки ЭПП

В качестве параметра, отражающего качество заготовки использовалась шероховатость поверхности Ra , мкм. В качестве параметров, характеризующих ход процесса ЭПП, были выбраны: время

обработки T , с; постоянное напряжение U , В и плотность тока j , А/см².

К реализации принимается D-оптимальный план Бокса-Бенкина размерности $K = 3$, позволяющий провести математико-статистическую обработку данных при варьировании трех компонентов на трех уровнях. D-оптимальные планы обеспечивают минимальный объем эллипсоида рассеивания оценок параметров, минимизируют максимальную дисперсию в заданной области плана, обладают свойством рототабельности и имеют наименьший определитель ковариационной матрицы. Свойство рототабельности сводится к тому, что точки матрицы планирования подбираются с обеспечением одинаковой точности предсказания значений функций отклика и независимости от направления исследования.

Общее число опытов по плану Бокса-Бенкина для $K = 3$ составляет:

$$N_{\text{общ}} = N + N_o = 12 + 3 = 15 \quad (1)$$

где N_o - число опытов в центре плана.

Уравнение регрессии в общем случае имеет вид:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Коэффициенты регрессии были рассчитаны по расчетной матрице плана Бокса-Бенкина.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Уровни варьирования фактора		
			Верхний	нулевой	Нижний
			Кодированное обозначение		
			+1	0	-1
Напряжение	X1	В	380	340	300
Время обработки	X2	Мин	6	4,5	3
Плотность тока	X3	А/см ²	0,3	0,25	0,2

В результате проведения трехуровневого, трехфакторного эксперимента показано улучшение шероховатости на 2-3 класса. Профи-

лограммы и топография поверхности исследуемых образцов показаны на рисунках 2 и 3 соответственно.

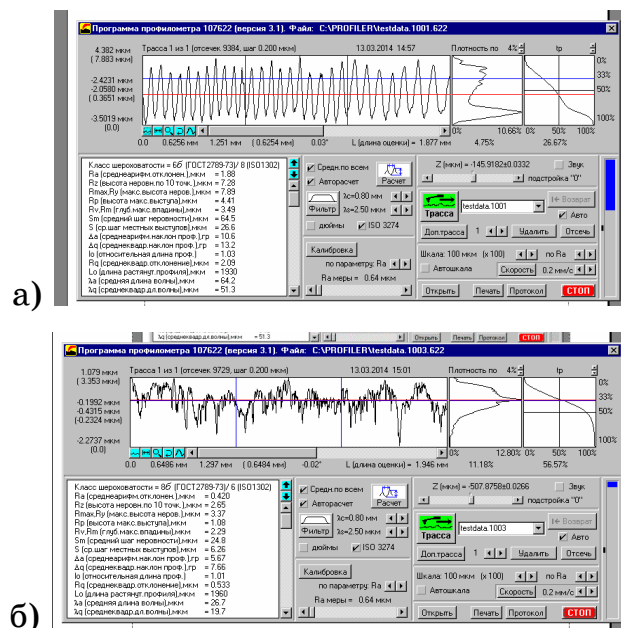


Рисунок 2 – Профилограмма поверхности:

а) – до обработки; б) - после ЕПП

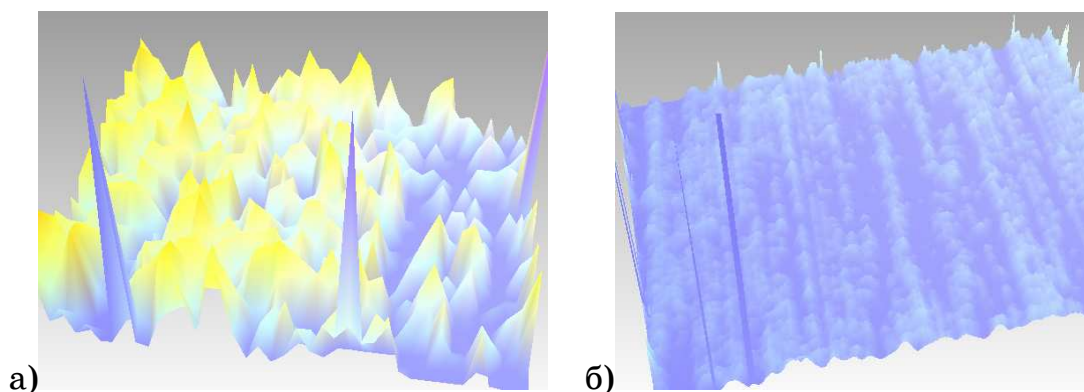


Рисунок 3 – Топография поверхности образца:

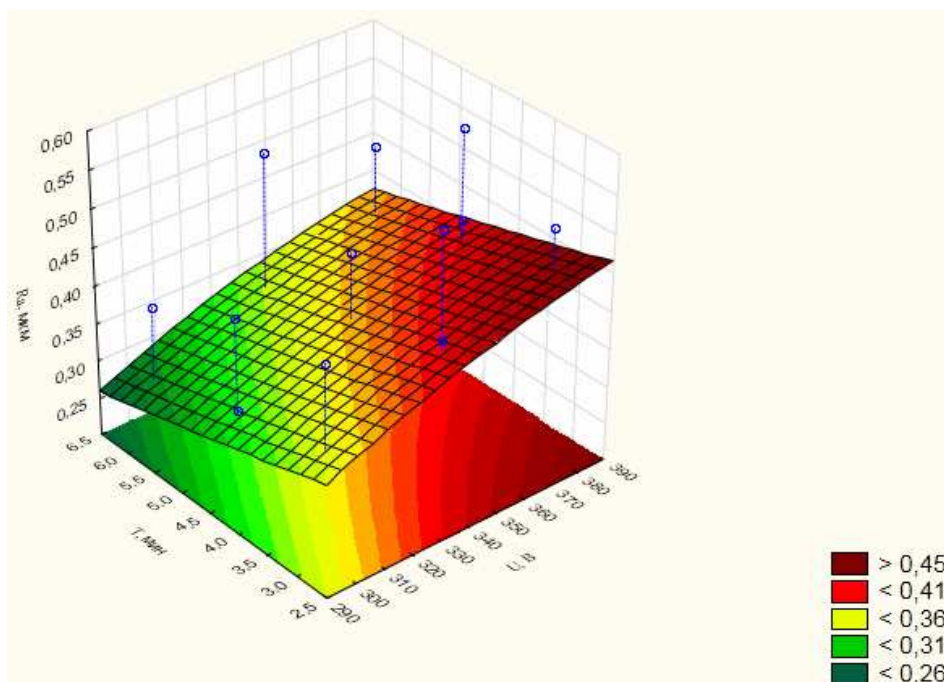
а) – до обработки; б) – после обработки

После обработки экспериментальных данных была получена следующая математическая зависимость:

$$Y = 0,46 + 0,0463x_1 - 0,034x_2 + 0,075x_3 - 0,01125x_3^2 + 0,0125x_1x_2 + 0,02x_2x_3 \quad (3)$$

При этом средняя ошибка опыта составила $\varepsilon_{cp} = 0,000384\%$, а максимальная $\varepsilon_{max} = 0,262\%$. Адекватность полученной математической модели проверена при помощи F-критерия Фишера. В соответствии с полученной математической моделью, построены поверхности функ-

ции отклика (рис. 4–6). Поверхность отклика, полученная уравнением (3), представляет не что иное как пятимерный параболоид.



Рисцунок 4 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: U (X_1) – рабочее напряжение; T (X_2) – время обработки при фиксированном значении $J = 0.25 \text{ А/см}^2$ (центр эксперимента)

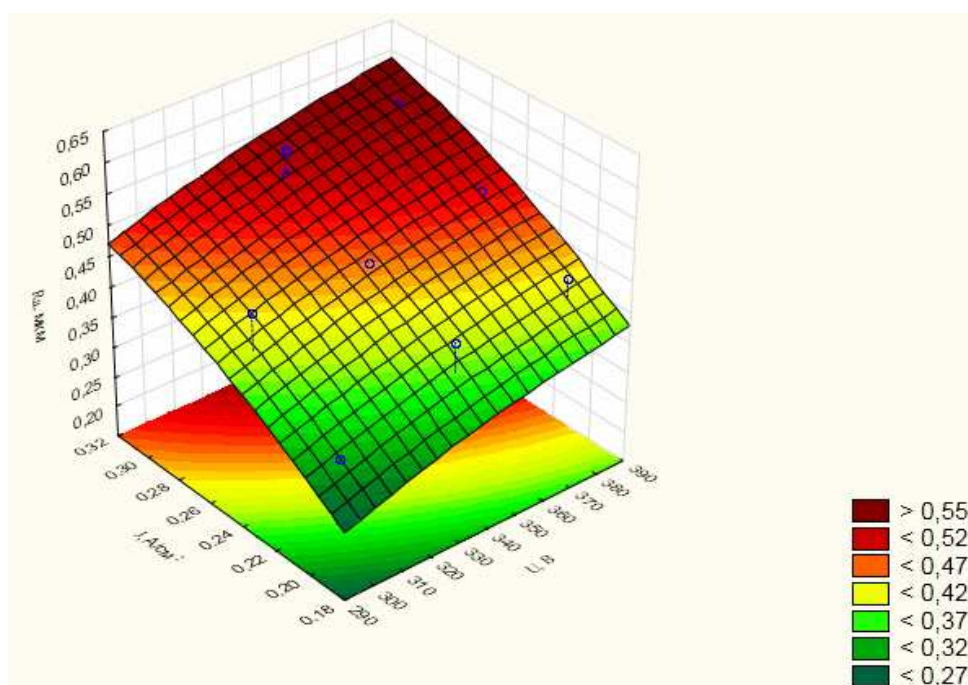


Рисунок 5 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: J (X_3) – плотность тока; U (X_1) – рабочее напряжение при фиксированном значении $T = 4,5$ мин (центр эксперимента)

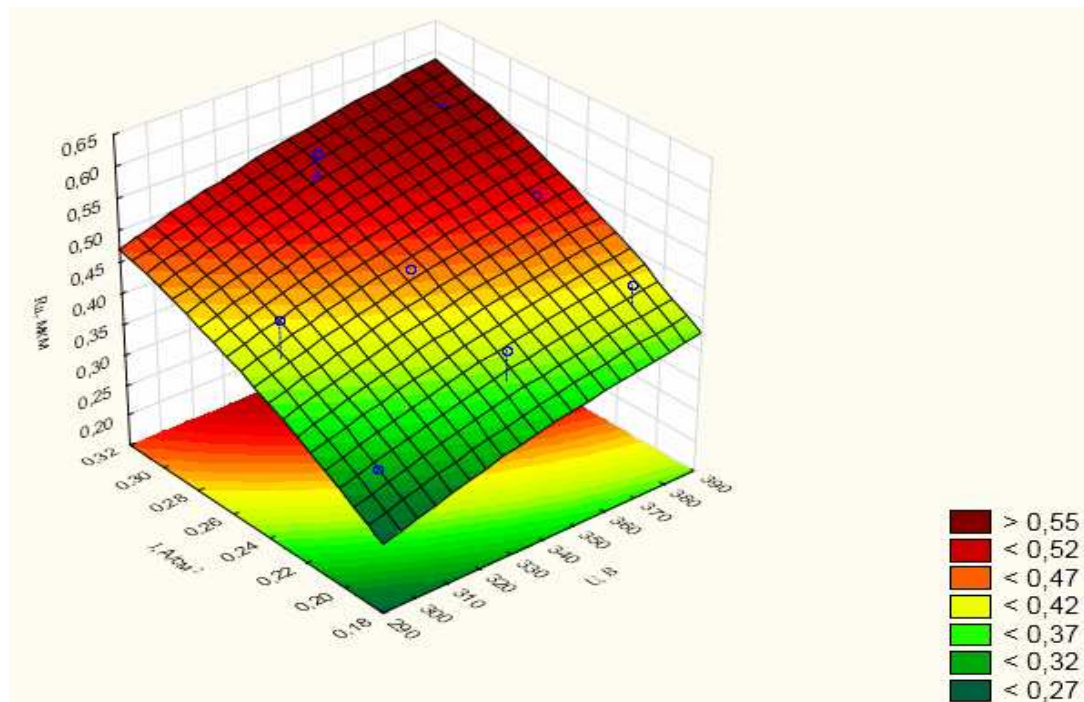


Рисунок 6 - Поверхность функции отклика при варьировании параметрами: J (X_3) – плотность тока; U (X_1) – рабочее напряжение при фиксированном значении $T = 4,5$ мин (центр эксперимента)

Анализируя поверхности функции отклика и полученную математическую зависимость, можно сделать вывод, что на эффективность снижения шероховатости исследуемые параметры влияют неоднозначно. Существенная зависимость на исследуемый критерий Y наблюдается от влияния плотности тока J , заметное воздействие оказывает рабочее напряжение U , и менее значительное влияние оказывает время обработки, что полностью подтверждает проведенные теоретические исследования. Полученное уравнение дает основание для отработки параметров рациональной настройки предлагаемого устройства по критерию повышение эффективности его работы.

Располагая общим видом зависимости эффективности работы от параметров настройки устройства (3), рациональные значения U , J , T находим как решение системы трех уравнений, представляющих собой частные производные по dU , dT , dJ . В результате решения системы уравнения методом Крамера определили условия, при которых установка, для получения необходимой шероховатости $Ra = 0.25$, работает наиболее эффективно:

$$U = 300 \text{ В}, T = 6 \text{ мин}, J = 0.2 \text{ А/см}^2$$

Выводы. В результате активного эксперимента по трехфакторному плану Бокса-Бенкина построена математическая модель процесса электролитно-плазменного полирования, подтвержденная экспериментально.

1. Применение модели позволило выбрать рациональный режим ЭПП с параметрами $U = 300\text{В}$, $T = 6\text{мин}$, $J = 0.2\text{А/см}^2$ для получения конечной шероховатости $Ra = 0.25$ мкм трубы из стали Ст3 с начальной шероховатостью $Ra = 1.0$ мкм.

2. Экспериментально доказано эффективность использования модели для повышения качества поверхности и снижения энергозатрат по сравнению с традиционными методами обработки путем выбора рациональных режимов ЭПП в технологическом процессе полировки труб из стали Ст3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. — 3-е изд. — М.: «Диалектика», 2007. — С. 912.
2. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. — Минск: Беларуская наука, 2010. — 232 с.
3. Патент РФ № 2268326 С25 F 7/00. Установка электролитно-плазменного полирования / Р. Г. Касимов, В. Н. Горяйнов, А. О. Балахнин. — Опубл. 20.01.2006
4. Сафьян П.П., Тутык В.А., Чигиринец Е.Э. Пароплазменный разряд как метод повышения коррозионной стойкости внутренней поверхности труб // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2012. - № 9. — С.751-756.
5. Патент України на корисну модель UA 84917 МПК7 С23 G5/00-Спосіб електронно променевого очищення внутрішньої та / або зовнішньої поверхні труб.- Тутык В.А., Масляний М.В., Наддтока В.М., Литвиненко О.Г., Дейнеко Л.М., Масленіков Д.В.- Опубл.. грудень 2013.

УДК 669.141.241:015.4:51-74

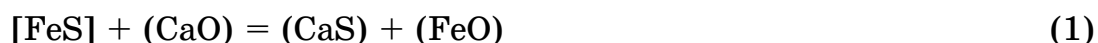
А.А. Надточий, Ю.И. Сокур, Л.В. Камкина, А.Г. Безшкуренко
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕРОПОГЛОТИТЕЛЬНОЙ
СПОСОБНОСТИ ШЛАКОВ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ
ОБРАБОТКЕ СТАЛИ**

Аннотация: Произведена оценка серопоглотительной способности шлаков для внепечной обработки стали по различным модельным представлениям. Оценка рафинирующих свойств сталеплавильных шлаков, выбор рационального состава рекомендуется осуществлять на основе картирования поверхности значений серы.

Ключевые слова: сера, шлак, сульфидная емкость, моделирование, картограмма.

Введение. Одним из требований получения качественного металла является снижение серы, что особенно важно для металлоизделий работающих при повышенных температурах. В решении этой задачи шлаковому расплаву контактирующему с металлом отводится центральная роль в частности формированию соответствующих физико-химических свойств, что зависит от его химического состава. Предлагаемые уравнения для расчета серопоглотительной способности не всегда дают совпадающие с реально наблюдаемыми коэффициентами распределения. В работе поставлена задача оценить серопоглотительную способность шлаков при обработке стали на УСП по различным модельным представлениям.

Анализ последних исследований и публикаций. С позиций молекулярной теории строения расплавленных шлаков, процесс удаления серы рассматривается как реакция



Количественной характеристикой процесса распределения серы между шлаком и металлом является коэффициент распределения серы, который в соответствии с данной реакцией определяется константой равновесия и активностями CaO и FeO в шлаке

$$L_S = \frac{(\%S)}{a_{[S]}} = K_S \frac{a_{\text{CaO}}}{\gamma_S a_{\text{FeO}}}. \quad (2)$$

Причем значение a_{CaO} зависит от избытка основных оксидов в шлаке, т.е. от основности шлака. Для основных шлаков [1] была найдена зависимость, справедливая для интервала температур 1580-1650 °C:

$$LS = (\%S)/[\%S] = 1,4 + 1,6 \text{ пизб. осн.}, \quad (3)$$

где пизб. осн. = $(n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO}) -$

$$- (2^{n_{SiO_2}} + 4^{n_{P_2O_5}} + 4^{n_{Al_2O_3}} + n_{Fe_2O_3}) \quad (4)$$

Более простые зависимости для процесса распределения серы между шлаком и металлом получены на основе ионной теории строения расплавленных шлаков. Переход серы из металла в шлак связан с ионизацией атомов серы. Источником электронов может быть процесс перехода атомов железа из металла в шлак.

Суммарная реакция имеет вид $[Fe] + [S] = (Fe^{2+}) + (S^{2-})$ (5) Однако в случае окислительных шлаков кроме реакции распределения серы между шлаком и металлом имеет место и реакция распределения кислорода, которая в ионной форме эквивалентна реакции взаимодействия FeO шлака и жидкого железа. Комбинируя реакции, получим

$$\begin{aligned} [[Fe] + [S] &= (Fe^{2+}) + (S^{2-}) \\ (Fe^{2+}) + (O^{2-}) &= [Fe] + [O] \\ \hline [S] + (O^{2-}) &= (S^{2-}) + (O^{2-}), \end{aligned} \quad (6)$$

константа равновесия которой равна

$$K_S = \frac{a_{(S^{2-})}[\%O]}{a_{(O^{2-})}[\%S]} \quad \lg K_S = -\frac{9225}{T} + 3,01 \quad (7)$$

Основной материал исследований. В соответствии с методикой расчета равновесий металл-шлак на основе ионной теории шлаков, предложенной П. Герасименко, отклонение реальных шлаковых систем от идеальных учитывается зависимостью значений K_S от состава шлака, и вводится соотношение:

$$K_S^{Fe} = \frac{x_{Fe^{2+}} x_{O^{2-}}}{[\%S]} = B x_{O^{2-}}^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

где $B = 0,043$.

Наиболее эффективно процесс десульфурации металла происходит при контакте металла со шлаком, обладающим хорошей подвижностью и соответствующей серопоглатительной способностью. Имеется несколько подходов к расчету серопоглатительной способности шлаков.

И.Д. Соммервилем [2] для определения сульфидной емкости металлургических шлаков рекомендовано уравнение

$$\lg C_s = \frac{22690 - 54640 \Lambda}{T} + 43,6 \Lambda - 25,2 \quad (9)$$

А.С. Венкатадри с сотрудниками [3] рекомендовали зависимость, связывающую сульфидную емкость шлаков с величиной их основности (В), вычисленной по преобразованному соотношению Белла:

$$\lg C_s = -5,54 + 1,35B + 1,58 \cdot 10^{-3}(t - 1500), \quad (10)$$

где t – температура, °С.

$$B = \frac{(CaO) + 1,42(MnO) + 0,69(MgO)}{0,93(SiO_2) + 0,18(Al_2O_3)}, \quad (11)$$

Для определения сульфидной емкости шлаков, оптическая основность которых не превышает 0,8, авторами [4-5] рекомендована формула Р.Юнга

$$\lg C_s = 13,913 + 42,84 \Lambda - 23,82 \Lambda^2 - \frac{11710}{T} - 0,0223(SiO_2) - 0,02275(Al_2O_3) \quad (12)$$

где T – температура, К; (SiO_2) и (Al_2O_3) – содержание оксидов в шлаке, %;

Λ – оптическая основность шлака, которая находится по формуле

$$\Lambda = \sum_i X_i \Lambda_i \quad (13)$$

где X_i – эквивалентная катионная доля i -го компонента;

Λ_i – оптическая основность i -го компонента.

Использование величин оптической основности корректно лишь в том случае, если между компонентами системы нет химического взаимодействия и энергетическими характеристиками процесса формирования расплавов из исходных компонентов можно пренебречь. Как следствие, использование этого критерия дает хорошие результаты для однотипных по составу групп шлаковых расплавов.

В настоящей работе для оценки серопоглатительной способности шлаков использована методика оценки серопоглатительной способности по методике [6].

Для анализа сталеплавильных шлаков на выпуске из конвертера и после обработке на УЖП из массива производственных данных конвертерного цеха (для ковша №8) ПАО "Днепропетровский меткомбинат" были отобраны 200 плавков наиболее представительных марок стали. Се-

ропоглотительная способность для этих шлаков рассчитывалась по модели

$$\lg C_S = 2,97\Delta e + 12,07\rho - 3,17Z(k-a) - 2,06, \quad (14)$$

где ρ – показатель стехиометрии, равный отношению чисел катионов (К) и анионов (А), Δe – количество электронов, локализуемое в направлении связи К-А, а также среднестатистический заряд $Z_{К-А}$ в связи К-А.

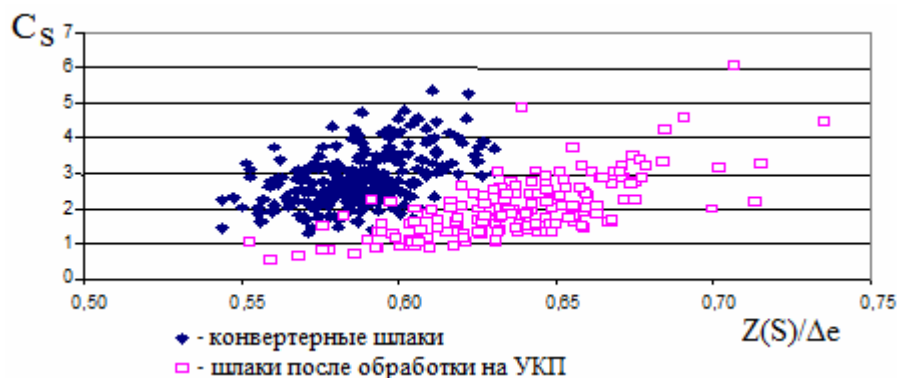


Рисунок 1 - Влияние зарядового состояния серы в шлаке на его серопоглотительную способность

Как следует из рисунка 1, конвертерные шлаки обладают более высокой серопоглотительной способностью, нежели на УКП, что объясняется более высоким зарядовым содержанием серы, однако эффективность десульфурации на УКП достигает снижения уровня серы порядка 0,015%, что в свою очередь показывает, что десульфураторный потенциал шлака не используется в полной мере (рис. 2).

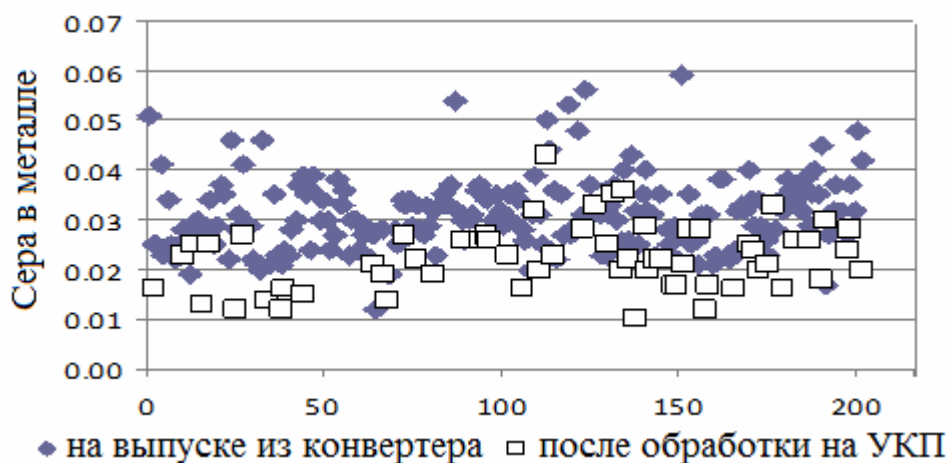


Рисунок 2 - Сера в стали (ковш №8)

Проведен анализ различных подходов к расчету равновесного коэффициента распределения серы с помощью эмпирических зависимостей.

В работе [1] представлена модель для расчета равновесного коэффициента распределения серы от сульфидной емкости шлака и состава металла

$$\lg L_S = \lg C_S - \frac{770}{T} + 1,15 - \lg a_{[O]} + \lg f_{[S]} \quad (15)$$

По данным [7] равновесный коэффициент распределения серы удовлетворительно описывается аналогичным, но несколько отличающимся уравнением

$$\lg L_S = \lg C_S + \frac{2361}{T} - 0,367 - \lg a_{[O]} + \lg f_{[S]} \quad (16)$$

В работе [8] модель расчета равновесного коэффициента распределения серы представлено как зависимость от состава шлака и металла

$$\lg L_S = -2,78 + 0,86\{[(CaO) + 0,05(MgO)] / [(SiO_2) + 0,6(Al_2O_3)]\} - \lg a_{[O]} + \lg f_{[S]} \quad (17)$$

Активность кислорода в металле находили как равновесный кислород с алюминием, так как металл на УКП раскисляют алюминием



Для этой реакции константа равновесия запишется при активности оксида алюминия равной единице

$$K_p = \frac{1}{[Al]^2 [O]^3}, \quad \lg K_p = -\frac{64900}{T} + 20,63 \quad (19)$$

Коэффициент активности серы и кислорода в стали можно найти по параметрам взаимодействия первого порядка:

$$\lg f_{[S]} = \sum_{j=1}^n e_j^S [%j] \quad (20)$$

Рассчитаны значения равновесных коэффициентов распределения серы по трем моделям (1)-(3) для составов шлака и металла после обработки на УКП для того же массива производственных данных. Сопоставления равновесных коэффициентов распределения серы, рассчитанные по трем моделям, и фактические значения показаны на рис. 3.

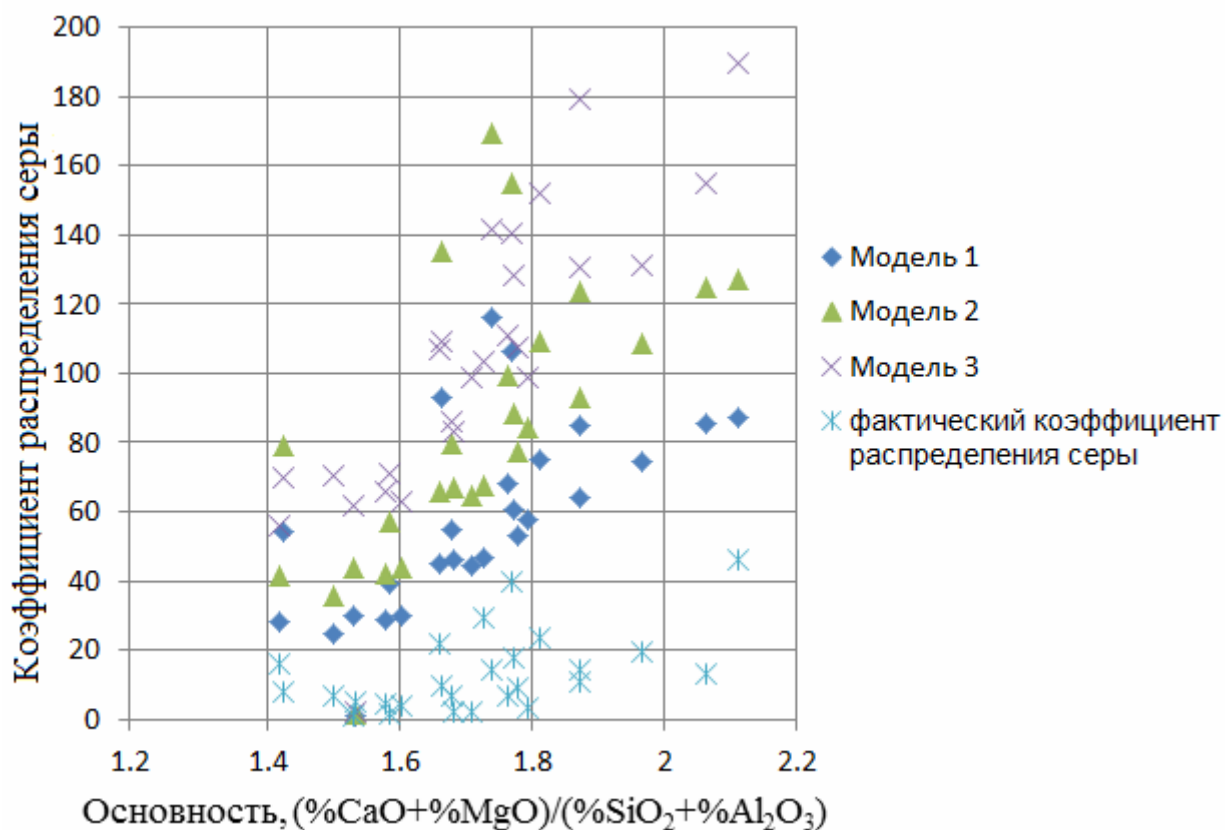


Рисунок 3 – Сопоставление значений равновесных коэффициентов распределения серы, рассчитанные по моделям (1) – (3), и фактических значений коэффициента распределения серы между шлаком и металлом после обработки на УКП

В некоторых случаях разбег значений составляет 1,5-2 раза (например, модели (1) и (3)). Для всех представленных моделей совпадает тенденция роста коэффициента распределения серы от основности шлака, причем фактический коэффициент распределения серы между металлом и шлаком ниже, чем равновесный, из чего можно сделать вывод, что десульфуризирующий потенциал шлака не используется в полной мере.

Учитывая высокую информативность интегральных показателей Δe и ρ шлака, в части, оценки рафинирующих свойств сталеплавильных шлаков, выбор рационального состава рекомендуется осуществлять на основе картирования поверхности значений серы (коэффициента распределения серы) в координатах Δe и ρ , построенных по данным текущих производственных плавок. На рис. 2.16 представлена картограмма изменения содержания серы в конвертер-

ной стали от соотношений Δe и ρ , оптимальные значения которых выбираются для наведения шлака, обеспечивающего соответствующий уровень серы.

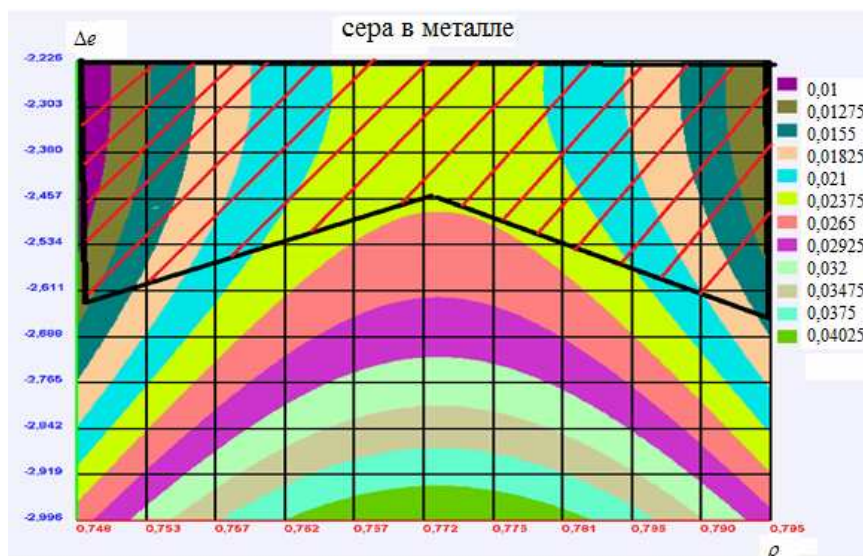


Рисунок 4 - Картограмма отклика серы в конвертерной стали от соотношений Δe и ρ

Заштрихованные на рис.2.10 и 2.11 области соответствуют интервалам изменения параметров Δe и ρ для наведения шлака, обеспечивающего требуемое содержание серы на уровне $S \leq 0,025\%$.

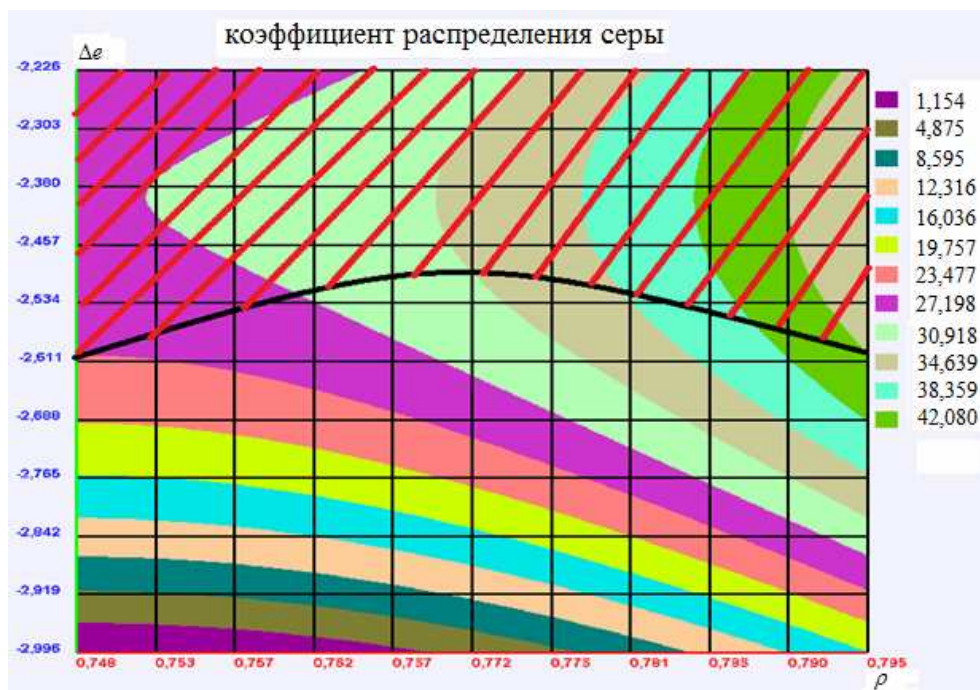


Рисунок 5 - Картограмма отклика коэффициента распределения серы на выпуске из УКП в координатах Δe и ρ

Выводы. Выполнен анализ существующих методов оценки серопоглатительной способности сталеплавильных шлаков с использованием эмпирических зависимостей коэффициента распределения серы по сульфидной емкости шлака, оптической основности. Показано, что равновесный коэффициент распределения серы выше, чем фактически наблюдаемый, т.е. десульфуризирующий потенциал шлака используется в неполной мере.

Для шлаков используемых на УКП предложено использовать интегральные показатели Δ еир, и представлена картограмма изменения содержания серы от их соотношений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казачков Е. А. Расчёты по теории металлургических процессов / Е.А. Казачков. - М.: Металлургия, 1988. - 288 с.
2. Соммервиль И. Д. Измерение, прогноз и применение емкостей металлургических шлаков / И. Д. Соммервиль // Инжекционная металлургия'86: Труды конференции. - М.: Металлургия, 1990. - С. 107 - 120.
3. Оценка сульфидных емкостей комплексных шлаков с низким содержанием оксидов железа из распределения серы между шлаком и металлом / Венкатадри А. С., Шринивасан К. Р., Гупта С. К. // Инжекционная металлургия'86: Труды конференции. - М. : Металлургия, 1990. - С. 319 - 328.
4. Шатоха В. И. Прогноз содержания серы в чугунах по величине сульфидной емкости шлака и выбор его рационального состава / В. И. Шатоха // Черная металлургия. - 2001. - № 12. - С. 42 - 46.
5. Шатоха В. И. Оценка коэффициента распределения серы между чугуном и шлаком в доменной печи по величине сульфидной емкости / В. И. Шатоха // Теория и практика металлургии. - 1998. - № 2. - С. 37 - 40.
6. Теоретический анализ и практическое использование модельных зависимостей серопоглатительной способности шлаков сталеплавильного производства / Л.В. Камкина, Ю.И. Сокур, Д.Н. Тогобицкая, А.А. Надточий, Д.В. Середа, Я.С. Синицин / Сборник докладов 10-й научно-практической конференции «Кадры для региона – современная металлургия нового тысячелетия». - Липецк, 2013. - С. 186-195.
7. Григорян В. А. Теоретические основы электрометаллургии стали / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. - М. : Металлургия, 1987. - 272 с.
8. Григорян В. А. Физико- химические расчеты электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, А. Я. Стомахин, А. Г. Пономаренко. - М. : Металлургия. - 1989. - 288 с.

УДК 519. 8

В.Е. Белозёров, В.Н. Журавлёв, В.Г. Зайцев, П.Е. Останин
**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДАМИ
РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА**

Аннотация. Проведены исследования динамики влияния энергии фазовых процессов рабочего тела камеры сгорания газотурбинного двигателя методами рекуррентного анализа. Экспериментально определены параметры бифуркационных точек и диапазоны периодичности.

Ключевые слова: фазовые процессы горения, газотурбинный двигатель, рекуррентный анализ.

Введение. Постановка задачи

В настоящее время авиационная техника в значительной степени эксплуатируется согласно стратегиям управления ресурсом, учитывающим ее техническое состояние. Одно из перспективных направлений решения задачи повышения эффективности характеристик газотурбинных двигателей (ГТД) к условиям эксплуатации, надежности и ресурса лежит в области объектно-ориентированных интегрированных систем автоматического управления и контроля. Эффективность систем контроля базируется на принципах подетальной динамической адаптации математических моделей диагностирования к параметрам физических процессов, приводящих к изменению ресурса деталей и узлов.

Таким образом, важной и актуальной задачей современного двигателестроения является разработка новых и модификация существующих математических моделей энергетических процессов ГТД. В настоящее время сформировалась концепция динамического хаоса, которая позволяет сложное поведение динамических систем, в том числе и процессов в ГТД, описывать достаточно простыми нелинейными моделями. Зачастую такое описание является единственно возможным, поскольку далеко не всегда удается реализовать наиболее проверенный и надежный путь – записать модельные уравнения, исходя из так называемых «законов сохранения», таких как законы

© Белозёров В.Е., Журавлёв В.Н., Зайцев В.Г., Останин П.Е., 2014

Ньютона в механике и уравнения Максвелла в электродинамике. Однако на практике типичны ситуации, когда основным источником информации о поведении объекта являются данные измерений наблюдаемой величины, сделанные в последовательные моменты времени, – временные ряды.

Основная часть. Краткое описание математической модели

В настоящей работе сделана попытка проанализировать процессы в камере сгорания газотурбинного двигателя с помощью временных рядов. Сложность изучения таких процессов общеизвестна; она возрастает еще и в связи с тем, что эти процессы демонстрируют хаотическое поведение. Главным инструментом для изучения временного ряда, описывающего ускорения колебаний стенок камеры сгорания, является рекуррентный анализ и его визуализация с помощью рекуррентных диаграмм. Не будем останавливаться на элементах нелинейного анализа [1, 2]. Остановимся на сути поставленной проблемы, а также приведем некоторый анализ полученных численных результатов.

Для анализа была использована информация, снятая с показаний пьезоэлектрических датчиков вибраций, первый из которых был установлен в зоне крепления жаровой трубы, второй идентифицировал радиальные вибрации ведущей шестерни редуктора. Анализируемые данные представляют собой изменения ускорения колебаний стенок камеры g (м/с^2); интервал между замерами $\approx 4,63 \cdot 10^{-6}$ с, частота дискретизации 216 кГц, время наблюдения ≈ 70 с.

Ниже представлена визуализация обоих измеренных сигналов с датчиков, начиная с 690 секунды (рис.1). Отметим, что после 700-ой секунды произошла резкая смена режима работы двигателя.

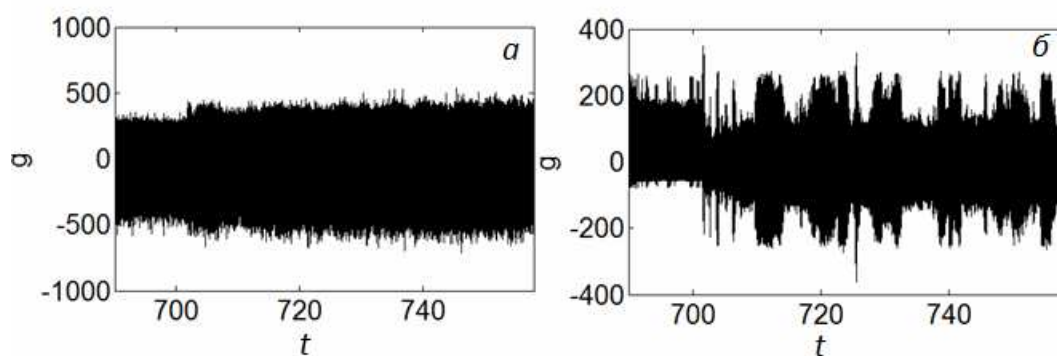


Рисунок 1 - Графики сигналов: а – первый датчик; б – второй датчик

В процессе работы ГТД происходят изменения динамических характеристик газового потока (температуры, давления или скорости). Изменение этих характеристик приводит к скачкообразной перестройке процессов в двигателе. Точки, где происходит такая перестройка и являются точками бифуркации. На рис. 2 указаны аттракторы, относящиеся к небольшим (относительно всего временного ряда) интервалам времени, на которых не происходит качественной перестройки процесса в двигателе. Нецелесообразно строить аттракторы на всем промежутке измерения, потому что такая реконструкция не несёт информации о точках бифуркации.

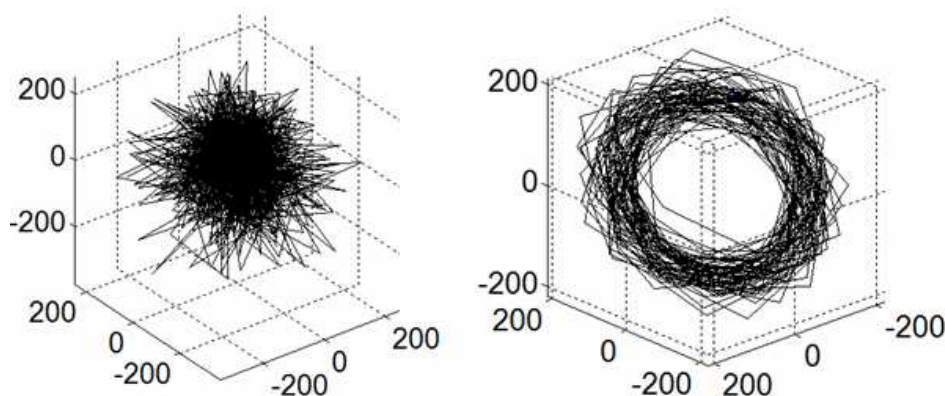


Рисунок 2 - Реконструкции поведения систем:

слева – аттрактор первого сигнала; справа – аттрактор второго сигнала

Аттрактор, приведенный на рис.2 (слева) показывает хаотичность изменения ускорения колебаний корпуса жаровой трубы, что характерно для турбулентных процессов горения. Аттрактор, приведенный на рис.2 (справа) демонстрирует квазипериодические осцилляции опоры ведущей шестерни редуктора и характеризует квазипериодические процессы роторных и зубцовых вибраций.

Визуализация аттракторов недостаточна для нахождения параметрических особенностей работы ГТД при его переходе из одного состояния в качественно другое состояние. Для определения таких критических состояний предлагается использовать нелинейный рекуррентный анализ [4], который позволит установить точки, в которых происходит качественное изменение процессов в ГТД.

Краткая методика построения рекуррентной диаграммы

Пусть точка $x(i)$ соответствует i -ой точке фазовой траектории, описывающей выбранную динамическую систему в m -мерном про-

странстве; $i=1,2,\dots,N$. Тогда рекуррентный график есть массив точек $N \times N$, где ненулевой элемент с координатами (i, j) соответствует случаю, когда $x(j)$ достаточно близко к $x(i)$.

Рекуррентность состояния в момент i при различных значениях времени j воспроизводится внутри двумерной квадратной матрицы с черными и белыми точками, где черные точки обозначают наличие рекуррентности (близости траекторий), а по обеим осям откладывается время. Такое представление называется рекуррентной диаграммой. Математически это может быть выражено следующим образом:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), x_i \in R^m, i, j = 1, 2, \dots, N$$

где N – число рассматриваемых состояний x_i , ε_i – граничное расстояние или расстояние от центра выбранной окрестности (точка $x(i)$) до ее границы, $\|\cdot\|$ – евклидова норма, и $\Theta(\cdot)$ – функция Хевисайда.

Согласно определению, основная диагональ $R_{i,j} = 1$ ($i=1,2,\dots,N$) полностью состоит из черных точек и называется линией тождественности. Стоит подчеркнуть, что отдельные рекуррентные точки (i, j) не несут никакой информации о текущих состояниях в моменты i и j , однако, в совокупности позволяют реконструировать свойства процесса.

На практике бесполезно, да и почти невозможно обнаружить абсолютно рекуррентные состояния в том смысле, что $x_i \equiv x_j$. По этой причине состояние x_i рекуррентно состоянию x_j , если они оказываются достаточно близкими друг к другу. Это означает, что векторы x_j , попадающие в m -мерную окрестность радиуса ε_i с центром в точке x_i , являются рекуррентными, а такие точки называются рекуррентными точками.

Поскольку сложные системы содержат много компонент и их поведение определяется большим числом взаимодействий, то даже одна из этих компонент и их поведение определяется большим числом взаимодействий. Именно из этих соображений в нелинейном рекуррентном анализе и вводится размерность пространства вложения (m) и запаздывание по времени (τ).

Отметим, что для построения рекуррентных диаграмм (РД) и их численного анализа используется программное обеспечение в среде MatLab.

Рассмотрим построение РД для имеющихся двух последовательностей данных.

Построим РД для данных с каждого датчика. Для этого сначала определим оптимальную размерность пространства вложения, в котором должен протекать наш процесс. Его расчет представлен на рис.3.

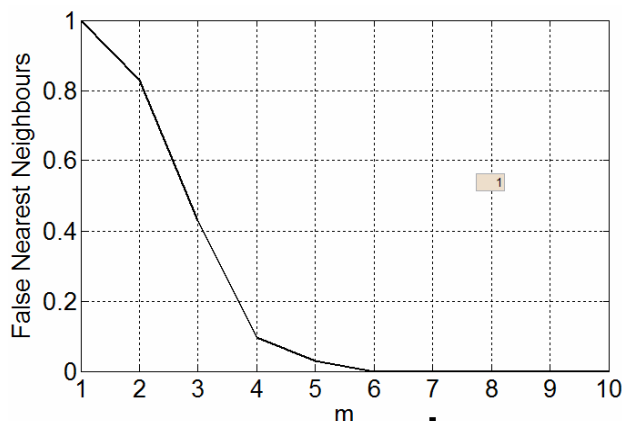


Рисунок 3 - Расчет размерности пространства вложения

Таким образом, наиболее вероятно, что полученный временной ряд описывает поведение динамической системы как минимум в шестимерном пространстве (отдельные численные эксперименты показывают, что эта размерность может достигать 10). В принципе, если речь идёт о каком-то механическом (газо- или термодинамическом) процессе, то достаточно трёх уравнений, каждое из которых является той или иной формой второго закона Ньютона.

Взяв размерность пространства вложения $m=6$, время задержки $\tau=1$ получим следующие рекуррентные диаграммы, представленные на рис.4.

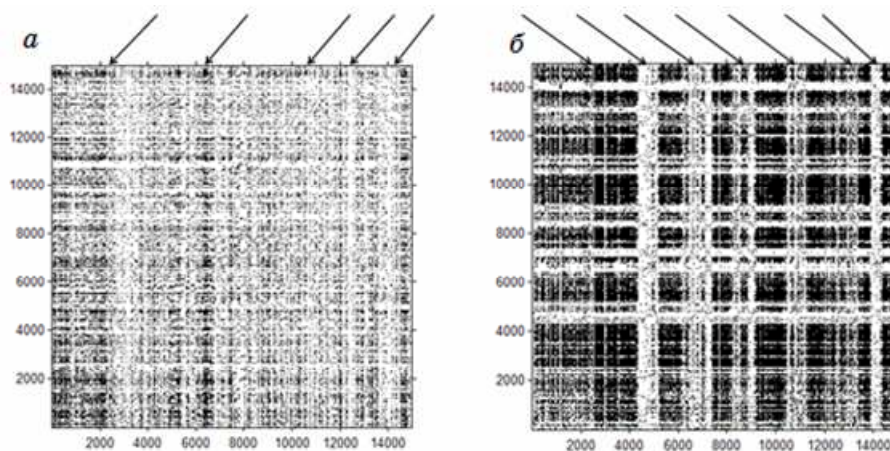


Рисунок 4 Рекуррентная диаграмма для данных: а - первого датчика, б - второго датчика

Резкие изменения контрастности и яркости на графиках показывает наличие бифуркационных переходов в соответствующие моменты времени (на графиках указаны стрелками).

Кросс-рекуррентный анализ

Графический инструмент кросс-рекуррентных диаграмм (КРД) позволяет проводить подобный анализ уже для двух временных рядов. Впервые обобщение РД на их «двумерный аналог» был сделан Збилутом в 1998 году [5] и независимо от него Марваном [3].

Очевидно, что поскольку мы рассматриваем два ряда, то невозможно говорить о рекуррентности их состояний относительно друг друга, а лишь о конъюнкции (совпадения по времени) состояний обеих сторон. Тем не менее, термин «кросс-рекуррентная диаграмма» используется, в данном случае, в силу удобства и наглядности аналогии с РД.

Обе траектории, представленные КРД, должны отображать одну и ту же динамическую систему при одинаковых параметрах состояния, поскольку анализ производится в одном и том же фазовом пространстве. Это особенно важно, если временные ряды относятся к разным сериям измерений (например, температурный временной ряд и данные по измерению давления). Применение же инструмента КРД для полностью сторонних друг другу измерений не имеют физического смысла.

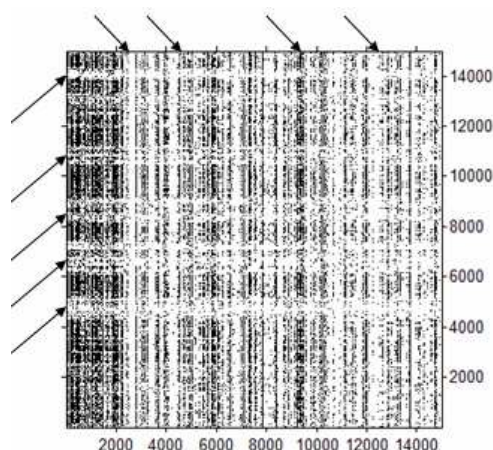


Рисунок 5 - Кросс-рекуррентная диаграмма для данных первого и второго датчика

Отметим, что КРД двух указанных временных рядов позволяет утверждать о наличии их синхронизации. Также стрелками на графике указаны диапазоны, где присутствует определённое влияние од-

ного сигнала на другой (изменение яркости и контраста), на бифуркационных интервалах, указанных на рис. 4.

Количественный анализ рекуррентных диаграмм (recurrence quantification analysis, RQA)

Ряд исследований показали, что приведенные ниже методы могут использоваться для выявления точек бифуркации и переходов из одного состояния в другое и наоборот.

Позднее были предложены методы, использующие плотность вертикальных структур РД, позволившие выявлять переходы хаос-хаос и нечувствительные к нестационарности и длине исследуемых рядов.

Приведенные ниже графики построены в предположении, что процесс меняется через каждые $4,63 \cdot 10^{-3}$ с (это сделано потому, что мы не знаем где на самом деле будут происходить бифуркационные скачки). Если же наше предположение неверно (система не меняет своего поведения через $4,63 \cdot 10^{-3}$ с), то это не будет вносить существенного изменения в анализ, а просто продублирует результаты полученные раньше.

На всех вышеприведенных графиках (рис. 6) замечен большой скачок в момент смены режима работы двигателя. Это показывает, что инструмент рекуррентного анализа действительно способен отследить такие скачкообразные изменения параметров. Ниже описаны основные нелинейные характеристики, используемые в рекуррентном анализе.

Мера рекуррентности (Recurrence rate) – показывает плотность рекуррентных точек. Данная мера описывает вероятность нахождения рекуррентной точки в фиксированном месте на РД (вероятность повторения состояния).

Ниже описываются диагональные структуры. Они показывают время, в течение которого участок траектории подходит достаточно близко к другому участку траектории. Таким образом, эти линии позволяют судить о расхождении траектории через какое-то время.

Средняя длина диагональных линий (Averaged diagonal line length) – это среднее время, в течение которого два участка траектории проходят близко один к другому. Эта величина, может рассматриваться как среднее время предсказуемости процесса.

Мера детерминизма (Determinism) или мера предсказуемости поведения процесса – это отношение рекуррентных точек, составляющих диагональные структуры, к общему количеству рекуррентных точек. Процессы со стохастическим поведением могут порождать очень короткие диагонали либо вообще не порождать их, в то время как детерминированные процессы дают длинные диагонали и малое количество отдельных рекуррентных точек.

Мера энтропии (Entropy) – отражает величину детерминированной составляющей в системе.

Мера замирания (Laminarity) – определяется отношением количества рекуррентных точек, образующих вертикальные линии, к общему количеству рекуррентных точек. Ламинарность характеризует наличие состояния замирания системы (т.е. когда движение системы по фазовой траектории останавливается или продвигается очень медленно).

Средняя длина вертикальных структур (Trapping time) – мера времени остановки процесса. Эта величина характеризует среднее время, которое система может провести в определённом состоянии.

На рис. 6 представлены графики вышеописанных мер RQA (слева для данных первого датчика, справа для второго).

Из графиков видно, что вероятность повторения состояний первого сигнала очень мала и процесс является малопредсказуемым. Для второго же сигнала начиная с $N \approx 2500000$ и более повторение состояний практически невозможно (вероятность такого повторения близка к 0.05) и процесс становится плохо предсказуемым.

Кроме этого, приведенные графики показывают, что средние длины диагональных линий сигнала снятого с первого датчика изменяются незначительно; время, когда траектории проходят близко друг от друга, – постоянно. В тоже время можно утверждать, что для второго сигнала при $N < 2500000$ время, когда траектории проходят близко друг от друга, – постоянно (что говорит о возможности предсказуемости процесса).

Из анализа мер RQA видно, что фазовые траектории процесса меняются достаточно быстро.

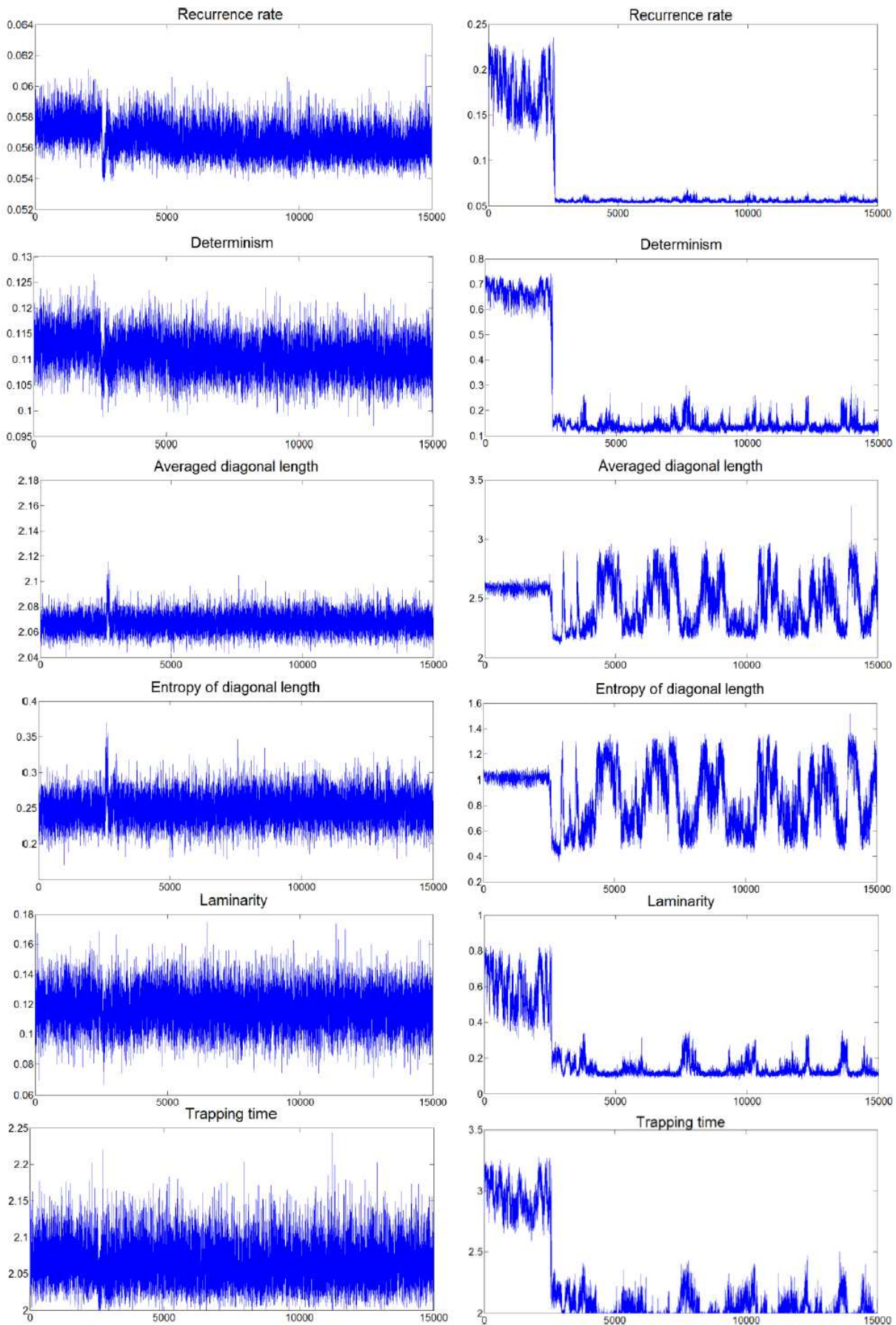


Рисунок 6 - Меры RQA

Выводы:

1. Указаны бифуркационные точки, после перехода через которые динамика процесса меняется.

2. Доказано существования диапазонов ускорения, в которых динамический процесс внутри камеры сгорания принимает периодический характер.

3. Показано, что для анализа сложных нелинейных процессов удобно использовать аппарат рекуррентных диаграмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозёров В.Е., Зайцев В.Г. Нелинейный рекуррентный анализ в обработке временных рядов. Региональный межвузовский сборник «Системные технологии», Вып. 3 (92) 2014, стр. 42-49.
2. Norbert Marwan, M. Carmen Romano, Marco Thiel. Jurgen Kurths. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports* 438, 2007. – p. 237-239.
3. N. Marwan, M. Thiel, N. R. Nowaczyk: Cross Recurrence Plot Based Synchronization of Time Series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 9(3/4), 325–331p. (2002).
4. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Recurrence Plots of Dynamical Systems.// *Europhysics Letters* 5. – 1987. – P. 973-977.
5. J.P. Zbilut, A. Giuliani, C.L. Webber, Jr.: Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification, *Physics Letters A*, 246(1–2), 122–128p. (1998).

Л.О. Кириченко

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ МАРШРУТИЗАЦИИ ФРАКТАЛЬНОГО ТРАФИКА

Аннотация. Предложен метод оценки стоимости маршрутизации, учитывающий фрактальные свойства сетевого трафика, на основании которых пересчитывается стоимость маршрутов и выбирается оптимальный путь. Имитационное моделирование показало, что использование разработанного метода значительно повышает качество обслуживания и уменьшает потери при передаче фрактального трафика.

Ключевые слова: самоподобный и мультифрактальный трафик, маршрутизация, технология MPLS.

Постановка задачи

С развитием компьютерных сетей и информационных технологий интенсивность телекоммуникационного трафика растет в геометрической прогрессии. Возрастают потребности пользователей, которые предполагают и доступ к интегрированным сервисам сети, и организацию виртуальных частных сетей, и множество других специальных услуг. Одним из решений возникающих задач является разработка технологии MPLS (Multiprotocol Label Switching), которая значительно расширяет имеющиеся перспективы масштабирования, повышает скорость обработки трафика и предоставляет огромные возможности для организации дополнительных сервисов.

Экспериментальные и численные исследования, проведенные в последние десятилетия, свидетельствуют, что трафик во многих мультисервисных сетях имеет самоподобные свойства. Самоподобный трафик вызывает значительные задержки и потери пакетов, даже если суммарная интенсивность всех потоков далека от максимально допустимых значений [1,2]. Самоподобные свойства информационных потоков обнаружены во многих локальных и глобальных телекоммуникационных сетях, в частности в сетях MPLS [3,4].

В связи с вышеизложенным начали активно исследоваться механизмы повышения качества обслуживания и методов управления

трафиком в мультисервисных сетях, в том числе сетях MPLS, функционирующих в условиях самоподобного и мультифрактального трафика [5]. В работе [6] предложен метод маршрутизации с учетом фрактальной структуры трафика, что позволяет предупреждать перегрузку сети при пиковых выбросах трафика.

Целью представленной работы является исследование и тестирование метода оценки стоимости маршрутизации, учитывающего самоподобные и мультифрактальные свойства телекоммуникационного трафика в сетях MPLS с помощью имитационного моделирования.

Метод оценки стоимости маршрутизации

В архитектуре MPLS возможен выбор маршрутов на основе отдельных потоков, причем различные потоки, связывающие одну и ту же пару конечных точек, могут следовать по разным маршрутам. При возникновении перегрузки маршруты могут быть изменены. Протокол маршрутизации, основываясь на данных о состоянии каналов, вычисляет маршруты наименьшей стоимости между входным граничным маршрутизатором и всеми остальными. В одной линии связи m может существовать множество каналов $y \in Y$ для передачи трафика. Для каждого канала трафика определяется набор каналов связи для пути $l \in L_y$. Значение стоимости маршрутизации c_m присваивается линии связи m и зависит от ряда параметров, в частности, скорости, длины и надежности. [7-9].

Целевая функция, минимизирующая стоимость маршрута на множестве путей $P_y = \{p_y^1, \dots, p_y^{L_y}\}$, имеет следующий вид:

$$\sum_{y \in Y} \sum_{l \in L_y} C_y^l x_y^l(t) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Y – множество каналов передачи трафика, L_y – множество путей, $x_y^l(t)$ – пропускная способность пути p_y^l канала передачи трафика; C_y^l – стоимость пути p_y^l , равная сумме стоимостей линий связи:

$$C_y^l = \sum_{m \in p_y^l} c_m.$$

Самоподобный и мультифрактальный трафик

Самоподобие случайных процессов заключается в сохранении статистических характеристик при изменении масштаба времени и

характеризуется показателем Херста H , который является степенью самоподобия. Самоподобный трафик имеет особую структуру, которая сохраняется на многих масштабах – в реализации всегда присутствует некоторое количество очень больших выбросов при относительно небольшом среднем уровне трафика. Мультифрактальный трафик определяется как расширение самоподобного трафика за счет учета масштабируемых свойств статистических характеристик второго и выше порядков.

Как характеристику неоднородности мультифрактального потока данных в работе предложено ввести коэффициент нормированного разброса $S_{norm}(T) = S / \bar{X}$, где T – временной интервал, на котором фиксируется трафик, S – среднее квадратическое отклонение трафика, \bar{X} – среднее значение [6].

Коэффициент $S_{norm}(T)$ является безразмерным и не зависящим от интенсивности процесса. При работе в режиме реального времени целесообразно перейти от расчета мультифрактальных характеристик, которые являются достаточно затратными по времени, к вычислению величины $S_{norm}(T)$.

Метод оценки стоимости маршрутизации, учитывающий фрактальные свойства трафика

Протокол на уровне маршрутизации изменяется с учетом информации о самоподобии трафика из канального уровня и расчетом стоимости для каждого канала. При прохождении по сети трафика с сильными фрактальными свойствами требуется своевременное увеличение пропускных способностей линий связи. В работах [1,2,10] показано, что при значениях показателя Херста $H \geq 0,9$ или при персистентном трафике с нормированным разбросом $S_{norm} \geq 3$ величина потерь данных превышает 5-10%.

Чтобы отразить изменение фрактальных свойств потоков, стоимости путей C_y^l обновляются в регулярные промежутки времени и пересчитываются по формуле

$$C_{new_y}^l = \begin{cases} C_y^l, & H \leq 0,5; \\ C_y^l + (H - 0,5)C_0, & 0,5 < H < 0,9, S_{norm} \leq 1; \\ C_y^l + (H - 0,5)(S_{norm} - 1)C_0, & 0,5 < H < 0,9, 1 < S_{norm} < 3; \\ C_y^l + C_0, & H \geq 0,9 \text{ или } H > 0,5, S_{norm} \geq 3, \end{cases}$$

где $C_y^l = \sum_{m \in p_y^l} c_m$ определяется в соответствии с целевой функцией (1),

значение C_0 выбирается администратором сети с учетом топологии сети. Алгоритм маршрутизации не изменяется (стоимость пути $C_{new_y}^l = C_y^l$), если трафик является обычным пуассоновским потоком ($H = 0,5$) или обладает антиперсистентными свойствами ($H < 0,5$). При значении $0,5 < H < 0,9$ и малым разбросом данных ($S_{norm} \leq 1$) значение C_y^l увеличивается пропорционально значению показателя Херста. При значении показателя Херста $0,5 < H < 0,9$ и большим разбросом данных ($1 < S_{norm} < 3$) значение C_y^l увеличивается пропорционально обоим характеристикам. Стоимость с максимальным значением $C_y^l + C_0$ получается при значении $H \geq 0,9$ или при персистентном трафике с нормированным отклонением $S_{norm} \geq 3$.

Оценивание параметра Херста осуществляется с помощью дискретного вейвлет-преобразования, что позволяет работать в реальном времени [11]. После перерасчета стоимости всех путей объявление о состоянии путей рассылается между маршрутизаторами.

Тестирование с помощью имитационного моделирования

Для оценки эффективности предложенного метода было проведено его тестирование на открытой платформе графического моделирования сетей HUAWEI. В основу модельной сети были положены данные существующей мультисервисной корпоративной сети. Построенная сеть состоит из двух локальных сетей WIN1 и WIN2, которые объединены мультисервисной компьютерной сетью, и подключены к граничным маршрутизаторам SW1 и SW2 соответственно (рис.1).

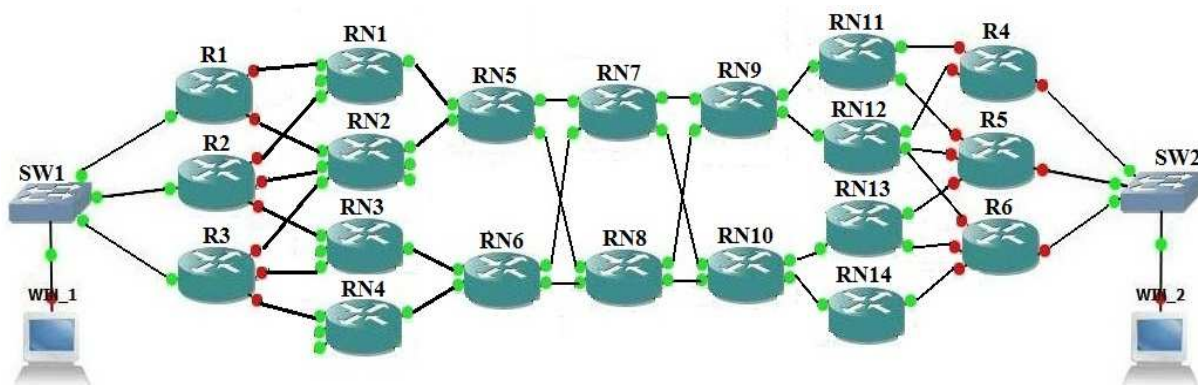


Рисунок 1 – Схема компьютерной модельной сети

Мультисервисная сеть состоит из внутренних маршрутизаторов R1, R2, R3, R4, RN1–RN14 (оборудование Mikrotik RB/750(GL)) и граничных маршрутизаторов SW1 и SW2 (оборудование Juniper SRX1008). Измерение характеристик сети и проходящего трафика происходило на входящих и выходящих портах маршрутизаторов SW1 и SW2. Источником трафика в экспериментах являлись реализации реального трафика и модельные реализации, генерируемые с помощью мультифрактальной модели [10].

В построенной модельной сети было проведено исследование влияния мультифрактальных свойств трафика на качество обслуживания сети, в частности, определение предельных пропускных способностей различных фрагментов сети и зависимости потерь пакетов от загрузки отдельных узлов сети и каналов связи, перенаправление наиболее критических информационных потоков на менее загруженные альтернативные узлы и др.

На рис.2 представлена динамика изменения пропускной способности канала связи WIN_1-SW1 при входящем мультифрактальном трафике без использования (вверху) и при использовании метода оценки стоимости маршрутизации (внизу). В первом случае средняя загрузка канала связи составляет 7 Гбит/с, при этом присутствует достаточно много пиковых выбросов. С течением времени амплитуда выбросов увеличивается. Исследования показали, что после некоторого периода времени в сети происходят потери данных, и система вновь возвращается в начальное состояние с меньшими колебаниями относительно средней пропускной способности.

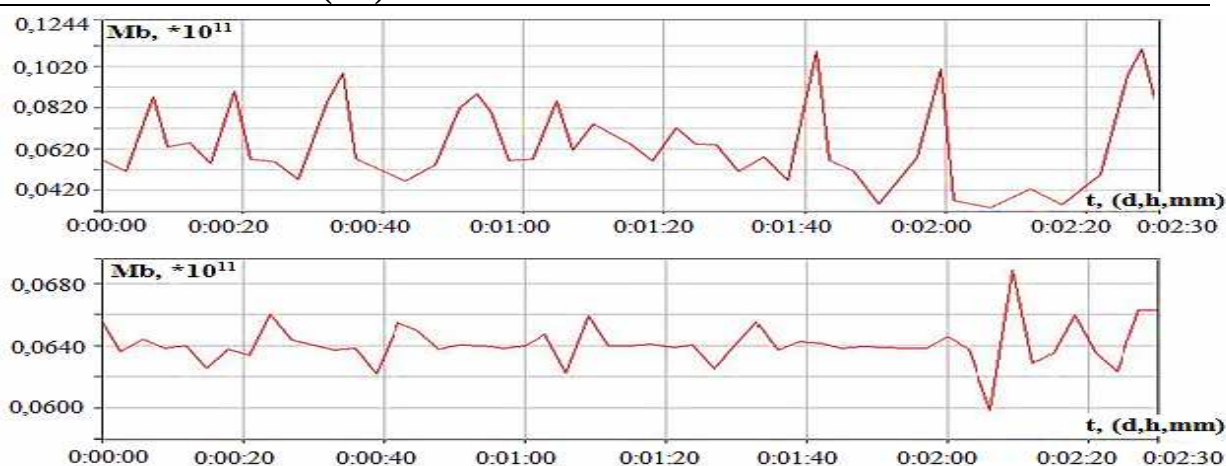


Рисунок 2 - Пропускная способность сети без использования (вверху) и при использовании метода оценки стоимости маршрутизации (внизу)

Для таких же входных реализаций трафика при использовании метода оценки стоимости маршрутизации средняя пропускная способность равна 6,4 Гбит/с, пиковый выброс наблюдается только в момент 2,1 часа. Трафик, проходящий в канале, является значительно более сглаженным. Следовательно, загрузка маршрутизаторов при таком проходящем по каналу трафике является более равномерной и предсказуемой. В верхней части рис.3 представлена соответствующая рисунку 2 зависимость количества потерянных данных на маршрутизаторе SW1, которая имеет место без использования метода. Со временем количество потерянных данных, увеличивается и достигает 46%, так как увеличивается количество и разброс значений пиковых выбросов относительно средней пропускной способности канала (см. рис. 2).

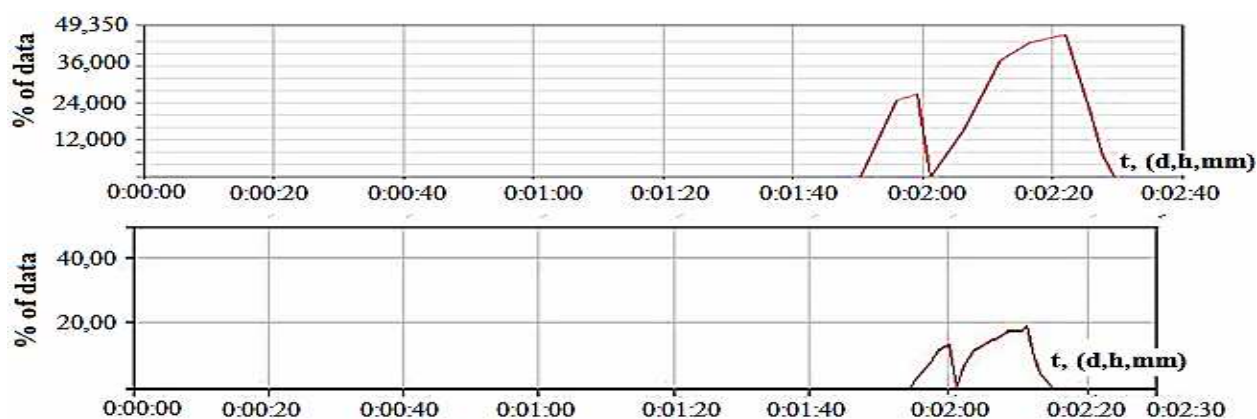


Рисунок 3 – Количество потерянных данных без использования (вверху) и при использовании метода оценки стоимости маршрутизации (внизу)

Внизу рисунка показана динамика потерь при использовании метода оценки стоимости маршрутизации. В этом случае количество потерянных данных значительно уменьшается (максимальное значение равно 19%).

Выводы

В работе предложен метод оценки стоимости маршрутизации, который учитывает фрактальные свойства трафика. Результаты имитационного моделирования показали, что при том же самом объеме передаваемой информации потери при передаче трафика, обладающего фрактальными свойствами, заметно ниже при использовании предложенного метода. Таким образом, можно сделать вывод, что использование разработанного метода оценки стоимости маршрутизации значительно повышает качество обслуживания в сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sheluchin O. I. Self-Similar Processes in Telecommunications / O. I. Sheluchin, S. M. Smolskiy, A. V. Osin // New York : John Wiley & Sons. – 2007. – 320 p.
2. Кириченко Л. О. Влияние методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях при самоподобной нагрузке / Л. О. Кириченко, Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 1/2 (49). – С. 15–18.
3. Шелухин О. И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения / О. И. Шелухин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2011. – 576 с.
4. Carvalho, de. Analysis of the influence of self-similar traffic in the performance of real time applications / P. N. P. de Carvalho, H. Abdalla Jr., A. M. Soares, P. Solns Barreto, P. Tarchetti // Department of Electrical Engineering, University of Brasilia. – 2005. – P. 480–485.
5. Кириченко, Л.О. Анализ методов повышения QoS в сетях MPLS с учетом самоподобия трафика / Л.О. Кириченко, Э. Кайали, Т.А. Радивилова // Системні технології. – 2011. – Вип. 3. – С. 52–59.
6. Кириченко, Л.О. Расчет стоимости маршрутизации в сети MPLS с учетом фрактальных свойств трафика / Л.О. Кириченко, Т.А. Радивилова, Э. Кайали // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вып. 161. – С. 116–121.
7. Graziani, R. Routing Protocols and Concepts: CCNA Exploration Companion Guide // R. Graziani, A. Johnson // Cisco Systems Networking Academy Program. – 2012. – 606 p.
8. Зайченко, Е.Ю. Сети с технологий MPLS: моделирование, анализ и оптимизация / Е.Ю. Зайченко, Ю.П. Зайченко. К.: Изд. «Политехника», 2008. – 320 с.
9. Радивилова, Т. А. Описание модели сети MPLS и методов управления трафиком /Т. А. Радивилова, Э. Кайали // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 3 (23). – С. 184–189.
10. Kirichenko, L. Modeling telecommunications traffic using the stochastic multifractal cascade process // L. Kirichenko, T. Radivilova, E. Kayali // Problems of Computer Intellectualization / ed. K. Markov, V. Velychko, O. Voloshin. – Kiev–Sofia: ITHEA. – 2012. – P. 55–63.
11. Abry, P. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation / P. Abry, P. Flandrin, M. S. Taqqu, D. Veitch. – New-York: John Wiley & Sons, 2000. – P. 39–88.

СОДЕРЖАНИЕ

МИХАЙЛОВСКИЙ Н.В., БЕЙЦУН С.В., ДЁМИН С.И. Исследование на Elcut-модели теплового состояния футеровки ковша при выпуске расплава	3
БЕЙГУЛ О.О., КОРНИЙЧУК М.М., ЛЕПЕТОВА Г.Л. Системне формування динамічних навантажень на несучу конструкцію зчленованого контейнеровоза з U-подібною рамою.....	12
БІЛОЗЬОРОВ В.Є., МИЩЕНКО О.С. Про гомоклінічні орбіти двовимірних автономних квадратичних динамічних систем.....	18
МАЗУРЕНКО В.Б. Модель процесса измерения уровня жидкого топлива в условиях качки.....	25
ЖУРАВЛЁВ В.Н., ЕДИНОВИЧ А.Б., ПАПЧЁНКОВ А.В. Математическая модель эксплуатационной кинематометрии зубчатых передач газотурбинных двигателей.....	37
ВОЛКОВСКИЙ О.С., КОВЫЛИН Е.Р. Семантический анализ содержимого Web-приложений.....	47
МОРОЗ Б.І., ДЯЧЕНКО О.О. Розробка автоматизованої системи митного контролю на морському транспорті	55
ГНАТУШЕНКО В.В. Моделювання агрегованого трафіку передачі даних на основі моделі ON/OFF.....	65
ЛАХНО В.А. Моделі, методи та інформаційні технології захисту корпоративних систем транспорту на основі інтелектуального розпізнавання загроз	73
ДОБРОВ И.В., ГАРКАВИ Н.Я., ФЁДОРОВ Е.Ф., КАРПЕНКО В.В., КЛИМЕНКО И.В., ЛИТВИНЕНКО О.Н. К вопросу об использовании моделей-ассоциаций	84
МАЛАЙЧУК В.П., ДЕРЕВЯНКО И.И. Обработка искаженных модулирующей помехой измерений в задаче оценки информативных параметров объектов контроля	91
DOROFIEIEV Yu.I. Subsystem stabilization approach to robust decentralized inventory control in supply networks	101
ХИТЬКО А.Ю., ИВАНОВА Л.Х., ХИТЬКО М.А., ШАПРАН Л.А. Системный подход к совершенствованию конструкции роликов МНЛЗ	114

ЯСЕВ А.Г. Система математического моделирования механического разделения неоднородных конструкций.....	123
ГНАТУШЕНКО В.В., СЕРЕДА С.Ю. Геометричне трансформування та прив'язка фотограмметричних зображень проекційної природи.....	133
ЕРЁМИН А.О. Определение теплофизических свойств газов в задаче математического моделирования нагревательной печи с регенераторами	140
АЛЬРАБАБА ХАМЗА Формальное описание и правила работы неуправляемых и управляемых клеточных тетраавтоматов	148
МИРОНОВА Т.М. Застосування кількісного аналізу для дослідження впливу модифікування на первинну структуру доєвтектичних білих чавунів	157
ВОЛОДЬКО Е.Г., ТУТЫК В.А. Планирование активного эксперимента для прогнозирования шероховатости при электролитно-плазменной полировке.....	163
НАДТОЧИЙ А.А., СОКУР Ю.И., КАМКИНА Л.В., БЕЗШКУРЕНКО А.Г. Математические модели серопоглотительной способности шлаков при внепечной обработке стали	170
БЕЛОЗЁРОВ В.Е., ЖУРАВЛЁВ В.Н., ЗАЙЦЕВ В.Г., ОСТАНИН П.Е. Исследование фазовых процессов газотурбинного двигателя методами рекуррентного анализа.....	178
КИРИЧЕНКО Л.О. Об одном методе маршрутизации фрактального трафика	188

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.88.4

Михайловський М.В., Бейцун С.В., Дьомін С.І. **Дослідження на ELCUT-моделі теплового стану футеровки ковша при випуску розплав** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.3 - 11.

Зміну температурного поля футеровки при поступовому заповненні ковша рідкої сталлю отримано в результаті рішення методом кінцевих елементів крайової задачі, описуваної еліптичними диференціальними рівняннями в часткових похідних, в програмному пакеті ELCUT.

Библ. 8, илл. 3

УДК 669.013.002.5:531.3

Бейгул О. А., Корнийчук Н.Н., Лепетова А. Л. **Системное формирование динамических нагрузок на несущую конструкцию сочлененного контейнеровоза с U-образной рамой** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.12 - 17.

Разработана системная математическая модель формирования динамических нагрузок на несущую конструкцию сочлененного контейнеровоза с U-образной рамой.

Библ. 7, илл. 1.

УДК 620

Белозёров В.Е., Мищенко О.С. **О гомоклинических орбитах двумерных автономных квадратичных динамических систем** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.18 - 24.

Одной из причин возникновения хаоса в трехмерных динамических системах является существование в этих системах гомоклинических орбит. Очевидно, что присутствие гомоклинической траектории в трехмерной системе гарантирует, что будет существовать та же орбита в любой проекции этой системы на любую координатную плоскость. В связи с этим, в статье рассматриваются достаточные условия существования гомоклинических орбит в двумерных квадратичных системах. В будущем эти условия будут использоваться для поиска гомоклинических орбит в трехмерных квадратичных системах.

Библ. 6, илл. 1, табл. 0.

УДК 681.128+681.518.22

Мазуренко В.Б. **Модель процесу вимірювання рівня рідкого палива в умовах хитавиці** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.25 - 36.

Проведено побудову дискретної математичної моделі процесу вимірювання рівня рідкого палива в баках ракети при проведенні дозування в умовах наявності періодичних збурень, що виникають внаслідок гойдання стартової платформи з встановленою на ній ракетною-носієм під впливом морських хвиль.

Бібл. 4, іл. 3.

УДК 621.01621.833:24:539.3

Журавльов В.М., Едінович А.Б., Папчєнков О.В. **Математична модель експлуатаційної кінематометрії зубчастих передач газотурбінних двигунів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.37 - 46.

Вирішено завдання експлуатаційної кінематометрії зубчастих передач газотурбінних двигунів. Розроблена і апробована математична модель, параметри якої чутливі до значення лінійної деформації кожного зуба шестерні і швидкості переміщення матеріалу зуба в процесі деформації. Результати експериментальних досліджень дозволяють прогнозувати адекватність математичної моделі не гірше 0,9.

Бібл. 5.

УДК 004.738.52

Волковський О.С., Ковилін Є.Р. **Семантичний аналіз вмісту web-додатків** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.47 - 54.

Розглянуто систему семантичного аналізу текстових даних (без опори на знання), яка дозволяє квазіреферувати web-сторінки. Отримані результати можуть бути застосовані для скорочення часу пошуку та аналізу даних в мережі інтернет.

Бібл. 5, іл. 1, табл. 1.

УДК 004.942

Мороз Б.И., Дьяченко А.А. **Разработка автоматизированной системы таможенного контроля на морском транспорте** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.55 - 64.

Аннотация. В данной статье рассмотрены проблемы разработки и внедрения автоматизированной системы таможенного контроля на морском транспорте. Проанализированы характерные особенности сложных, многоуровневых систем, к которым можно отнести таможенный контроль. На основе проведенного исследования авторами предлагается создать автоматизированную, модульную, адаптивную систему контроля на основе перспективных и эффективных информационных технологий.

Бібл. 6, іл. 1.

УДК.621.39

Гнатушенко В.В. **Моделирование агрегированного трафика передачи данных на основе модели ON/OFF** / В.В. Гнатушенко// Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.65 - 72.

Рассмотрен подход к разработке модели агрегированного трафика, который порожден несколькими источниками с последовательностью ON / OFF интервалов, и проведен анализ его статистических характеристик.

Бібл.7, ил. 5.

УДК 004.056.53:656.078

Лакно В.А. **Модели, методы и информационные технологии защиты корпоративных систем транспорта на основе интеллектуального распознавания угроз** // Сис-

темные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.73 - 83.

Разработан метод интеллектуального распознавания угроз на основе дискретных процедур с использованием аппарата логических функций и нечетких множеств, позволяет повысить эффективность распознавания угроз информационной безопасности на транспорте.

Библ. 5, ил. 9.

УДК 519.87:531.4

Добров І.В., Гаркаві Н.Я., Федоров Є.Ф., Карпенко В.В., Клименко І.В., Литвиненко О.Н. **До питання про використання моделей-асоціацій** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.84 - 90.

На моделях-асоціаціях досліджуються ефекти, пов'язані з наявністю в системі сухого тертя. Знайдено траєкторію тіла, що рухається по похилій площині з початковою швидкістю, спрямованою поперек площини. Задача узагальнена на замет задніх коліс автомобіля в кривій при юзі. Показано, що в двохмасовій коливальній системі із сухим тертям можуть бути зафіксовані три «власні» частоти. Пояснено, чому при «скиданні з клинів» рухомого складу деякими датчиками можуть фіксуватися «зайві» резонансні частоти.

Бібл. 7, іл. 8.

УДК 519.24.681

Малайчук В.П., Деревянко І.І. **Обработка спотворенних модулюючою перешкодою вимірювань в задачі оцінки інформативних параметрів об'єктів контролю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.91 - 100.

У завданнях неруйнівного контролю, зокрема при використанні ультразвукових методів, мають місце випадкові зміни сигналів за рахунок неконтрольованого контакту між перетворювачем і поверхнею контрольованого об'єкта. Розглянуті різні методи зменшення впливу такої модулюючої перешкоди з невідомими статистичними закономірностями на оцінки невідомого параметра, спотвореного шумом. Для візуального аналізу представлені гістограми оцінок параметру, що вимірюється різними методами, і їх статистичні характеристики, отримані шляхом проведення обчислювальних експериментів.

Бібл. 3, іл. 4, табл. 4

УДК 681.5.015.24

Дорофєєв Ю. І. **Робастне децентралізоване керування запасами в мережах поставок: підхід на основі стабілізації підсистем** / Ю. І. Дорофєєв // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.101 - 113.

Розглядається задача синтезу робастної децентралізованої стратегії керування запасами в мережах поставок в умовах невідомого, але обмеженого зовнішнього попиту і транспортних запізнювань, а також наявності асиметричних структурних обмежень на значення станів та керуючих дій. Децентралізоване керування будується у вигляді

лінійного нестационарного зворотного зв'язку по відхиленню поточного рівня запасів від обраного страхового рівня і засновано на вирішенні задач опуклою оптимізацією, розмірність яких визначається розмірністю підсистем. Умови розв'язуваності задачі синтезу сформульовані у вигляді системи лінійних матричних нерівностей і зводяться до вирішення задач напіввизначеного програмування і одновимірної опуклою оптимізацією. Для аналізу стійкості керованої мережі поставок з децентралізованими регуляторами застосовується метод порівняння і математичний апарат векторних функцій Ляпунова.

Бібл. 15.

УДК 621.74.002.6:669.131.7

Хитько О.Ю., Іванова Л.Х., Хитько М.О., Шапран Л.О. **Системний підхід до удосконалення конструкції роликів МБЛЗ** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.114 - 122.

В роботі показано, що товщина зовнішнього робочого шару біметалевого ролика з високолегованої сталі може бути зменшена на 20 мм за загальної товщини стінки бочки ролика 75-90 мм, що дозволяє удосконалити технологію його виготовлення.

Бібл. 4.

УДК 669.02/09:519.28

Ясев А.Г. **Система математического моделирования механического разделения неоднородных конструкций** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.123 - 132.

Описано использование системы математического моделирования (которая включает математическое моделирование, разработку конструктивно-технологических предложений, оптимизацию параметров) при исследовании механического разделения неоднородных конструкций на примере электрических аккумуляторов.

Библ. 11.

УДК 514.18

Гнатушенко В.В. **Геометрическое трансформирование и привязка фотограмметрических изображений проекционной природы** / В.В. Гнатушенко, С.Ю. Серeda // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.133 - 139.

В работе рассматривается технология геометрической обработки и привязки сканерных стереоснимков высокого пространственного разрешения, которая позволяет в дальнейшем получать цифровые модели рельефа на большие территории. Приведена информация о структуре и использования программного комплекса стереообработки, а также иллюстрации, поясняющие особенности и элементы рассматриваемой технологии на примере обработки стереоизображений, полученных от космического аппарата «Ikonos».

Библ. 7, ил. 5

УДК 621.1.016.4

Ерёмин А.О. **Определение теплофизических свойств газов в задаче математического моделирования нагревательной печи с регенераторами** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.140 - 147.

Достоверность моделирования тепловой работы печных агрегатов зависит от правильности определения теплофизических свойств газов и их смесей. В работе приведена методика расчёта вязкости, теплоёмкости, коэффициента диффузии и теплопроводности печных газов применительно к математической модели нагревательной печи с регенераторами.

Библ. 5.

УДК 004.925.83

Альрабаба Хамза **Формальное описание и правила работы неуправляемых и управляемых клеточных тетраавтоматов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.148 - 156.

Сформулировано определение клеточных тетраавтоматов как одного из видов постбинарных клеточных автоматов. Предложено использование неуправляемых и управляемых клеточных тетраавтоматов для совершенствования алгоритмической базы клеточных автоматов. Даны их формальные описания. Рассмотрен способ задания начальных значений клеточных тетраавтоматов, дающий наглядное представление о преимуществах двух дополнительных состояний тетракода (множественности M и неопределенности A) для задания исходных значений КА. Выполнены количественные оценки параметров распределения множества точек в пространстве клеточного автомата, заданные тетракодами. Показано возможность эффективного использования тетралогии и тетракодов дальнейшего развития теории и практики КА.

Бібл. 10.

УДК 543.062:669.16

Миронова Т.М. **Застосування кількісного аналізу для дослідження впливу модифікування на первинну структуру доевтектичних білих чавунів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.157 - 162.

Статья посвящена исследованию влияния модифікування на структурні параметри білих чавунів, що мають підвищену пластичність. Вивчено вплив модифікаторів (азота, ітрію, кальцію, цирконію, титана) на розмір перерізу гілок дендритів первинного аустеніту (карбідного зерна) за допомогою розробленої методики кількісного мікроструктурного аналізу. Встановлено, що модифікування азотом, цирконієм та ітрієм сприяє підвищенню пластичності ледебуритного чавуну за рахунок збільшення кількості ванадевокарбідної евтектики та зменшення розмірів карбідного зерна.

Бібл. 3, рис. 4, табл. 2.

УДК 621.719.048.4

Володько Є.Г., Тутик В.А. **Планування активного експерименту для прогнозування шорсткості при електролітно-плазмовому поліруванні** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.163 - 169.

У статті розглянуто метод активного експерименту за планом Бокса-Бенкіна. За результатами експерименту побудована математична модель процесу, виведені закономірності взаємозв'язку шуканого параметра - шорсткості з факторами (напруга, час обробки і щільність струму), що впливають на хід процесу електролітно-плазмової обробки.

Бібл. 5.

УДК 669.141.241:015.4:51-74

Надточий А.А., Сокур Ю.И., Камкина Л.В., Безшкуренко А.Г. **Математические модели серопоглатительной способности шлаков при внепечной обработке стали** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.170 - 177.

Произведена оценка серопоглотительной способности шлаков для внепечной обработки стали по различным модельным представлениям. Оценка рафинирующих свойств сталеплавильных шлаков, выбор рационального состава рекомендуется осуществлять на основе картирования поверхности значений серы.

Библ. 8, илл. 5,

УДК 519. 8

Белозёров В.Е., Журавлёв В.Н., Зайцев В.Г., Останин П.Е. **Исследование фазовых процессов газотурбинного двигателя методами рекуррентного анализа** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.178 - 187.

Проведены исследования динамики влияния энергии фазовых процессов рабочего тела камеры сгорания газотурбинного двигателя методами рекуррентного анализа. Экспериментально определены параметры бифуркационных точек и диапазоны периодичности.

Библ.8.

УДК 519.2:004.7

Кіріченко Л.О. **Про один метод маршрутизації фрактального трафіка** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (94). - Днепропетровск, 2014. - с.188 - 194.

Запропоновано метод оцінки вартості маршрутизації, що враховує фрактальні властивості мережуєго трафіку, на підставі яких перераховується вартість маршрутів і вибирається оптимальний шлях. Імітаційне моделювання показало, що використання розробленого методу значно підвищує якість обслуговування і зменшує втрати при передачі фрактального трафіка.

Бібл.11 , рис.3.

UDC 681.88.4

Mikhajlovsky N.V., Beitsun S.V., Djomin S.I. **The research on ELCUT-model of thermal state of ladle lining at the melt outlet** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.3 - 11.

Change of temperature field by gradually lining the ladle molten steel obtained by solving the finite element method boundary value problem, which are described by elliptic partial differential equations, in the software package ELCUT.

Bibl. 8, pic. 3.

UDC 669.013.002.5:531.3

Beygul O. A., Korniyuchuk N.N., Lepetova A. L. **The System Forming of Dynamic Loads on Articulated Container Truck with U-Similar Frame Supporting Structure** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.12 - 17.

The system mathematical model of dynamic loads forming on articulated container truck with U-similar frame supporting structure has been worked out.

Bibl. 7, ill. 1.

UDC 620

Belozyorov V.Ye., Myshchenko O.S. **On homoclinic orbits of 2d autonomous quadratic dynamic systems** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.18 - 24.

One of reasons of appearance of chaos in 3D dynamic systems is an existence in these systems of homoclinic orbits. It is clear that the presence of the homoclinic orbit in 3D system guarantees that same orbit will exist in any projection of this system on any coordinate plane. In this connection the sufficient conditions of existence of homoclinic orbits in 2D quadratic systems are explored in this article. In future these conditions will be used for the search of homoclinic orbits in 3D quadratic systems.

Ref. 6, fig. 1, Tab. 0.

UDC 681.128+681.518.22

Mazurenko V.B. **A model of liquid fuel level measuring process going on under conditions of swing** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.25 - 36.

A discrete mathematical model of liquid fuel level measuring process going on during rocket tanks loading under conditions of periodic disturbance that are a consequence of swing of a launch platform with a launch vehicle installed on it due to influence of sea waves have been developed.

Ref. 4, fig. 3.

UDC 621.01621.833:24:539.3

Zhuravlev V.N., Yedjnovich A.B., Papchenkov A.V. **Analysis of mathematical model of operating kinematics error of gearing of turbo-engines** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.37 - 46.

The task of operating kinematics error of gearing of turbo-engines is decided. A mathematical model the parameters of that are sensible to the size of linear deformation of tooth

and speed of tooth material in the process of flowage is worked out and approved. The results of experimental researches allow to forecast adequacy of mathematical model not worse 0,9.

Ref. 5.

UDC 004.738.52

Volkovskiy O.S., Kovylin E.R. **Semantic analysis of content of web-applications** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.47 - 54.

There was considered the system of semantic analysis of text data (without grounding on knowledge) which allows to make quazi-summaries of web-pages. Obtained results can be applied for reduction of the time for searching and analysis of data in Internet network.

Lib 5, fig. 1.

UDC 004.942

Moroz B.I., Dyachenko A.A. **Development of an automated system of customs control in maritime transport** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.55 - 64.

This article describes the problems of development and implementation of an automated system of customs control in maritime transport. It was analyzed the characteristics of complex, multilevel module systems, which can be included to customs control. According to the research the authors propose to create an automated, modular, adaptive control system based on advanced and efficient information technology.

Lib 6, fig. 1.

UDK 621.39

Gnatushenko V.V. **Modeling of aggregated data traffic model-based ON/OFF** / V.V. Gnatushenko // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.65 - 72.

A simulation model of the data on the source of self-similar traffic impact studies and shape parameter of Pareto distribution.

Bibl. 7, ill. 5.

UDK 004.056.53:656.078

Lakhno V.A. **Models, methods and information technologies to protect corporate transportation systems based on intelligent identification of threats** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.73 - 83.

A method for intelligent recognition of threats based on the discrete procedures using the apparatus of logic functions and fuzzy sets to enhance the recognition of threats to information security in transport.

Bibl. 5, silt. 9.

UDK 519.87:531.4

Dobrov I.V., Garkavie N.Ja., Fedorov E.F., Karpenko V.V., Klimenko I.V., Litvinenko O.N. **To the question about using the models-assotiations** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.84 - 90.

With the help of the models-associations there are researched effects which are connected with the presence in the system the dry friction. There is founded the path of the body which move on inclined plane with the initial velocity which is directed across the plane. The problem is generalised to the snowdrift of the car's back wheels during the car is running in the curve with the slippage. It is shown that in the oscillatory system of two masses with dry friction three "own" frequencies can to be fixed. It is explained why some sensors can to fix the "spare" resonance frequencies after "throwing from wedges" of the rolling stock.

Bibl. 7, il. 8.

UDC 519.24.681

Malaychuk V.P., Derevianko I.I **Processing of distorted modulation noise measurements in the problem of assessment of informative parameters of units** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.91 - 100.

In the problems of non-destructive testing, particularly when using the ultrasonic methods, there are random changes in signal due to uncontrolled contact between the transducer and the surface of the object under control. Various methods of reducing the impact of such modulation noise with unknown statistical laws to assessment of the unknown parameter, were examined. For visual analysis are presented histogram parameter's assessment as measured by various methods, and their statistical characteristics, obtained through computational experiments.

Bibl. 3, ill.4, tabl. 4

UDK 681.5.015.24

Dorofieiev Yu. I. **Subsystem stabilization approach to robust decentralized inventory control in supply networks** / Yu. I. Dorofieiev // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.101 - 113.

A problem of the robust decentralized inventory control strategy synthesis for supply networks under uncertain but bounded external demand and transport time-delays and with presence of asymmetric structural constraints on states and controls is considered. Decentralized control is designed in the form of linear non-stationary feedback with respect to deviation of the current stock level from the chosen safety level and is based on solving convex optimization problems of subsystems' size. Solvability conditions of the synthesis problem are stated in the form of linear matrix inequalities and reduced to solving semidefinite programming and one-dimensional convex optimization problems. To analyze the stability of the controlled supply network with decentralized controllers the comparison method and mathematical tool of vector Lyapunov functions is used.

Refer. 15.

UDK 621.74.002.6:669.131.7

Hitko A.Yu., Ivanova L.H., Hitko M.A., Shapran L.A. **System approach for the improve of construction of the rollers for MCCB** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.114 - 122.

It is shown that the thickness of the outer layer of the working of bimetallic roller from alloy steel can be reduced by 20 mm in total thickness of the wall of the drum roller 75-90 mm, which the technology of roller production allows to improve.

Bibl. 4.

UDK 669.02/09:519.28

Yasev A.G. **System of mathematical modeling of mechanical division of heterogeneous constructions** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.123 - 132.

Use of system of mathematical modeling (which includes mathematical modeling, development of constructive-technological offers, optimization of parameters) during the research of mechanical division of heterogeneous constructions into an example of accumulators is described

Bibl. 11.

UDC 514.18

Hnatushenko V.V. **Geometric transformation and binding photogrammetric projection images** / V. Hnatushenko, S. Sereda // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.133 - 139.

This paper considers the technology geometric processing and binding scanner stereoscopic high spatial resolution, which allows you to continue to receive digital elevation models over large areas. Information about the structure and use of stereo processing software package, as well as illustrations explaining the features and elements of the technology in question on the example of the processing of stereo images obtained from the satellite «Ikonos».

Bibl. 7, ill. 5.

UDC 621.1.016.4

Yeromin O.O. **Determination of the thermophysical properties of gases while solving the task of mathematical modelling of a reheating furnace with regenerators** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.140 - 147.

The reliability of the furnace units thermal operation modelling depends on the validity of determining the thermophysical properties of gases and their mixes. The work illustrates a methodology for calculating the viscosity, heat capacity, coefficient of diffusion and thermal conductivity of furnace gases applicable for a mathematical model of a reheating furnace with regenerators.

Bibl. 5.

UDC 543.062:669.16

Myronova T.M. **The application of quantitative analysis to research the effect of modifying the primary structure of the hypoeutectic white cast iron** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.157 - 162.

The article investigates the effect of the modification on the structural parameters of the white cast iron with high ductility. The effect of modifiers (nitrogen, yttrium, calcium, zirconium, titanium) on the cross-sectional size of austenite branches (carbide grains) was studied using the method developed by quantitative analysis of the microarray. The modification of nitrogen, zirconium and yttrium gives an increase ductility of ledeburitic iron, because it increases the amount of vanadium carbide's eutectic and reduces the size of the "carbide grains".

Bibl. 4, Fig. 5, Tabl. 4.

UDC 621.719.048.4

Volodko E.G., Tutyk V.A. **Planning for active experiment to predict roughness during electrolytic-plasma polishing** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.163 - 169.

The article describes the method of active experimental plan Box-Benkin. According to the experimental results, a mathematical model of the process, patterns of relationships derived parameter of interest - above-rohovatosti factors (voltage, processing time and current density) that affect the progress of the electrolytic-plasma treatment.

Bibl. 5.

UDC 669.141.241:015.4:51-74

Nadtochy A.A., Sokurov Y.I., Kamkina L.V., Bezshkurenko A.G. **Mathematical models seropoglatitelnoy ability slag at vnipechnoy steel processing** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.170 - 177.

UDC 519. 8

Belozyorov V.E., Zhuravlev V.N., Zaitsev V.G., Ostanin P.E. **The study phase processes turbine engine recurrence analysis methods** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.178 - 187.

UDC 519.2:004.7

Kirichenko L.O. **About one routing method of fractal traffic** // System technologies. N 5(94) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.188 - 194.

The estimation method of the routing cost that takes into account the fractal properties of network traffic is proposed. The cost of route is recalculated on the fractal characteristics, and then the optimal path is chosen. Simulation modeling has shown that the use of this method greatly improves the quality of service and reduces transmission losses of fractal traffic.

Bibl.11, fig.3.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Михайловский Николай Владимирович - доцент кафедры автоматизации производственных процессов НМетАУ, к.т.н.

Бейцун Сергей Викторович - доцент кафедры автоматизации производственных процессов НМетАУ, к.т.н.

Дёмин Сергей Игоревич - студент группы АВ01-09-1 НМетАУ.

Бейгул Олег Олексійович - Дніпродзержинський державний технічний університет, завідувач кафедри металургійного обладнання, доктор техн. наук, професор.

Корнійчук Микола Миколайович - Дніпродзержинський державний технічний університет, асистент кафедри металургійного обладнання.

Лепетова Ганна Леонідівна - Дніпродзержинський державний технічний університет, канд. техн. наук, доцент.

Білозьоров В.Є. -

Мищенко О.С. -

Мазуренко Валерий Борисович - Государственное предприятие «Конструкторское бюро „Южное“ имени М. К. Янгеля», начальник отдела.

Журавлев Владимир Николаевич - д-р тех. наук, нач. сектора анализа сигналов ГТД ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Единович Андрей Борисович - ведущий конструктор отдела зубчатых передач ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Папчёнков Александр Викторович - зам. технического директора по новым изделиям ОАО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

Волковський Олег Степанович - доцент кафедри АСОІ факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем. Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.

Ковилін Єгор Романович - студент магістратури кафедри АСОІ факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем. Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.

Мороз Борис Іванович - д.т.н., професор, декан факультету інформаційних та транспортних систем і технологій, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Академії митної служби України.

Дяченко Олександр Олександрович - аспірант Академії митної служби України.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна - к.т.н., доцент, докторант кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України.

Ляхно Валерій Анатолійович - к.т.н., доцент кафедри КІТ Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Добров Игорь Вячеславович - Национальная металлургическая академия (г.Днепропетровск), зав. кафедрой, д.т.н., профессор.

Гаркави Наум Яковлевич - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна (ДНУЖТ), старший научный сотрудник.

Федоров Евгений Федорович - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна (ДНУЖТ), зав. лаб.

Карпенко Владимир Владимирович - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна (ДНУЖТ), старший научный сотрудник.

Клименко Ирина Владимировна - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В.Лазаряна (ДНУЖТ), к.т.н., доц.

Литвиненко Ольга Наумовна - Інформаційно-статистичний центр (ІСЦ) ДП Придніпровська залізниця, инженер-программист.

Малайчук Валентин Павлович - заведующий кафедрой РЭА, физико-технический факультет, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

Деревянко Игорь Игоревич - аспирант кафедры РЭА, физико-технический факультет, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

Дорофеев Юрий Иванович – к.т.н., доц. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

Хитко Александр Юрьевич – к.т.н., доц., доцент кафедры литейного производства НМетАУ.

Иванова Людмила Харитоновна – д.т.н., проф., профессор кафедры литейного производства НМетАУ.

Хитко Михаил Александрович - учащийся СШ № 23 г. Днепропетровска.

Шапран Людмила Александровна – к.т.н., доц., доцент кафедры литейного производства НМетАУ.

Ясев Александр Георгиевич – профессор кафедры прикладной математики и вычислительной техники Национальной металлургической академии Украины, к.т.н.

Гнатушенко Володимир Володимирович — д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

Середа Світлана Юріївна – асистент кафедри нарисної геометрії та графіки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, Україна.

Ерёмин А.О. – д.т.н., доц., Национальная металлургическая академия Украины.

Альрабаба Хамза - Донецький національний технічний університет, аспірант.

Миронова Татьяна Михайловна – д.т.н., профессор кафедры материаловедения им. Ю.Н.Тарана-Жовнира Национальной металлургической академии Украины.

Володько Е.Г. - аспирант кафедры технологии машиностроения Национальной металлургической академии Украины.

Тутык В.А. - д.т.н., профессор, профессор кафедры физики Национальной металлургической академии Украины.

Надточий Анжела Анатольевна – к.т.н., доц. каф. ТМПиОХ, НМетАУ.

Сокур Юлия Ивановна – ассистент каф. ТМП и ОХ, НМетАУ.

Камкина Людмила Владимировна – д.т.н., декан металлургического факультета, проф. каф. ТМПиОХ, НМетАУ.

Безшкуренко Алексей Георгиевич - ассистент каф. ТМПиОХ, НМетАУ.

Кириченко Людмила Олеговна – д.т.н., профессор кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоэлектроники.