

УДК 004.451.45

**Ю.А. Иванов** (канд. тех. наук., доц.),

**А.И. Первусяк** (магистр)

Донецкий национальный технический университет

aleksey\_pervusyak@mail.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗНОИНЕРЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ТОКОПРИЕМНИКА ЛОКОМОТИВА НА МНОГОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЕ**

В рамках данной статьи проведено исследование взаимодействия токоприемника локомотива и контактной сети. Целью работы является создание эффективного инструмента модельной поддержки для исследования существующих и проектируемых средств подвижного состава железных дорог. Рассмотрена модель сложной динамической системы колебательного движения при перемещении токоприемника локомотива. Обоснована и выполнена ее дискретизация для многоядерной системы. Разработана разноинерционная модель движения токоприемника локомотива и монитор ее выполнения на многоядерной системе. Рассмотрено влияние оптимизации доступа программ к памяти на эффективность моделирования. Для определения возможности оптимизации доступа к памяти проведено исследование разноинерционной модели с использованием паддинга.

**Ключевые слова:** Многоядерная система, разноинерционная модель, токоприемник, монитор выполнения, SMP-система

### ***Введение***

Темп развития технологий разработки и применения многоядерных процессоров поддерживает интерес к многопоточному программированию. В будущем ожидается сохранение тенденции увеличения числа ядер, и можно с уверенностью сказать, что с течением времени количество систем, построенных на базе многоядерных процессоров, будет расти [1].

В настоящее время продолжается расширение класса задач, в которых применяются мощные и дешевые многоядерные процессоры при цифровом моделировании и управлении сложными технологическими процессами.

Одной из ведущих проблем рельсового транспорта является надежность токосъема в широком диапазоне скоростей электроподвижного состава (ЭПС) [2]. Токоприемник ЭПС при движении по контактному проводу должен сохранять заданное по высоте положение между опорами и постоянное нажатие на провод. Различные типы конструкций подвешивания контактного провода имеют периодически

меняющуюся, эффективную податливость и при определенных скоростях движения могут стать причиной возбуждения параметрических автоколебаний [3].

В рамках данной статьи проведено исследование взаимодействия токоприемника локомотива и контактной сети. Целью работы является создание эффективного инструмента модельной поддержки для исследования существующих и проектируемых средств подвижного состава железных дорог.

### **Модель движения токоприемника локомотива**

Токоприемник можно представить в виде динамической модели с двумя степенями свободы [4]. В модели основные параметры приводятся к точке контакта и верхним шарнирам подвижных рам (рис. 1).

На основании расчетной схемы составлены дифференциальные уравнения колебаний системы «токоприемник – контактная подвеска» [4]:

$$\begin{cases} m_k * y_k'' + B_k * (y_k' - y_p') + F_k * \text{sign}(y_k' - y_p') + C_k * (y_k - y_p) - C_R * (y_c - y_k) = 0 \\ m_c * y_c'' + B_c * (y_c' - y_w') + F_c * \text{sign}(y_c' - y_w') + C_R * (y_c - y_k) - P_0 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $m_k$  – суммарная масса полоза и приведенной массы контактного провода;  $m_c$  – масса рамы токоприемника;  $B_k, C_k$  – демпфирование и жесткость подвешивания контактного провода;  $F_k$  – сила сухого трения в подвешивании контактного провода;  $B_c$  – демпфирование рамы токоприемника;  $F_c$  – сила сухого трения в подвешивании токоприемника;  $C_R$  – нелинейная характеристика связи «каретка токоприемника – полоз»;  $P_0$  – сила статического нажатия токоприемника;  $y_c$  – вертикальные перемещения контактного провода;  $y_p$  – вертикальные перемещения токоприемника;  $y_w$  – перемещение кузова электровоза под токоприемником.

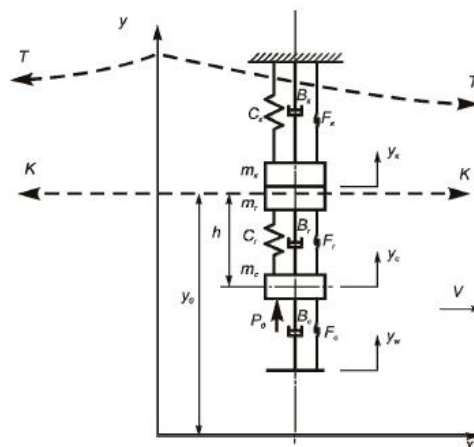


Рисунок 1 - Расчетная схема колебаний токоприемника

## **Разработка модели стандартными средствами в среде MATLAB**

На основании приведенных выше дифференциальных уравнений составлена модель взаимодействия токоприемника и контактной сети для системы MATLAB.

Для представления и визуализации модели в среде MATLAB были разработаны следующие логические блоки: исходные данные; возмущение со стороны подвески; неравноупругости подвески; возмущение со стороны электровоза; нелинейные функции, используемые в модели; начальные условия решения системы дифференциальных уравнений; решение системы дифференциальных уравнений; преобразование выходных данных; построение графиков результатов.

Рассмотрим блок «решение системы дифференциальных уравнений». Система дифференциальных уравнений 2-го порядка в разработанной модели решается стандартными средствами универсального пакета MATLAB, с помощью функции `ode23s`.

Результаты моделирования системы дифференциальных уравнений, описывающие взаимодействие токоприемника и контактной сети, представлены на рисунках 2, 3 и 4.

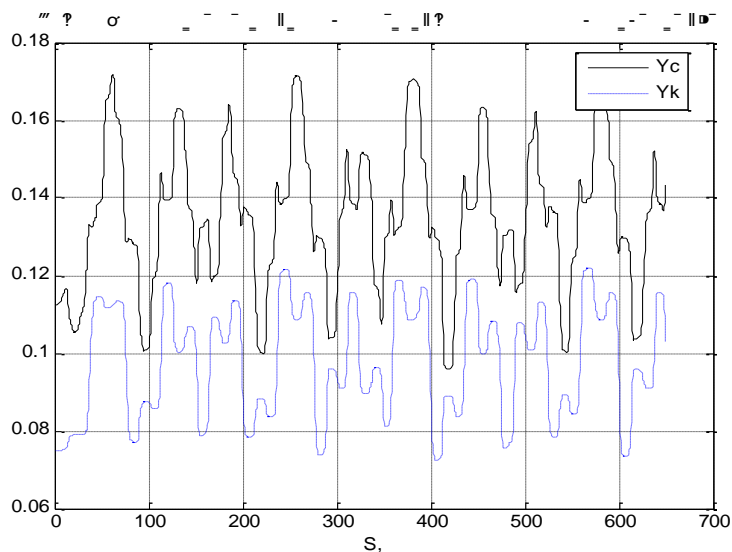


Рисунок 2 - Графики функций перемещения контактной подвески и токоприемника в зависимости от пути

Полученные результаты подтверждают совпадение проведенного моделирования с эталонным моделированием, проведенным РГУПС для системы Mathcad [4].

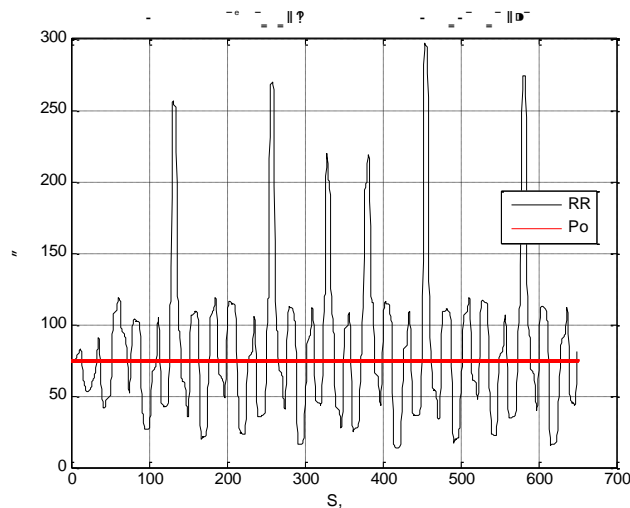


Рисунок 3 - График функции силы нажатия токоприемника в зависимости от пути

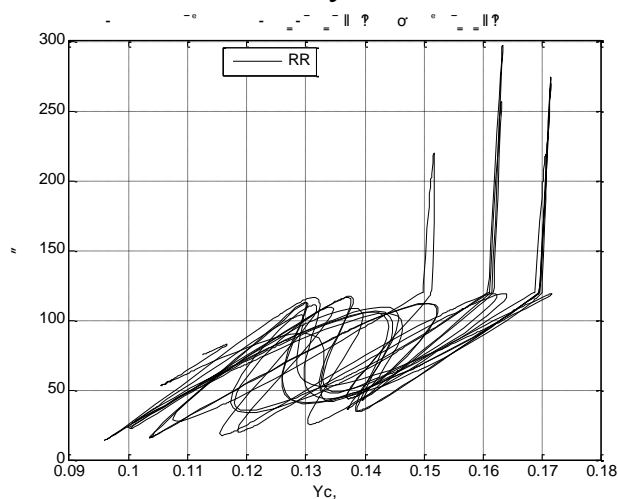


Рисунок 4 - График функции изменения силы нажатия в зависимости от перемещения токоприемника

### **Разработка разноинерционной модели для вычисления на многоядерной системе**

Рассмотрим дифференциальные уравнения колебаний системы «токоприемник – контактная подвеска» (1) [4] применительно к разноинерционной модели [5]. Для этого необходимо привести систему дифференциальных уравнений (1) к машинному виду для ее решения программными средствами языка программирования C++ с помощью численного метода. Для решения методом Эйлера необходимо понизить порядок системы дифференциальных уравнений и привести полученные уравнения к машинному виду. Приведем систему дифференциальных

уравнений, состоящую из исходных и дополнительных уравнений, к форме Коши:

$$\begin{cases} y'_k = x_k \\ x'_k = -\frac{1}{m_k} * (B_k * (x_k - y'_p) + F_k * \text{sign}(x_k - y'_p) + C_k * (y_k - y_p) - C_R * (y_c - y_k)) \\ y'_c = x_c \\ x'_c = -\frac{1}{m_c} * (B_c * (x_c - y'_w) + F_c * \text{sign}(x_c - y'_w) + C_R * (y_c - y_k) - P_0) \end{cases} \quad (2)$$

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений (2) необходимо вычисление вспомогательных функций (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), представленных ниже.

$$y_p(t) = \frac{Ap1}{2} * (|\sin(wp * t) - \delta p| + |\sin(wp * t) + \delta p| - 2 * \delta p) + Ap2 * |\sin(Np * wp * t)|; \quad (3)$$

$$y'_p(t) = Ap1 * wp * (\text{sign}(\sin(wp * t - \delta p)) * \cos(wp * t) + \text{sign}(\sin(wp * t + \delta p)) * \dots * \cos(wp * t)) + Ap2 * Np * wp * \text{sign}(\sin(Np * wp * t)) * \cos(Np * wp * t); \quad (4)$$

$$C_k = C_k * [1 - \frac{Kp1}{2} * (|\sin(wp * t) - \delta p| + |\sin(wp * t) + \delta p| - 2 * \delta p) - Kp2 * \dots * |\sin(Np * wp * t)|]; \quad (5)$$

$$\text{sign}(y) = \frac{y}{\sqrt{y^2 + \epsilon^2}} \quad (6)$$

$$C_R(x) = \frac{Cr1}{2} * (\text{sign}(x) + 1) * (x) + \frac{Cr2}{2} * (\text{sign}(x - xr0) + 1) * (x - xr0); \quad (7)$$

$$y_w = Aw * \sin(\omega w * t); \quad (8)$$

$$y'_w = Aw * \omega w * \cos(\omega w * t); \quad (9)$$

$$RR = \frac{Cr1}{2} * (\text{sign}(Yc - Yk) + 1) * (Yc - Yk) + \frac{Cr2}{2} * (\text{sign}((Yc - Yk) - -xr0) + 1) * \dots * ((Yc - Yk) - xr0). \quad (10)$$

Следующим этапом при разработке разноинерционной модели динамической системы токоприемника является анализ обеспечения информационного взаимодействия между ядрами процессора, то есть рассмотрение организации кэш-памяти. Поскольку быстродействие ядер процессора значительно превосходит быстродействие памяти, дополнительный учет системных ресурсов имеет важное значение для реализации многопоточных приложений. Это необходимо, когда алгоритм приложения переходит от выполнения операций в кэше к выполнению операций в основной памяти многоядерного компьютера.

В качестве аппаратной платформы для исследования сложной динамической системы используется 4-х ядерный процессор Intel 3770K, имеющий трехуровневую кэш-память: 4x32 Кб кэш-памяти первого уровня, 4x256 Кб, объём кэш-памяти L2, объём кэша L3 в этом процессоре составляет 8 Мбайт. Если L1 и L2 разделяются на каждое ядро, то третий уровень является общим для всего процессора.

В работе предложено выполнить разделение решения представленных выше дифференциальных уравнений на подзадачи между четырьмя ядрами с учетом информационного взаимодействия между ядрами через кэш-память 3-го уровня и оперативную память для многоядерного процессора, как представлено на Рис. 5.

Достоинством такого распределения подзадач является возможность вычисления фазовых переменных (2) на разных ядрах процессора. Таким образом, расчет дифференциальных уравнений, в том числе систем, описывающих движение контактной подвески и токоприемника, могут быть выполнены с различным шагом. Такой подход учитывает физические особенности протекающих процессов и дает возможность соответствующим образом уменьшить количество вычислений и повысить эффективность решения задачи моделирования.

На основании физического описания задачи [4], в работе была определена необходимость рассчитывать выходные параметры 2-го потока ( $x_k(t); y_k(t); RR(t)$ ) по методу Эйлера с шагом 0.0008, а выходные параметры 4-го потока ( $x_c(t); y_c(t)$ ) – с шагом в два раза большим (т.е. в два раза медленнее). Таким образом, реализовано параллельное решение системы дифференциальных уравнений численным методом Эйлера, не нарушая требования цикличности поступления и обработки потоков.

Адекватность разработанной разноинерционной модели и монитора выполнения системы подтверждается совпадением графиков, полученных после выполнения разноинерционной модели, с графиками, полученными моделированием взаимодействия токоприемника и контактной сети стандартными средствами MATLAB (рис.2-4).

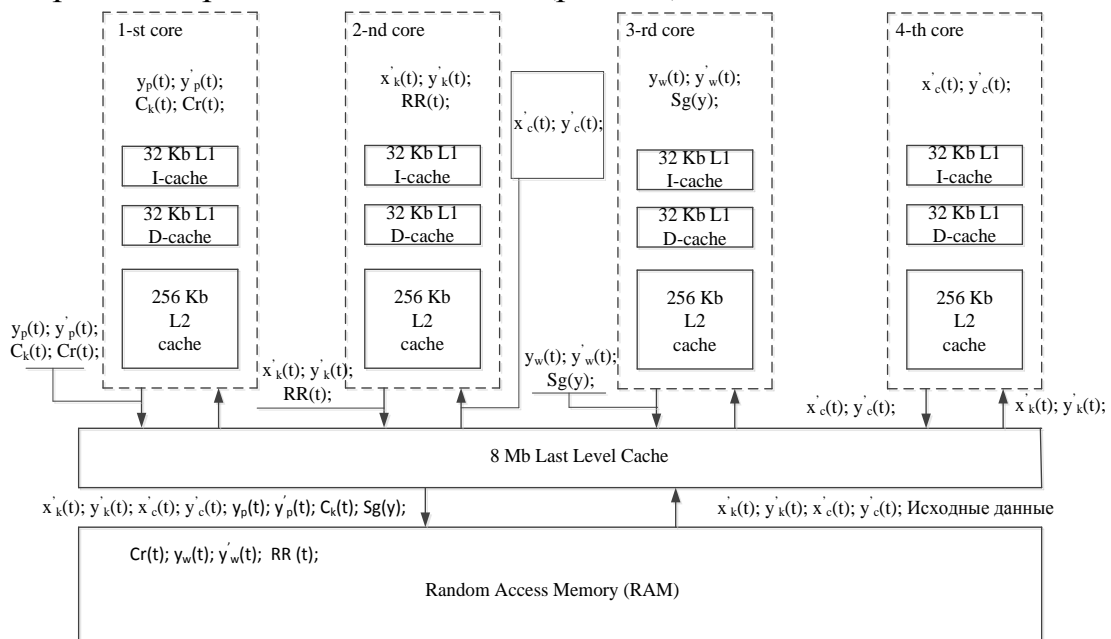


Рисунок 5 - Структурная схема разработанной разноинерционной модели

### ***Влияние оптимизации доступа программ к памяти в многоядерной системе на эффективность моделирования***

Недостатком реализации разработанной разноинерционной модели является параллельный общий доступ к одним и тем же переменным, а, следовательно, возможное возникновение конфликтов памяти (кэша). Когерентность кэша возникает при обмене переменными ( $x'_k(t)$ ;  $y'_k(t)$ ;  $RR(t)$ ;  $x'_c(t)$ ;  $y'_c(t)$ ) между 2-м и 4-м потоками. Когерентность определяет поведение чтений и записей в одно и то же место памяти. В рамках данной статьи рассматриваются условия когерентности: сохранение порядка выполнения программ и когерентной видимости памяти [6].

На выбранной многоядерной платформе Intel Core i7 3770K, используемой при исследовании разработанной разноинерционной модели, используется протокол MESI. В этих условиях предполагается, что операции чтения и записи происходят мгновенно. Однако этого не происходит на практике из-за задержек памяти и структурных особенностей архитектуры кэша. Изменения, сделанные ядром  $P_1$ , могут быть не видны ядру  $P_2$ , если чтение произошло через промежуток времени после записи, когда информация еще не была обновлена.

Для исследования эффективности использования кэш-памяти разработанной программы, а также устранения недостатков ее реализации, использовался профилировщик Intel VTune Amplifier XE 2013. Согласно результатам профилирования (summary) (рис. 6), можно сделать вывод, что разноинерционная модель, выполненная без паддинга, работает согласно структурной схеме и монитору выполнения SMP-системы. Количество циклов на инструкцию (CPI Time) разноинерционной модели (без паддинга) составляет 1.008, а время рабочего ожидания (Spin time) – 0,034 с. Согласно профилированию (Tasks and Frames), переключение потоков происходит равномерно, перегрузки процессора в 4-ом и 1-ом потоке минимальны.

Для определения возможности оптимизации доступа к памяти проведено исследование разноинерционной модели с использованием паддинга, т.е. переменные для решения системы дифференциальных уравнений ( $x'_k(t)$ ;  $y'_k(t)$ ;  $x'_c(t)$ ;  $y'_c(t)$ ), которыми обмениваются между собой 2-ой и 4-ый потоки, сделать равными длине строке кэша (64 байта). Результаты профилирования такой разновидности разноинерционной модели представлены на рисунке 7.

Согласно результатам профилирования (summary), можно сделать вывод, что разноинерционная модель, выполненная с паддингом, также работает согласно структурной схеме и монитору выполнения SMP-системы. Однако, количество циклов на инструкцию в разноинерционной модели (с паддингом) стало меньше на 0.953, также уменьшилось время

рабочего ожидания процессора – 0.027 с. Согласно профилированию (Tasks and Frames, рис. 7), переключение потоков также происходит равномерно, как и в случае без паддинга.

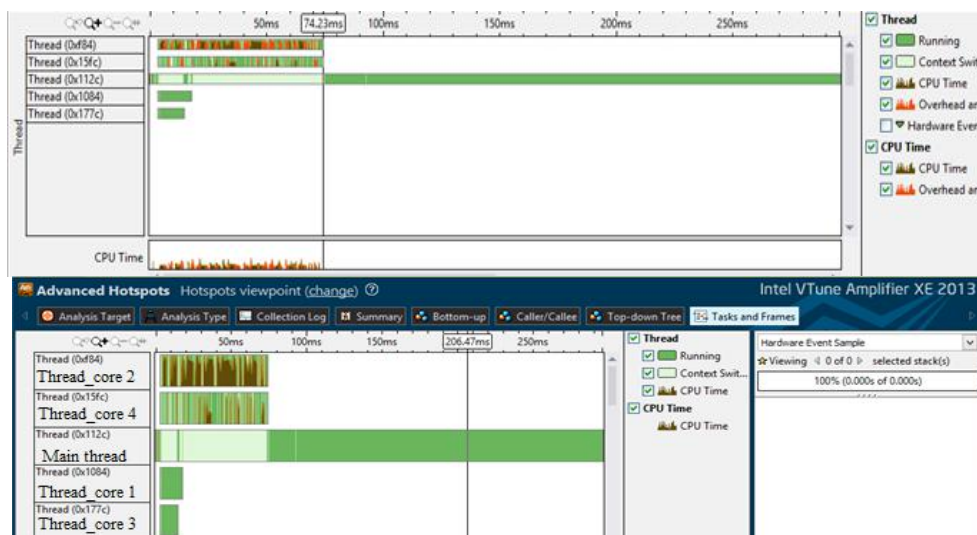


Рисунок 6 – Результаты профилирования разноинерционной модели (без паддинга)

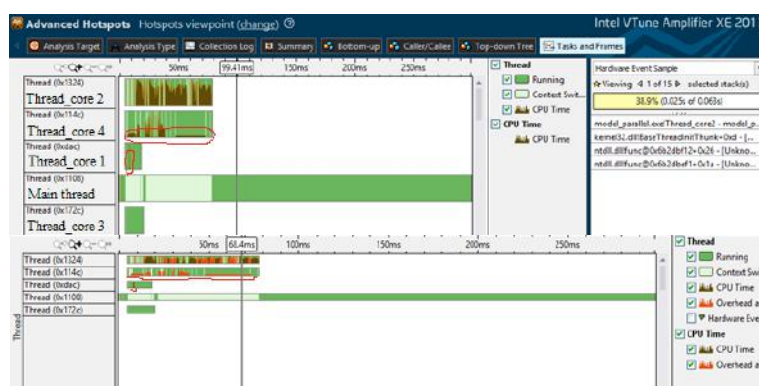


Рисунок 7 – Результаты профилирования разноинерционной модели (с паддингом)

Исходя из полученных результатов моделирования, можно сделать вывод, что оптимизация доступа программ к памяти в многоядерной системе повышает эффективность моделирования и зависит от представления модели и размещения ее потоков на ядрах процессора.

Анализ результатов профилирования различных вариантов разноинерционной динамической модели приводит к следующим рекомендациям по реализации обмена с памятью через кэш в модели:

- необходимо избегать конфликта кэш-линеек;



- оптимизация кэширования должна выполняться на уровне структур данных и алгоритмов их обработки;
- необходимо учитывать естественное выравнивание данных. Автоматические переменные (т. е. обыкновенные локальные переменные) независимо от своего размера большинством компиляторов выравниваются по адресам, кратным четырем;
- при разработке программы необходимо стремиться проектировать ее так, чтобы все интенсивно используемые циклы вмещались в кэш первого или, по крайней мере, второго уровня.

### **Выводы**

В работе разработана разноинерционная динамическая модель взаимодействия токоприемника и контактной сети локомотива для многоядерного процессора. Выполнено ее исследование на целевой платформе Windows 8, Intel i7 3770 К. При этом было достигнуто полное совпадение полученных результатов с выполненным исследованием модели в среде MATLAB. Распределение вычислительных потоков по ядрам дало возможность сократить требуемый объем вычислений задачи моделирования, что является критически важным в условиях циклического выполнения. Было исследовано влияние на быстродействие размещения данных задачи моделирования. Для исследуемой модели было показано, что оптимизация выравнивания в кэш-памяти увеличивает производительность более чем на 7%. В работе сформулированы рекомендации для достижения такого эффекта.

Таким образом, использование разноинерционного подхода к построению модели и учет особенностей многоядерного процессора позволяют повысить эффективность вычислений при промышленном применении модели при исследовании динамических свойств существующих и проектируемых ЭПС.

### **Список литературы**

1. Инструменты параллельного программирования в системах с общей памятью / [К.В. Корняков, В.Д. Кустикова, И.Б. Мееров, А.А. Сиднев, А.В. Сысоев, А.В. Шишков]; Лекц. мат. – Нижегородец: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2010. – 31 с.
2. Беляев И.А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети / И.А. Беляев, В.А. Вологин. – М.: Транспорт, 1983. – 191 с.

3. Андронов А.А., Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
4. Решение задач динамики железнодорожных экипажей в пакете Mathcad: учеб. пособие / В.Г. Рубан, А.М. Матва ; Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов н/Д, 2009. – 99 с. : ил. Библиогр. : 9 назв.
5. Иванов Ю. А. Оптимизация вычислительных процессов реального времени в системах полунатурного моделирования : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.05 „Компьютерные системы и компоненты” / Ю. А. Иванов. — Донецк, 2013. — 23 с.
6. Информационный портал: Википедия [Электронный ресурс] / Авторы сайта // Когерентность кэша – 2013 – с.4. – Режим доступа к порталу: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Когерентность\\_кэша](http://ru.wikipedia.org/wiki/Когерентность_кэша).
7. Сорока Т.Е. Обзор протоколов когерентности кэш-памяти / Т.Е. Сорока, Л. П. Фельдман, Т. В. Михайлова. – Інформаційні управляючі системи та комп'ютерний моніторинг Матеріали II всеукраїнської конференції студентів, аспірантів та молодих вчених – 11–13 квітня 2011р. Донецьк, ДонНТУ – 2011, с. 168–172

*Надійшла до редакції 20.10.2013 р. Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Святний*

**Ю.О. Иванов, О.І. Первусяк**

Донецький національний технічний університет

**Дослідження різноінерційної моделі руху струмоприймачів локомотива на багатоядерній системі.** У рамках даної статті проведено дослідження взаємодії струмоприймача локомотива та контактної мережі. Метою роботи є створення ефективного інструменту модельної підтримки для дослідження існуючих і проєктованих засобів рухомого складу залізниць. Розглянуто модель складної динамічної системи коливального руху при переміщенні струмоприймача локомотива. Обґрунтована та виконана її дискретизація для багатоядерної системи. Розроблена різноінерційна модель руху струмоприймача локомотива та монітор її виконання на багатоядерній системі. Розглянуто вплив оптимізації доступу програм до пам'яті на ефективність моделювання. Для визначення можливості оптимізації доступу до пам'яті проведено дослідження різноінерційної моделі з використанням падінга.

**Ключові слова:** Багатоядерна система, різноінерційна модель, струмоприймач, монітор виконання, SMP система

**Y.A. Ivanov, O.I. Pervusiak**

Donetsk National Technical University

**The research of inertial model movement pantograph of locomotive on multicore system.** In this article has been held the research of interaction locomotive pantograph and catenary. The purpose of this paper is a creation an effective tool for modeling support for the study of existing and planned facilities of railway rolling stock. In this article has been researched complex dynamic system based on multi-core computer, which allowed to analyse existing work conflicts with the total virtual memory, consider the characteristics of modern

architecture cache, and develop recommendations on the sharing of memory through cache and methods of distribution problems on flows, optimize performance of the developed model in the implementation of complex dynamic systems on multi-core SMP-platform. We also researched the model by standard tools of universal package MATLAB. Also, has been considered the effect of optimizing access to the program memory to the effectiveness of simulation. To determine the possibility of optimizing memory access investigated inertial model movement pantograph of locomotive on multicore system with using padding. As conclusions, in this article has been developed the inertial model of the interaction pantograph and catenary locomotive for the multi-core processor. Has been held her research on the target platform of Windows 8, Intel i7 3770 K. At the same time there was a full agreement of these results with the performed researching of the model in the environment MATLAB. Distribution of computing threads across multiple cores has been made possible to reduce the required amount of computation modeling problem, which is critical in terms of cyclic execution. Has been investigated the effect of distribution of data on the performance in modeling tasks. For created inertial model was shown that the alignment optimization in the cache memory increases performance by more than 7 %. Some recommendations to achieve this effect have been made in this article. Thus, the use of inertial approach to constructing models and to accounting features of multi-core processor has to improve the computational efficiency in the industrial application of the model in the study of the dynamic properties of existing and projected EPS.

**Keywords: Multicore system, inertial model, pantograph, monitor of implementation, SMP system**