

В.А. Залого, д-р техн. наук; Д.В. Криворучко, канд. техн. наук, Сумы, Украина,
М. Г. Сторчак, д-р техн. наук, Штутгарт, Германия

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РЕЗАНИЯ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

У статті аналізується ефективність використання технології високопродуктивних обчислень для підвищення продуктивності моделювання процесів різання матеріалів. З використанням розв'язувача LS-DYNA MPP показано, що для багаторозмірних моделей процесів різання зростають вимоги до швидкості обміну даними між вузлами. Використання більше 5 вузлів не дає суттєвого приросту продуктивності. Саме цьому SMP версії розрахунків за інших рівних умов все ще є більш продуктивними, ніж MPP версії.

В статье анализируется эффективность использования технологии высокопроизводительных вычислений для повышения производительности моделирования процессов резания материалов. С использованием решателя LS-DYNA MPP показано, что для моделей процессов резания большой размерности возрастают требования к скорости обмена данными между узлами. Использование больше 5 узлов не дает существенного прироста производительности. Именно этому SMP версии расчетов при прочих равных условиях все еще являются более производительными, чем MPP версии.

**V. A. ZALOGA, D. V. KRIVORUCHKO, M. G. STORCHAK
TECHNOLOGY OF HIGH-EFFICIENCY CALCULATIONS AS THE TOOL OF MODELLING
PRODUCTIVITY INCREASE OF CUTTING PROCESSES BY NUMERICAL METHODS**

In this paper efficiency of application of HPC for increase of productivity of machining operation modelling is analysed. With usage of LS-DYNA MPP solver it is shown that for machining operation models with large amount of DOF the requirements for data transfer rate between nodes have to be very high. Usage is more than 5 nodes does not give an essential gain of productivity. That is why SMP versions of solver are more productive, than MPP versions in the same conditions.

Интенсификация процессов механической обработки, в частности процессов резания (точения, фрезерования, сверления) требует значительных экспериментальных исследований. Наибольшая сложность заключается в том, что резание, особенно чистовое, процесс малоразмерный, происходящий в объемах менее 1 мм³, со скоростями часто более 1-10 м/с. В этих условиях наблюдать происходящие процессы практически невозможно, что заставляет ученых в области резания материалов изучать процессы резания по интегральным (силы резания, максимальная температура, размеры стружки и др.) и/или косвенным показателям (микротвердость стружки, характер износа и др.).

Моделирование раскрывает новые возможности для изучения и оптимизации процессов резания. Особенно большие преимущества дает применение конечно-разностных методов, таких как, например, метод конечных элементов. Эти идеи развиваются с 1973 года, когда впервые была представлена работа В. Е. Клямецки [1] по расчету напряженно-деформированного состояния в

зоне перед режущим лезвием. В настоящее время развитие метода конечных элементов достигло того уровня, когда он может быть применен для моделирования не только напряженно-деформированного состояния в системе резания в квазистатической постановке, но и прогнозирования во времени формы и размеров стружки, направления ее схода, остаточных напряжений и других показателей процесса, требующих рассмотрения процесса в течении протяженного периода времени. За последние 10 лет было опубликовано более 1000 работ на эту тему, описывающие модели различных процессов резания, достоверность которых подтверждена экспериментально. Вместе с тем, в большей части они касаются процессов точения в абсолютно жесткой технологической системе, т.е. процессов резания однолезвийным инструментом с одинаковой (близкой) скоростью резания вдоль режущей кромки. Специализированные программные продукты ThirdWave AdventEdge, Deform 3D, а также универсальные ABAQUS, LS-DYNA и другие позволяют на современных ПЭВМ решать исследовательские задачи с числом узлов КЭ до 10000 за приемлемое время счета (до 1 суток). Это обеспечивает решение не только исследовательских, но и реальных производственных задач, связанных с перебором большого количества вариантов в приемлемые для производства сроки.

Вместе с тем, инженерное применение рассмотренного метода исследований в настоящее существенно затруднено для значительно более сложных с вычислительной точки зрения задач: моделирования резания многолезвийным инструментом (например, фрезерование), в том числе и с переменной скоростью резания вдоль режущей кромки (например, сверление), моделирования стружкообразования с образованием несливной стружки (например, резание титановых сплавов, композиционных материалов), задач, связанных с прогнозированием показателей процесса резания в податливой технологической системе (например, моделирование взаимодействия станка и рабочего процесса). Количество узлов КЭ в этих задачах часто превышает 10^6 и количество взаимодействующих деформируемых тел 2 и больше, что увеличивает время решения и объем необходимой памяти во много раз (табл. 1).

Поэтому наряду с совершенствованием вычислительных алгоритмов и подходов актуальным является применение технологии высокопроизводительных вычислений (HPC технология) и высокопроизводительных кластеров для повышения производительности расчета указанных моделей. К сожалению, эта технология, хоть и является технически доступной, но крайне редко применяется в настоящее время в реальных исследованиях из-за отсутствия методологий подготовки моделей с ее применением, малой изученностью эффективности этой технологии для моделирования процесса резания. Наиболее актуальной задачей с практической точки зрения является исследование взаимодействия рабочего процесса (процесса резания) и технологической системы (например, задача 7 в табл. 1). Поэтому **целью** настоящей работы является оценка эффективности применения HPC технологий для повышения производительности решения моделей процесса резания с количеством узлов конечных элементов около 10^6 с 10-40 деформируемыми деталями.

Таблица 1 – Сравнение вычислительной трудоемкости различных задач моделирования процессов резания

Объект моделирования	Описание	Количество деформируемых тел	Примерное количество узлов в деформируемых телах	Ориентировочная производительность вычислений*, мм пути резания/час	Минимальный путь резания для получения данных, мм
1. Прямоугольное резание (2D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в абсолютно жесткой технологической системе (плоская деформация)	1	10000	1	1
2. Прямоугольное резание (2D задача)	Прогнозирование напряжений в лезвии в условиях образования сегментной стружки в абсолютно жесткой технологической системе (плоская деформация)	2	100000	0.05	1
3. Прямоугольное резание (3D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в абсолютно жесткой технологической системе	1	110000	2.6	1
4. Процесс отрезания (3D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в абсолютно жесткой технологической системе	1	120000	1.8	10
5. Процесс фрезерования концевой фрезой (3D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в абсолютно жесткой технологической системе	1	200000	0.04	1
6. Процесс сверления спиральным сверлом (3D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в абсолютно жесткой технологической системе	1	300000	0.01	5
7. Прямоугольное резание (3D задача)	Моделирование сливного стружкообразования в податливой технологической системе, исследование колебаний рабочих органов станка	37	1700000	2.1	100

Примечание. * тестирование выполнялось при скорости резания $V=300$ м/мин. Использовался сервер с конфигурацией Intel Xeon 5405x2, Ram: 8GB, HDD1:80Gb, HDD2:1Tb. FedoraCore 10 x64. Расчет выполнялся в LS-DYNA R4.2 SMP. Задействовано 8 процессоров.

Эффективность применения НРС технологий для исследования процессов механической обработки исследовалась на примере модели прямоугольного резания в абсолютно жесткой технологической системе [2], реализованной в системе LS-DYNA R4.2 DOUBLE PRECISION с использованием тестового кластера кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов Сумского государственного университета. Использовались версии с распределенной памятью (MPP) и общей памятью (SMP) Описание тестовой модели представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Описание тестовой модели прямоугольного резания

ПРОЦЕСС		Прямоугольное резание					
Размерность модели		3D					
Геометрические параметры заготовки							
L_3 , мм		B_3 , мм		H_3 , мм			
4,5		1,0		0,45			
Геометрические параметры инструмента							
Название инструмента			Лезвие				
L_1 , мм	H_1 , мм	$B_1(d)$, мм	γ , °	α , °	ρ , мм	h_{z1} , мм	
0,5	0,5	1,2	5	13	0,02	0	
Конечно-элементная сетка							
	Тип КЭ	Кол-во узлов	Кол-во эл-тов	Хар. размер	Равномерность	ihq	qh
1	Solid1	68536	62006	5,3 мкм	град.	-	-
3	Solid1	62790	56676	16 мкм	равном.	5/0	01
Базовый режим резания							
V , м/мин	200	S , мм/об(а, мм)	0,15	t , мм	-	B , мм	1,0

Расчетная схема

Кластер состоит из 5-ти идентичных компьютеров (узлы 01..05). Конфигурация узла кластера: процессор – Intel Celeron E3200, оперативная память – 1 ГБ DDR-2 800, НЖМД - WDS 1600AAJS, операционная система - Ubuntu LINUX 10.04 .1 SERVER AMD64, сетевой адаптер – на базе чипа RTL8111/8168B. Реализация MPI – MPICH 1.2.7p1 (--with-device=ch_p4). В качестве управляющего узла используется любой узел кластера. Обмен данными и управление кластером осуществляется через одну сеть, построенную с использованием технологии FastEthernet, кабеля Molex Cat 5E и свитча 3Com 3C16792C (16 портов/FastEthernet). Удалённое управление кластером осуществляется по протоколу SSH, доступ к общему ресурсу организован по протоколу NFS. Скорость передачи данных по сети в пике достигает 94,4Mbit/s (при измерении использовалась утилита iperf), скорость чтения/записи на НЖМД достигает 101.97 MB/s / 115 MB/s (при измерении использовалась утилиты dd

и hdrpm). Для нужд операционной системы на узлах кластера доступен весь объём носителей данных. При расчете в помещении, в котором находился кластер, постоянно поддерживалась температура 18°C.

Исследования проводились путем последовательного запуска процедуры расчета с различным количеством используемых узлов и процессоров на каждом узле. Результаты проведенного тестирования показывают, что для задачи данной конфигурации применение 5 узлов по 2 процессора обеспечивает увеличение производительности расчета в 2.5 раза (рис. 2). Наибольший прирост производительности был замечен при использовании 2 узлов (36%) (рис. 3). С добавлением каждого нового узла прирост производительности уменьшается (5 узлов – 12%). Эта тенденция полностью соответствует известному закону Амдала [3].

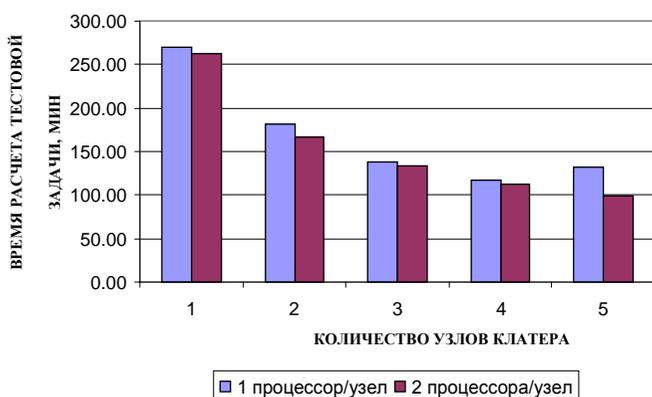


Рисунок 2 – Влияние количества узлов и процессоров, задействованных при расчете, на время счета модели прямоугольного резания



Рисунок 3 – Прирост производительности вычислений в зависимости от используемого количества узлов в модели прямоугольного резания

В то же время использование 2-х процессоров на одном узле оказалось неэффективным, поскольку дает прирост производительности всего 3% (рис. 2). Но при использовании только 1 процессора на каждом узле возможно возрастание времени счета (см. рис. 2) с увеличением количества узлов. Это свидетельствует о необходимости обеспечения высокой скорости обмена информацией между узлами в пределах кластера.

По сравнению с SMP решением этой задачи на ПЭВМ Intel Xeon 5405x2, Ram: 8GB, HDD1:80Gb, HDD2:1Tb. FedoraCore 10 x64 с 8 задействованными ядрами MPP решение в описанном ранее кластере с 4 узлами по 2 процессора дает падение производительности всего на 25%, а с 5 узлами по 2 процессора - на 12%.

Эффективность применения HPC технологий для исследования взаимодействия процесса резания и технологической системы проверялась на примере задачи моделирования прямоугольного резания на испытательном стенде (рис.4). Стенд состоит из станины из керамобетона и чугуна, линейных направляющих качения, линейного двигателя и суппорта, а также портала с кареткой и резцедержателем. Осевая жесткость портала обеспечивается струнами, образующими два жестких треугольника. На суппорте установлен трехкомпонентный динамометр фирмы Kistler, на измерительной плите которого установлено приспособление для закрепления заготовки в виде пластины толщиной от 2 до 5 мм. Инструмент закрепляется в резцедержатель. За счет вертикального перемещения каретки вместе с инструментом устанавливается толщина среза. Цикл ортогонального резания осуществляется путем перемещения суппорта со скоростью главного движения резания относительно неподвижного инструмента. Модель стенда состоит из 37 деформируемых деталей.

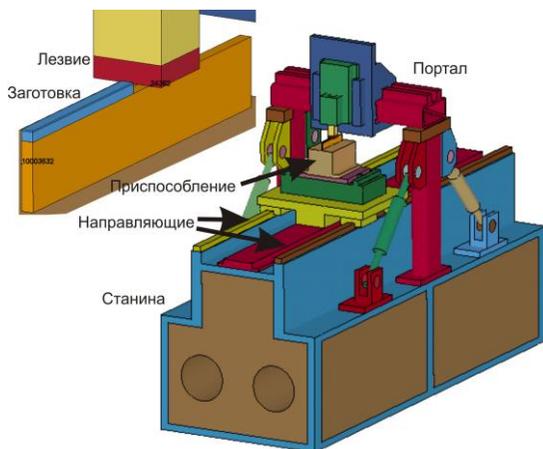


Рисунок 4 – Модель стенда

Таблица 3 – Сведения об объектах системы

Название объекта	Тип конечного элемента	Количество конечных элементов	Модель материала и ее параметры	Критерий разрушения
Заготовка	Прямоугольный параллелепипед, 8-узловой	69000	Упругопластический Джонсона-Кука.	$\epsilon_p \geq \epsilon_{pmax}$
Лезвие		144	Абсолютно жесткий, $E=560$ ГПа, $\mu=0.3, \rho=14500$ кг/м ³	Разрушение невозможно
Станина		7288	Абсолютно упругий, $E=32$ ГПа, $\mu=0.22, \rho=2400$ кг/м ³	
Прочие детали		87707	Абсолютно упругий, $E=32$ ГПа, $\mu=0.22, \rho=2400$ кг/м ³	

КЭ сетка всех 37 деталей рассматриваемой технологической системы была выполнена с помощью ANSYS. Информация о КЭ сетке основных деталей системы, моделях их материалов и свойствах КЭ элементов представлена в таблице 3. Все детали приняты абсолютно упругими. Та часть заготовки, которая образует срезаемый слой, рассматривалась как упругопластический материал, заданный определяющим уравнением [2] и критерием разрушения Джонсона-Кука. Разрушение моделировалось удалением элементов при выполнении критерия разрушения.

Практически все детали исследуемой технологической системы рассматривались такими, которые могут контактно взаимодействовать друг с другом. Исключение составляли контактные границы, где нарушение контакта невозможно (например, граница между деталями, соединенными сваркой). На этих границах узлы соединяемых деталей сливались. Контакт между инструментом и срезаемым слоем предусматривал возможность удаления элементов. Коэффициент трения между деталями технологической системы принимался равным 0.1, а между инструментом и заготовкой – 0.5.

Граничные условия задавались в виде жесткого закрепления основания станины в глобальной системе координат. Положение суппорта ограничивалось контактной границей в линейных направляющих. Узлы на этой контактной границе были связаны в вертикальном направлении. Лезвие жестко прикреплялось к резцу, а заготовка жестко закреплялась в приспособлении. Нагрузки задавались путем равномерного перемещения со скоростью резания суппорта вдоль

линейных направляющих относительно станины. Начальные условия были представлены нулевыми значениями всех внутренних переменных.

Оценка работоспособности и производительности разработанной модели была выполнена для случая ортогонального резания стали 45 со скоростью резания 100 м/мин, толщиной среза 0.3 мм. Длина заготовки была принята равной 80 мм. Размер конечного элемента по толщине среза был принят 30 мкм. При этих условиях общее количество пластически деформируемых элементов составило 69000 (см. табл. 3), а общее количество деформируемых конечных элементов составило 170000.

В результате расчета были получены данные о перемещениях характерных точек технологической системы: режущей кромки, резцедержателя, портала (рис. 5). Видно, что режущая кромка совершает сложное движение в вертикальной плоскости. При этом явно выражена деформация, достигающая в направлении оси Z 100 мкм. Видно, что наибольшие перемещения в направлении оси Z (до 60%) определяются деформацией державки. Деформация портала также вносит до 35% всех перемещений режущей кромки. Узел «каретка-резцедержатель» вносит всего около 5% всех перемещений.

Проведенное сравнение производительности вычислений с помощью различного количества узлов и количества процессоров показало (рис. 6), что применение 10 процессоров (по 2 на 5 узлах) позволяет уменьшить время счета в 2.7 раза при прочих равных условиях, однако все еще не обеспечивает приемлемой для решения инженерных задач производительности расчета (1.7 мм/мин против желаемых 4 мм/мин для того, чтобы рассмотреть процесс в течении значительного пути резания (200-300 мм и больше) или с более мелкой сеткой).

Интересными являются два факта, установленные в процессе исследований. Во-первых, применение трех узлов является неэффективным из-за увеличения времени счета. Во-вторых, SMP решение на ПЭВМ Intel Xeon 5405x2, Ram: 8GB, HDD1:80Gb, HDD2:1Tb. FedoraCore 10 x64 с 8 задействованными ядрами занимает 369 мин против 647 мин MPP решения с использованием кластера, т.е. на 75% меньше. Это падение производительности значительно больше, чем в задаче с абсолютно-жесткой технологической системой, рассмотренной ранее (25%). Причиной этого могут быть задержки в обмене данными между узлами, возникающие из-за увеличения потоков информации в задаче большой размерности.

По результатам тестирования стало очевидным, что применение более 5 узлов для решения задач резания не эффективно, поскольку не обеспечивается заметный прирост производительности вычислений. При использовании описанной конфигурации кластера производительность вычислений будет определяться больше производительностью каждого узла. С увеличением количества деформируемых тел в модели возрастают потребности в высокой скорости обмена данными между узлами кластера.

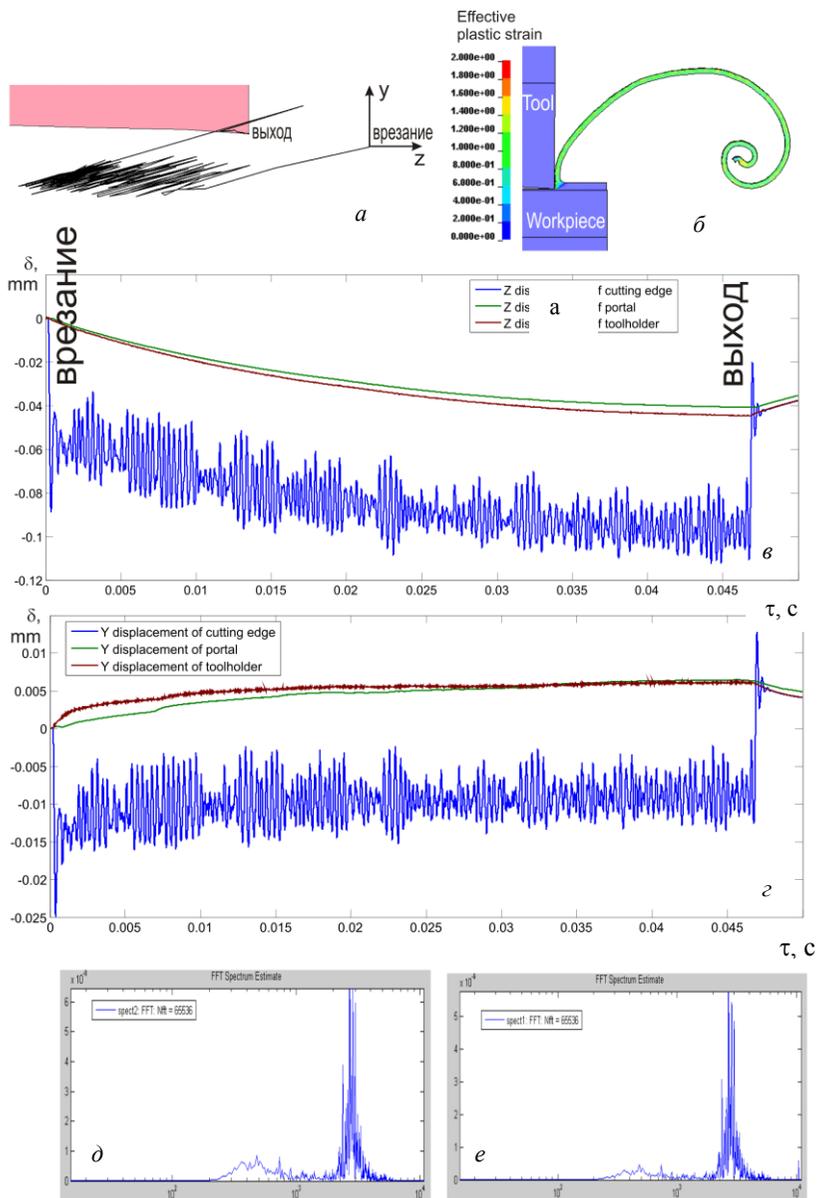


Рисунок 5 – Траектория перемещения вершины лезвия (а), форма стружки (б), деформация элементов технологической системы в направлении осей Z (в) и Y (з), а также спектры колебаний вершины лезвия в направлении осей Z (д) и Y (е)

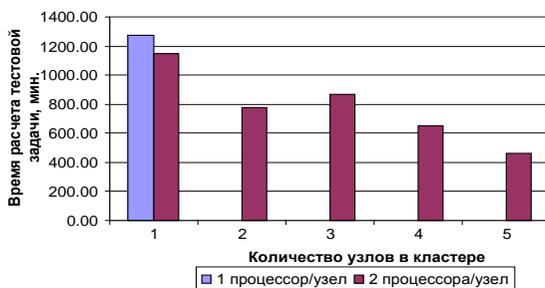


Рисунок 6 – Влияние количества узлов и процессоров, задействованных при расчете, на время счета модели процесса прямоугольного резания в податливой технологической системе. Время резания – 5 мс. Длина пути резания – 8.5 мм.

Оптимизационные задачи в области резания материалов часто решаются методами планирования эксперимента с применением планов второго порядка. Для трех факторов необходимо 15 опытов или, в данном случае, виртуальных решений. Поскольку использование более 5 узлов не дает существенного приращения производительности расчетов, то для решения оптимизационных задач достаточно кластера, содержащего от 5 (все точки плана решаются последовательно) до 75 узлов (все точки плана решаются параллельно). Количество ядер в каждом узле, видимо, не будет оказывать решающего влияния на производительность вычислений. Главным фактором в этом случае является скорость обмена данными между узлами.

Примером кластера, удовлетворяющего указанным требованиям, может быть кластер университета Штутгарта (<http://www.hlrs.de/>). Проведенные MPP вычисления с его помощью с использованием 8 узлов по 1 процессору показали, что рассмотренная модель прямоугольного резания в податливой технологической системе решается за 240 мин против 369 мин (SMP решение) и 647 мин (MPP решение) в рассмотренных ранее вычислительных системах, т.е. не менее, чем на 50% быстрее.

По сравнению с использованием SMP версий решателя LS-DYNA применение MPP версий в высокопроизводительных HPC системах дает возможность использования относительно недорогих ПЭВМ для решения ресурсоемких задач, которыми и являются задачи моделирования процессов резания.

Список использованных источников: 1. Klamecki B. E. Incipient Chip Formation in Metal Cutting-A Three Dimension Finite Element Analysis: PhD dissertation. -Urbana: University of Illinois, 1973. 2. Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів: Дисс. ... докт. техн. наук:05.03.01. -Харків, 2010. -457 с. 3. Антонов А. Под законом Амдала//Компьютера. -2002. -№ 5.

Поступила в редакцию 18.03.2011

Bibliography (transliterated): 1. Klamecki B. E. Incipient Chip Formation in Metal Cutting-A Three Dimension Finite Element Analysis: PhD dissertation. -Urbana: University of Illinois, 1973. 2. Krivoruchko D. V. Naukovi osnovi modeljuvannja procesiv rizannja z vikoristannjam chislovihih metodiv: Diss. ... dokt. tehn. nauk:05.03.01. -Harkiv, 2010. -457 s. 3. Antonov A. Pod zakonom Amdala//Kompjuter. -2002. -№ 5.