

УДК 629.735

Г.А. ПОЛЯКОВ¹, Е.Г. ТОЛСТОЛУЖСКАЯ², В.В. ТОЛСТОЛУЖСКАЯ²¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

ОЦЕНКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ СИНТЕЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВРЕМЯПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАДАЧ

Рассматриваются основные этапы синтеза параллельных времяпараметризованных моделей задач. Раскрываются составляющие функционала, обеспечивающего оценку вычислительной сложности формального синтеза параллельных времяпараметризованных моделей задач – как основы автоматической разработки традиционных статических и временных параллельных программ. Разработанный функционал позволяет оценивать вычислительную сложность формального и автоматического синтеза параллельных и мультипараллельных моделей задач, при учете широкого состава параметров, влияющих на эффективность параллельных программ.

Ключевые слова: параллельный времяпараметризованный вычислительный процесс, синтез временных моделей, вычислительная сложность, статическая и временная параллельная программа.

Введение

Признается, что центральной проблемой современной вычислительной техники является повышение эффективности параллельных ЭВМ и суперЭВМ. Путем решения этой проблемы является повышение эффективности параллельных программ [1 – 8]. Отмечается, что принципиальным недостатком известных системы автоматизации параллельного программирования является необходимость субъективного выполнения программистом вручную основных этапов создания параллельных программ, определяющих эффективность и сроки создания параллельных программных продуктов. Считается, что известные системы создания параллельных программ не могут обеспечить эффективное решение рассматриваемой проблемы [1, 4]. Альтернативным решением является разработка методов формального синтеза архитектурно-ориентированных времяпараметризованных параллельных/мультипараллельных программ и создание реализующих эти методы технологий автоматического параллельного программирования, обеспечивающих высокую эффективность за счет устранения субъективности проектирования и обеспечивающих учет широкого состава исходных данных (класс, архитектуру и конфигурацию параллельных ЭВМ, состав методов параллельной обработки данных, длительности выполнения различных операций, требования к времени решения/ограничения на доступный вычислительный ресурс/стоимость) [9 – 14]. Одним из определяющих компонентов таких методов и систем является ав-

томатический синтез архитектурно-ориентированных времяпараметризованных моделей параллельных вычислительных процессов. Оценка вычислительной сложности этого этапа в значительной степени определяет общую вычислительную сложность формального и автоматического синтеза параллельных и мультипараллельных программ, практическую реализуемость перспективных адаптивных систем автоматического параллельного программирования и значимость для проблемы повышения эффективности как существующих, так и перспективных классов параллельных вычислительных систем.

Целью статьи является изложение результатов разработки функционала вычислительной сложности, обеспечивающего расчет сложности синтеза параллельных время – параметризованных моделей решения задач – как основы последующей автоматической разработки традиционных статических и временных параллельных программ для различных классов параллельных ЭВМ/суперЭВМ.

1. Определения и понятия

Оператор $P_j \in P$ – некоторое преобразование данных (включая ввод/вывод), а также имена переменных и констант S_i – программы.

Сопряженное множество S_j оператора P_j – множество номеров операторов $P_j \in P$, результаты выполнения которых использует P_j при своей реализации. Операторы P_i , для которых $i \in S_j$, являются сопряженными для P_j .

Внешнее множество W_j оператора P_j - множество номеров операторов P_i , каждый из которых использует при своей реализации результаты выполнения оператора P_j .

Операторы P_i , для которых $i \in W_j$, являются внешними для P_j .

Параметр начала t_j^H оператора P_j - значение дискретного времени, соответствующее моменту начала выполнения оператора $P_j \in P$.

Временная глубина t_j^0 оператора P_j - величина временной задержки между моментом t_j^H начала выполнения оператора $P_j \in P$ и моментом t_j^K получения результатов выполняемого преобразования.

Ранг оператора P_j - максимальное время прохода по всем путям, связывающих этот оператор с выходными операторами задачи.

Временная параметризация множества операторов - постановка в соответствие каждому оператору $P_j \in P$ параметра начала выполнения t_j^H .

Псевдовременной Си-граф - конструкция, которая содержит:

- множество перенумерованных «вершин» - операторов $P_j \in P$, имеющих отдельно перенумерованные входы и выходы и отображающих определенные Си - программой состав семантико - числовых данных и их преобразования;

- множество перенумерованных «ребер», связывающих вершины и задающих связи между различными входами вершин по данным, по управлению и осведомительные связи;

- равные условной единице длительности $t_j^0 = 1.00$ выполнения всех операторов $P_j \in P$.

Структуры BF и CF семантико-числовой спецификации (СЧС), задающие состав и типы операторов $P_j \in P$ задачи и информационно - управляющие связи между ними [15].

Определим вычислительную сложность $Q_C(MZ)$ синтеза параллельной времяпараметризованной модели MZ задачи Z как количество «коротких» процессорных операций, обеспечивающих формальный синтез структур семантико-числовой спецификации модели, исходя из структур СЧС BF и CF Си - программы задачи, требований к времени $T_{\text{зад}}$ решения задачи или ограничений на ширину N параллельного процесса.

2. Исходные данные и этапы синтеза параллельных времяпараметризованных моделей задач

Исходные тексты Си - программ задач;

- структуры BF и CF СЧС Си - программы;

- псевдовременной (ПВ) Си - граф задачи, число k_j ярусов в ПВ Си - графе;

- множество $P = \{P_j\}$, $j = 0, 1, \dots, n-1$; множества $P(n_j)$ операторов P_j , принадлежащих каждому из k_j ярусов ($n_j = 0, 1, 2, \dots, k_j-1$) ПВ Си - графа, $p(n_j)$ - мощность множества $P(n_j)$;

- число элементов lb полной базы $LB = \{t^0(\text{typ} \in C/C++)\}$ или число элементов lt локальной базы $LT = \{t^0(\text{typ})\}$ данных конкретной Си-программы, задающих длительности t_j^0 выполнения операторов P_j различных типов $\text{typ}(j)$ операторов языка Си/Си++;

- состав поддерживаемых методов параллельной обработки - метод совмещения независимых операций (СО), метод конвейерной (КО), кодово-матричный метод (КМ), декомпозиционный метод (ДК) и метод смеси алгоритмов (СА) [7];

- заданная ширина N (мульти)параллельного процесса, интерпретируемая как число NM количества доступных процессоров.

Классы поддерживаемых формальным синтезом временных параллельных моделей [7]:

а) монопараллельные модели: глобальная параллельная модель, конвейерная параллельная модель, декомпозиционная параллельная модель, кодово-матричная модель, модель смеси глобально-параллельных алгоритмов.

б) мультипараллельные модели: глобально-конвейерная модель/смесь, глобально-декомпозиционная модель/смесь, глобально-кодово-матричная модель/смесь, глобально-декомпозиционно-кодово-матричная модель/смесь.

Этапы синтеза параллельных времяпараметризованных моделей задач, учитываемые при оценке вычислительной сложности:

А. Расчет рангов $\text{rng}(j)$ операторов $P_j \in P$, специфицированных структурой СЧС BF Си-программы и визуализированных псевдовременным Си-графом. Математическую модель расчета рангов представляет соотношение

$$\text{rng}(P_j) = \max_{i \in W_j} (\text{rng}(P_i)) + t_j^0. \quad (1)$$

В. Упорядочение элементов массива рангов $RN = \{rng(P_j)\}$ по убыванию рангов $rng(P_j)$ операторов P_j .

С. Расчет для операторов P_j параметров t_j^H начала выполнения.

3. Результаты исследований

Вычислительная сложность расчета рангов $rng(j)$ операторов P_j структуры СЧС ВФ и формирование массива $RN^H(P) = \{rng(P_j)\}$ неупорядоченных значений рангов операторов. Вычислительная сложность этапа определяется соотношением (2) применительно к расчету ранга одного оператора и соотношением (3) для случая расчета рангов всех операторов структуры ВФ СЧС псевдореального Си-графа с использованием полной базы $LB = \{t^0(typ)\}$ или локальной базы $LT = \{t^0(typ)\}$

$$Q_{rng}^H(P_j) = 5 \cdot wjd(j) + lb | lt + 1 \quad (2)$$

В соотношение 2 входят $4 \cdot wjd(j)$ операций определения значений рангов $rng(P_i)$ для внешних (по отношению к P_j) операторов $P_i \in W_j$, $wjd(j) - 1$ операций нахождения максимального значения ранга для операторов $P_i \in W_j$, $lb|lt$ операций обращения к базе LB или LT для определения длительности t_j^0 выполнения оператора P_j и две операции расчета и записи в память ранга $rng(P_j)$ оператора P_j .

$$Q_{rng}^H(P) = \sum_{nj=kjr-1}^0 \sum_{j \in P(nj)} (5 \cdot wjd(j) + lb | lt + 1) \cdot p(nj) = 5 \cdot wn + lb | lt + 1 \cdot n. \quad (3)$$

Вычислительная сложность процесса упорядочения элементов массива рангов $RN = \{rng(P_j)\}$ по убыванию рангов $rng(P_j)$ операторов $P_j \in P$.

Исходными данными этапа являются:

- псевдореальной (ПВ) Си-граф задачи, число kjr ярусов в Си-графе;
- структуры ВФ и СФ СЧС псевдореального Си-графа;
- множества $P(nj)$ операторов P_j , принадлежащих каждому из kjr ярусов ($nj = 0, 1, 2, \dots, (kjr - 1)$) псевдореального Си-графа, $p(nj)$ – мощность множества $P(nj)$;
- неупорядоченный по значениям рангов массив $RN_n = \{rng(P_j)\}$, $j = 0, 1, \dots, (n - 1)$, рангов $rng(P_j)$ операторов P_j структуры СЧС ВФ Си-программы, сформированный при выполнении первого этапа.

Решение задачи упорядочения основано на применении к неупорядоченному множеству рангов $rng(P_j)$ операторов каждого nj -го яруса псевдореального Си-графа метода сортировки методом включения. Вычислительная сложность упорядоченного массива $RN^y(P)$ рангов $rng(j)$ операторов P_j структуры СЧС ВФ и псевдореального Си-графа определяется соотношением:

$$Q_{rng}^y = \sum_{nj=kjr-1}^0 \left(\frac{3 \cdot (k^2(nj) - k(nj))}{2} \right) + 2n. \quad (4)$$

В соотношение входят (применительно к произвольному ярусу с номером nj), состав членов арифметической прогрессии $((k(nj)-1), (k(nj)-2), \dots, 3, 2, 1)$, задающих число сравнений каждого оператора P_j nj -го яруса со всеми последующими операторами этого яруса, и количество $(k(nj)-1)$ таких сравнений; число $(k^2(nj) - k(nj))$ операций формирования номеров пар операторов (P_j, P_i) для сравнения их рангов и количество $(k^2(nj) - k(nj))/2$ операций сравнения рангов каждой пары операторов (P_j, P_i) nj -го яруса.

$$RN_y(P) = \bigcup_{nj=0}^{kjr-1} RN_y(nj).$$

Вычислительная сложность расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов $P_j \in P$ временной максимально параллельной (сжатой) модели задачи.

Логику определения моментов t_j^H начала выполнения произвольного оператора $P_j \in P$ задает соотношение:

$$t_j^H = \max_{i \in S_j} (t_i^H + t_i^0). \quad (5)$$

Исходными данными этапа являются:

- псевдореальной (ПВ) Си-граф задачи, число kjr ярусов в Си-графе;
- структуры ВФ, СФ семантико-числовой спецификации псевдореального Си-графа;
- множество $P = \{P_j\}$, $j = 0, 1, \dots, n - 1$; множества $P(nj)$ операторов P_j , принадлежащих каждому из kjr ярусов ($nj = 0, 1, 2, \dots, (kjr - 1)$) псевдореального Си-графа, $p(nj)$ – мощность множества $P(nj)$;
- массив T^0 значений t_j^0 операторов $P_j \in P$.

Оценка вычислительной сложности расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов P_j включает следующие этапы.

Этап а. Расчет вычислительной сложности определения количества $p(vx)$ номеров j операторов P_j -входов множества $P(vx)$, количества операторов P_j – имен переменных $p(var)$ и констант $p(con)$ $nd = n(nj = 0) = p(vx) + p(var) + p(con)$, назначения для операторов P_j нулевого яруса псевдореального Си-графа моментов $t_j^H=0.0$ начала их выполнения и

определения количества $\Delta n = n - nd$ и множества ΔP номеров j операторов P_j остальных типов. Вычислительная сложность этапа определяется соотношением:

$$Q_{nd} = 13 \cdot nd. \quad (6)$$

В соотношении (6) константа $C_{13} = 13$ задает количество коротких операций, обеспечивающих «обработку» одного оператора: формирование номера $j = j + 1$ очередного оператора P_{j+1} , выбора типа $\text{typ}(j+1)$ оператора P_{j+1} , три операции проверки принадлежности типа $\text{typ}(j+1)$ к множеству из трех типов: типу «вход/vx», типу «имя переменной/var» и типу «имя константы/const», четыре операции формирования текущего значения $nd = nd + 1$ и операции включения номера $(j+1)$ оператора P_{j+1} каждого из перечисленных типов в множество номеров $j \in P(nj = 0) = \{0, 1, \dots, (nd - 1)\}$ операторов нулевого яруса с присваиванием $t_j^H = 0.0$.

Этап б. Решение задачи назначения для операторов $P_j \in \Delta P$ моментов t_j^H начала их выполнения в соответствии с соотношением:

$$t_j^H = \max_{i \in S_j} (x_i t_i^H + t_i^0). \quad (7)$$

Вычислительная сложность $Q_{\Delta n}$ этапа определяется соотношением:

$$Q_{\Delta n} = 9 \left(\sum_{nj=1}^{kjr-1} \sum_{j \in P(nj)} s_j d(j) \right) + 3n = 9 \cdot sn + 3n. \quad (8)$$

В соотношении (8) константа $C_9 = 9$ задает количество коротких операций, обеспечивающих «обработку» одного оператора: формирование номера $j = j + 1$ очередного оператора P_{j+1} , выбора типа $\text{typ}(j+1)$ оператора P_{j+1} , три операции проверки принадлежности типа $\text{typ}(j+1)$ к множеству из трех типов: типу «вход/vx», типу «имя переменной/var» и типу «имя константы/const», четыре операции формирования текущего значения $nd = nd + 1$ и операции включения номера $j+1$ оператора P_{j+1} , выбора указателя $ns_j | s_j d$, определения номера i сопряженного для P_j оператора $P_i \in S_j$, чтения из памяти значений t_i^H и t_j^0 , определения момента оператора t_i^K завершения выполнения оператора $P_i \in S_j$ ($t_i^K = t_i^H + t_j^0$).

Отметим, что результатом расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов $P_j \in P$ при отсутствии ограничений на ширину N параллельной временной модели является формирование массива $TF = \{t_j^H\}$, сопоставляющего каждому оператору P_j структуры BF момент начала его выполнения при отсутствии ограничений на количество одновремен-

но выполняемых операторов. Графическим представлением такой времяпараметризованной модели является сжатая временная параллельная граф-схема.

Общее соотношение функционала вычислительной сложности синтеза максимально параллельных (сжатых) времяпараметризованных параллельных моделей задач имеет следующий вид

$$Q(M) = (5wn + (lb | lt + 1)n) + \sum_{nj=kjr-1}^0 \left(\frac{3(k^2(nj) - k(nj))}{2} \right) + (9sn + 5n + 13nd). \quad (9)$$

Вычислительная сложность расчета параметров t_j^H начала выполнения операторов $P_j \in P$ при ограничениях на ширину N параллельной временной модели

Исходными данными этапа являются следующие:

- псевдовременной (ПВ) Си-граф задачи, число kjr ярусов в Си-графе;
- множество $P = \{P_j\}$, $j = 0, 1, \dots, (n - 1)$; множества $P(nj)$ операторов P_j , принадлежащих каждому из kjr ярусов ($nj = 0, 1, 2, \dots, (kjr - 1)$) ВПГС $G_{сж}(t)$, $p(nj)$ – мощность множества $P(nj)$;
- структуры BF, CF семантико-числовой спецификации псевдовременного Си-графа.
- массив T^0 значений t_j^0 операторов $P_j \in P$;
- ограничение на ширину N времяпараметризованной параллельной модели задачи.

Наличие ограничений на ширину N времяпараметризованной параллельной модели не изменяет количество, состав типов операторов $P_j \in P$ и их связи, задаваемые структурами СЧС BF, CF исходной Си-программы.

Не изменяется также и количество и состав коротких операций «обработки» каждого оператора $P_j \in P$ (включая операции расчета параметров начала t_j^H): ограничение на ширину N модели изменяет только формируемые этими операциями «значения» операндов и, как следствие, значения ярусных времен $t(nj)$ и распределение операторов $P_j \in P$ по временным ярусам модели.

Таким образом, оценки вычислительной сложности синтеза параллельных временных моделей при отсутствии ограничений на ширину N справедливы и в общем случае произвольных ограничений на значение параметра N .

Выводы

1. Основной проблемой современной параллельной вычислительной техники является разработка эффективных параллельных программ. Известные системы параллельного программирования

не могут обеспечить эффективное решение рассматриваемой проблемы.

2. Решением проблемы является разработка методов формального синтеза эффективных параллельных/мультипараллельных времяпараметризованных программ и технологий автоматического параллельного программирования.

3. Разработанный функционал позволяет оценивать вычислительную сложность формального и автоматического синтеза параллельных и мультипараллельных моделей задач, при учете широкого состава параметров, влияющих на эффективность параллельных программ.

4. Полученный функционал позволяет сделать вывод, что вычислительная сложность разработанных авторами методов формального синтеза мультипараллельных времяпараметризованных моделей имеет порядок сложности $O(n)$, что существенно лучше методов решения аналогичных комбинаторных задач (например, $O(n^2)$).

Литература

1. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления [Текст] / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
2. Голдин, Дэниел С. На повестке дня - революция [Текст] / Дэниел С. Голдин, Сэмюель Л. Венери, Ахмед К. Нур // Открытые системы. – 2000. – № 1-2. – С. 66 – 71.
3. Круз, Р.Л. Структуры данных и проектирование программ: пер. с англ. [Текст] / Р.Л. Круз. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 765 с.
4. Лацис, А. Как построить и использовать суперкомпьютер [Текст] / Алексей Лацис. – М.: Бестселлер, 2003. – 240 с.
5. Программирование на параллельных вычислительных системах: пер. с англ. [Текст] / Р. Бэбб, Дж. Р. Мак-Гроу, Т. Акселрод и др.; под ред. Р. Бэбба II. – М.: Мир, 1991. – 376 с.
6. Поляков, Г.А. Адаптивные самоорганизующиеся системы с мультипараллельной обработкой данных - стратегия развития цифровой вычислительной техники в XXI – м веке [Текст] / Г.А. Поляков // Прикладная радиоэлектроника. – Х.: - АН ПРЭ, 2002. – №1 – С.57 – 69.
7. Проблемы многоверсионного проектирования высоконадежных параллельных программных средств для систем управления критическими технологиями и объектами [Текст] / Г.А. Поляков, В.В. Скляр, Д.А. Толстолужский., Е.Г. Толстолужская, В.С. Харченко // Радиоэлектронные и компьютер-

ные системы. – 2006. – Вып. 7(19). – С. 7-16.

8. Поляков, Г.А. Технология проектирования времяпараметризованных мультипараллельных программ как стратегия развития систем параллельного проектирования [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – №6(40). – С. 166-171.

9. Поляков, Г.А. Формальный синтез параллельных программ для высокопроизводительных VLIW – процессоров [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУВС им. И. Кожедуба. – 2007. – Вып. 8(66) – С. 72-80.

10. Поляков, Г.А. Метод синтеза параллельно – декомпозиционных моделей алгоритмов для высокодинамичных критических систем [Текст] / Г.А. Поляков, Д.А. Толстолужский, Е.Г. Толстолужская // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУВС им. И. Кожедуба. – 2007. – Вып. 4(62) – С. 96-102.

11. Поляков, Г.А. Метод синтеза Си-программ смеси алгоритмов [Текст] // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУВС им. И. Кожедуба. – 2008. – Вып.1(68) – С. 96-100.

12. Поляков, Г.А. Метод формального архитектурно-ориентированного проектирования временных параллельных программ для ЭВМ с симметричной мультипроцессорной обработкой данных [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская // 36. наук. пр. Харківськ. універс. Повітряних Сил. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2008. – Вып. 3(18) – С. 118-121.

13. Поляков, Г.А. Метод формального синтеза временных параллельных программ для многопроцессорных ЭВМ с симметричной мультипроцессорной обработкой [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская // Научно-техническая конференция с международным участием «Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях». КМНТ – 2010. Часть 2. – Х: Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна. – С. 197 – 201.

14. Поляков, Г.А. Метод синтеза временных параллельных программ для вычислительных систем класса MPP [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 5 (46). – С. 135 – 139.

15. Поляков, Г.А. Пространственно-временная семантико-числовая спецификация топологий параллельных вычислительных систем [Текст] / Г.А. Поляков, Е.Г. Толстолужская, В.В. Толстолужская // Современная наука в сети Интернет. Материалы Пятой Всеукраинской научной Интернет-конференции 29-30 сентября 2011 г. – Тернополь: Тайт, 2011. – С. 13-16.

Поступила в редакцию 12.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф., зав. кафедрой компьютерных систем и сетей В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

ОЦІНКИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ СКЛАДНОСТІ СИНТЕЗУ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЧАСОПАРАМЕТРИЗОВАНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАДАЧ

Г.О. Поляков, О.Г. Толстолузка, В.В. Толстолузка

Розглядаються основні етапи синтезу паралельних часопараметризованих моделей задач. Розкриваються складові функціонала забезпечуючого оцінку обчислювальної складності формального синтезу паралельних часопараметризованих моделей задач - як основи автоматичної розробки традиційних статичних і часових паралельних програм. Розроблений функціонал дозволяє оцінювати обчислювальну складність формального і автоматичного синтезу паралельних і мультипаралельних моделей завдань, при обліку широкого складу параметрів, що впливають на ефективність паралельних програм.

Ключові слова: паралельний часопараметризований обчислювальний процес, синтез часових моделей, обчислювальна складність, статична й часова паралельна програма.

ASSESSMENTS OF COMPUTING SYNTHESIS COMPLEXITY OF PARALLEL TIME-PARAMETERIZED MODELS OF TASKS

G.A. Polyakov, O.G. Tolstoluzka, V.V. Tolstoluzka

The main stages of parallel time-parameterized models of task synthesis are considered. Components of functional providing assessment of computing synthesis complexity of parallel time-parameterized models of tasks are investigated as basis of automatic traditional static temporal parallel programs development. The developed functional allows to estimate calculable complication of formal and automatic synthesis of parallel and multiparallel models of tasks, at the account of wide composition of parameters, influencing on efficiency of the parallel programs.

Key words: parallel time-parameterized computing process, synthesis of temporal models, computing complexity, static and temporal parallel program.

Поляков Геннадий Алексеевич – д-р техн. наук, проф., профессор кафедры факультета компьютерных наук и телекоммуникаций Белгородского государственного национального исследовательского университета, Москва, Россия.

Толстолужская Елена Геннадиевна – канд. техн. наук, с.н.с., докторант кафедры теоретической и прикладной системотехники факультета компьютерных наук Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина.

Толстолужская Валерия Вадимовна – студентка факультета компьютерных наук Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина.