

Э. И. ВАТУТИН, В. С. ТИТОВ

**АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ КАЧЕСТВЕННОГО ПРЕВОСХОДСТВА  
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СИНТЕЗА РАЗБИЕНИЙ  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЛОГИЧЕСКИХ МУЛЬТИКОНТРОЛЛЕРОВ**

Приведены результаты исследования областей преимущественного использования методов синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления в многомерном пространстве ограничений при проектировании систем логического управления в базе логических мультиконтроллеров.

**Ключевые слова:** система логического управления, проектирование логических мультиконтроллеров, разбиения, граф-схема параллельного алгоритма, эвристические методы, дискретная комбинаторная оптимизация, VOINC.

Одним из перспективных подходов к синтезу систем логического управления (СЛУ) является их реализация в базе логических мультиконтроллеров (ЛМК) [1—3], представляющих собой совокупность взаимосвязанных параллельно работающих однотипных контроллеров, реализующих заданный параллельный алгоритм логического управления. При проектировании подобных систем возникает ряд задач дискретной комбинаторной оптимизации, одной из задач является отыскание субоптимального разбиения известной граф-схемы параллельного алгоритма логического управления на последовательные блоки ограниченной сложности, каждый из которых реализуется одним из контроллеров в составе ЛМК. Эта задача относится к классу  $NP$ , что не позволяет отыскать ее оптимальное решение для задач практически важной размерности за приемлемое время, поэтому при решении применяются эвристические методы [4—9], существенно различающиеся по трудоемкости реализации, асимптотической временной и емкостной сложности соответствующих им алгоритмов, составу оптимизируемых частных показателей качества и интегральному качеству получаемых решений.

Формализованная постановка задачи выглядит следующим образом: требуется получить разбиение  $\text{Sep}(A^0) = \{A_1, A_2, \dots, A_H\}$  множества вершин  $A^0$  граф-схемы исходного управляющего алгоритма  $G^0 = \langle A^0, V^0 \rangle$ , удовлетворяющее следующим условиям:

$$\begin{aligned} \bigcup_{i=1}^H A_i &= A^0, \quad A_i \neq \emptyset, \quad A_i \cap A_j = \emptyset, \quad i, j = \overline{1, H}, \quad i \neq j; \\ \neg(a_i \omega a_j) &\forall a_i, a_j \in A_k, \quad i \neq j, \quad k = \overline{1, H}; \\ W(A_i) &\leq W_{\max}, \quad |X(A_i)| \leq X_{\max}, \quad |Y(A_i)| \leq Y_{\max}, \quad i = \overline{1, H}, \end{aligned}$$

где  $\omega$  означает бинарное отношение параллельности вершин;  $W(A_i) = \sum_{a_j \in A_i} W(a_j)$  — суммарный „вес“ вершин в составе  $i$ -го блока (затраты памяти контроллера);  $X(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} X(a_j)$  — множество логических условий, входящих в вершины  $i$ -го блока (число дорожек контроллера, принимающих сигналы логического управления);  $Y(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} Y(a_j)$  — множество

микроопераций, входящих в вершины  $i$ -го блока (число дорожек контроллера, выдающих сигналы микроопераций), такое что

$$\begin{aligned} Z_H &= H(\text{Sep}(A^0)) \rightarrow \min, \\ Z_\alpha &= \sum_{i=1}^H \sum_{j=1, j \neq i}^H \alpha(A_i, A_j) \rightarrow \min, \\ Z_\delta &= \delta(\text{Sep}(A^0)) \rightarrow \min, \\ Z_X &= \sum_{i=1}^H |X(A_i)| - |X(A^0)| \rightarrow \min, \\ Z_Y &= \sum_{i=1}^H |Y(A_i)| - |Y(A^0)| \rightarrow \min, \end{aligned}$$

$Z_H$  — число блоков разбиения;  $Z_\alpha$  — сложность сети межблочных связей, порождаемая  $\text{Sep}(A^0)$ ;  $\alpha(A_i, A_j)$  — коэффициент связи блоков (равен единице, если блоки связаны по управлению в направлении от  $A_i$  к  $A_j$ , т.е. необходима команда межконтроллерной передачи управления, и нулю — в противном случае);  $Z_\delta$  — суммарное число (интенсивность) межблочных взаимодействий;  $Z_X$  — степень дублирования сигналов логических условий;  $Z_Y$  — степень дублирования сигналов микроопераций.

Стратегия сравнения эвристических методов заключается [10—14] в использовании изначально заданной выборки  $\Lambda = \{G_1^0, G_2^0, \dots, G_K^0\}$  из  $K$  тестовых примеров  $G_k^0$  ( $k = \overline{1, K}$ ) (в данном случае — граф-схем параллельных алгоритмов). По ним определяются средние значения оптимизируемых показателей качества (и соответственно границы доверительных интервалов) и строятся кривые, показывающие, в скольких случаях качество оптимизации выбранного критерия  $x$  ухудшается на заданную величину  $\Delta\gamma_x$  (в абсолютных или относительных единицах). Выборка граф-схем алгоритмов  $\Lambda$  во всех экспериментах формируется с использованием генератора граф-схем алгоритмов с псевдослучайной структурой [15].

На рис. 1 приведены пространство параметров ( $a$ ), карта в разрезе параметров ( $X_{\max}, W_{\max}$ ) ( $b$ ) и результаты ранних вычислительных экспериментов работ [10, 11] ( $\epsilon, \zeta, \delta$ ). В работе [10] сравниваются методы (см. рис. 1,  $\epsilon$ ), время выполнения подобного эксперимента — от нескольких минут до нескольких часов.

Спецификой рассматриваемой задачи является существенное влияние на качество оптимизации частных критериев не только „внутренних“ числовых параметров (например, коэффициентов весовых или штрафных функций) и алгоритмических особенностей (например, выполнение тех или иных вспомогательных преобразований) методов синтеза разбиений, но и технологических ограничений  $X_{\max}$  (на число принимаемых контроллером сигналов логических условий от объекта управления),  $Y_{\max}$  (на число выдаваемых контроллером сигналов микроопераций для объекта управления) и  $W_{\max}$  (на емкость памяти контроллера), зависящих от элементной базы и особенностей схемотехнической реализации СЛУ, и размерности задачи, определяемой числом вершин  $N$  граф-схемы алгоритма управления. Вследствие возможности беспрепятственного обхода ограничения  $Y_{\max}$  путем дублирования контроллера в составе СЛУ [1] фактически задача исследования поведения эвристических методов синтеза разбиений сводится к исследованию различных областей пространства параметров  $\{X_{\max}, W_{\max}, N\}$ .

В работе [11] частично исследовано пространство параметров путем изменения одного из параметров в заданном диапазоне при неизменных значениях остальных (см. рис. 1, з, д), в результате получены одномерные графики зависимостей  $\gamma_x$  (средневыборочное значение показателя  $x$ ) и  $\rho_x$  (вероятность получения решения с наименьшим значением минимизируемого критерия  $x$ ) от изменяемого параметра  $y \in \{X_{\max}, W_{\max}, N\}$ . Время расчета подобных графиков зависимостей — от нескольких часов до нескольких десятков часов процессорного времени для одного эксперимента. Была выявлена зонная структура: в различных областях значений ограничений (слабые, сильные, очень сильные) методы демонстрируют разное качество минимизации частных показателей, не позволяя выявить однозначно лучшего.

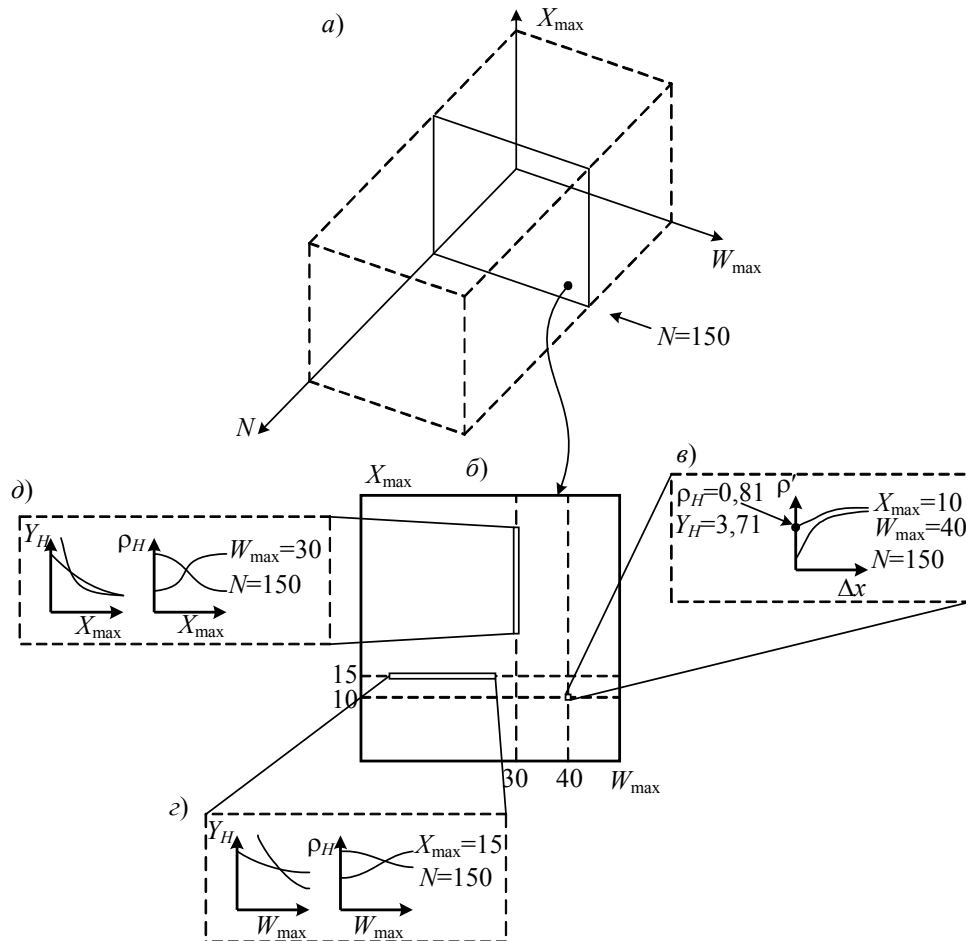


Рис. 1

В работах [12—14] предложено сравнить методы синтеза разбиений с использованием двухпараметрических диаграмм (карт), отражающих зависимость значений  $\gamma_x$  и  $\rho_x$  от пары изменяемых параметров  $y_1$  и  $y_2 \in \{X_{\max}, W_{\max}, N\}$ ,  $y_1 \neq y_2$  (рис. 1, б). Построение подобных карт достаточно ресурсоемко (в особенности с ростом  $N$ ) и требует сотен лет процессорного времени, что невозможно без распараллеливания вычислительного процесса и тщательной оптимизации программных реализаций методов синтеза разбиений [16, 17]. Поставленная задача исследования пространства параметров является слабосвязанной и, следовательно, может быть эффективно распараллелена согласно следующим стратегиям:

1) отдельные элементы пространства параметров (точки на карте), являющиеся входными параметрами для псевдослучайного генератора граф-схем алгоритмов и методов синтеза разбиений, могут быть обработаны параллельно;

2) отдельные разбиения  $\text{Sep}_{F_i}(A_j^0)$ , где  $F_i$  —  $i$ -й метод построения разбиений, в составе выборки граф-схем алгоритмов  $\Lambda$ , соответствующей каждой из точек на карте, могут быть выполнены параллельно.

При вычислениях с использованием Грид [18] время обработки расчетного задания (WorkUnit, WU) должно составлять от нескольких минут до нескольких часов: согласно первой стратегии, выборки граф-схем алгоритмов для различных точек пространства параметров формируются параллельно на различных машинах, входящих в состав Грид (1-я стратегия распараллеливания); построение разбиений в рамках выборки производится последовательно. С ростом размерности задачи последовательное построение выборки с результатами также становится достаточно времязатратным, поэтому при  $N > 500$  выборки разбиваются на под-выборки, обрабатываемые параллельно (2-я стратегия). При этом достигается эффективное использование вычислительных ресурсов (с загрузкой, близкой к 100 %).

Инструментарием для организации параллельных вычислений послужат технические возможности платформы добровольных распределенных вычислений BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing), активно используемой в ряде проектов (SETI@Home, Einstein@home, LHC@Home и др.). В России на платформе BOINC работают SAT@Home, OPTIMA@Home, NetMax@Home [19—21]. Инфраструктура BOINC представляет собой распределенную Грид-систему, характеризующуюся суммарной производительностью порядка 7—8 Pflops [22]. Система состоит более чем из 6,5 млн существенно неоднородных, географически удаленных вычислительных узлов, поддерживаемых более чем 2 млн добровольцев.

Серверная часть кода, реализованная в рамках проекта распределенных вычислений Gerasim@Home [23], управляет выдачей расчетных заданий (исходный файл с параметрами расчета в формате XML размером несколько сотен байтов) на удаленные клиентские машины по их запросу из программного модуля BOINC Manager, а также получает результаты (результатирующий бинарный файл с выборкой значений показателей качества размером около 200 КБ). С целью защиты от потенциальных ошибок различного характера два экземпляра каждого расчетного задания обрабатывались на различных машинах с последующей побайтной сверкой полученных результатов (валидацией).

Вычислительное время эксперимента с использованием Грид-инфраструктуры составило в общей сложности около 97 лет (29,6 Eflops, в приведенных значениях не учитываются вычислительные затраты выполненных ранее экспериментов [12—14]) время обработки, по сравнению с реализацией расчетов на одной машине, снизилось в 558 раз (по сравнению с круглосуточно работающим компьютером на базе процессора Intel Core 2 Duo E6300 1,86 ГГц). В расчетах приняли участие более 1300 добровольцев (900 компьютеров) из 69 стран мира, обеспечивая среднюю производительность проекта, по данным [22], на уровне 2—2,5 Tflops (3 Tflops во время 5-дневного командного соревнования “Breaking Dawn”, объявленного командой IBM).

Последовательная часть расчетов (постобработка) включает в себя вычисления средне-выборочных значений критериев  $\gamma_x$  по каждой из выборок в отдельности и вероятностей  $\rho_x$  путем сопоставления выборок, полученных разными методами синтеза разбиений, для заданной точки пространства параметров [13]. Время постобработки составило порядка нескольких десятков—сотен часов для каждого вычислительного эксперимента, основным ограничением является скорость чтения большого объема данных (174 ГБ для выполненных расчетов) с жесткого диска, представленного множеством мелких файлов. В результате постобработки получены карты (двумерные массивы), представляющие собой набор срезов пространства параметров (рис. 1), общим объемом порядка нескольких десятков мегабайт. Полученные карты используются в дальнейшем для детального сравнения методов синтеза разбиений.

В соответствии с работами [12—14] для анализа применимости различных эвристиче-

ских методов выбраны следующие срезы пространства параметров:

- 1)  $3 \leq W_{\max} \leq 200$ ,  $1 \leq N \leq 600$  при  $X_{\max} = +\infty$  и  $Y_{\max} = +\infty$ ;
- 2)  $4 \leq X_{\max} \leq 150$ ,  $1 \leq N \leq 700$  при  $W_{\max} = +\infty$  и  $Y_{\max} = +\infty$ .

Верхняя граница для диапазона изменения ограничений в экспериментах определяется расположением границ „загиба“ (дальнейшее ослабление ограничений нецелесообразно для выбранного диапазона изменения  $N$ ), максимальная размерность задачи увеличена по сравнению с предыдущими экспериментами.

Общий вид зависимостей средневыворочных значений частных показателей качества  $\gamma_x$  от размерности задачи и силы ограничения приведен на рис. 2 (штриховка — область нечувствительности). Экспериментально полученные двумерные поверхности дают общее представление о виде соответствующих функциональных зависимостей и могут быть полезны, например, при выполнении структурно-параметрической оптимизации СЛУ [24], однако для сопоставления различных эвристических методов они наименее показательны. С целью выявления областей качественного превосходства соответствующих методов была произведена оценка вероятностей  $\rho_x$  получения разбиений с минимальным значением выбранного частного показателя качества и были отмечены области пространства параметров, в которых соответствующие методы характеризуются максимальным значением указанной вероятности. Для указанных выше срезов получены результаты, дополняющие исследования [12], которые приведены на рис. 3 и 4 (Р — метод параллельно-последовательной декомпозиции, В — метод С. И. Баранова, АВ — смежный жадный метод).

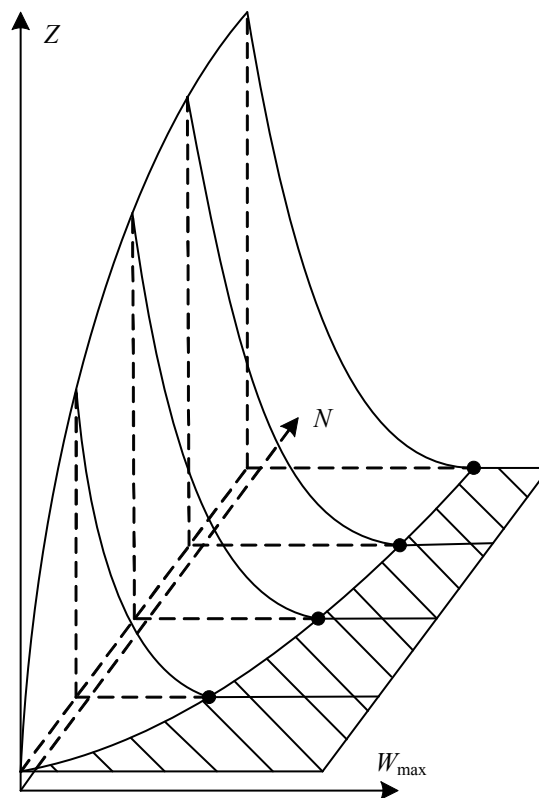


Рис. 2

Общей тенденцией, выявленной в ходе анализа приведенных результатов, является то, что метод С. И. Баранова [6, 7] демонстрирует преимущество в области слабых ограничений, метод параллельно-последовательной декомпозиции [4, 5] — в области сильных (местами очень сильных) ограничений, а метод, основанный на жадной последовательной стратегии с ограничением на смежность [8, 9], занимает промежуточное положение в области ограничений средней силы. С ростом размерности задачи  $N$  ширина области преимущества метода

С. И. Баранова уменьшается для большинства показателей качества. Следует ожидать, что при дальнейшем росте  $N$  метод С. И. Баранова в области слабых ограничений будет окончательно вытеснен методом, основанным на смежной жадной стратегии, однако для этого потребуются дополнительные вычислительные эксперименты в области  $N > 700$ .

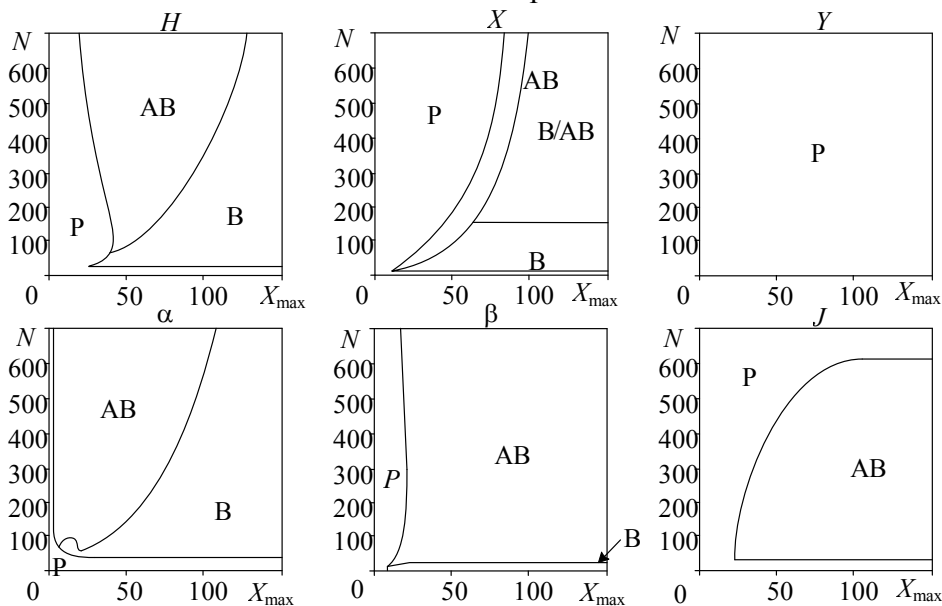


Рис. 3

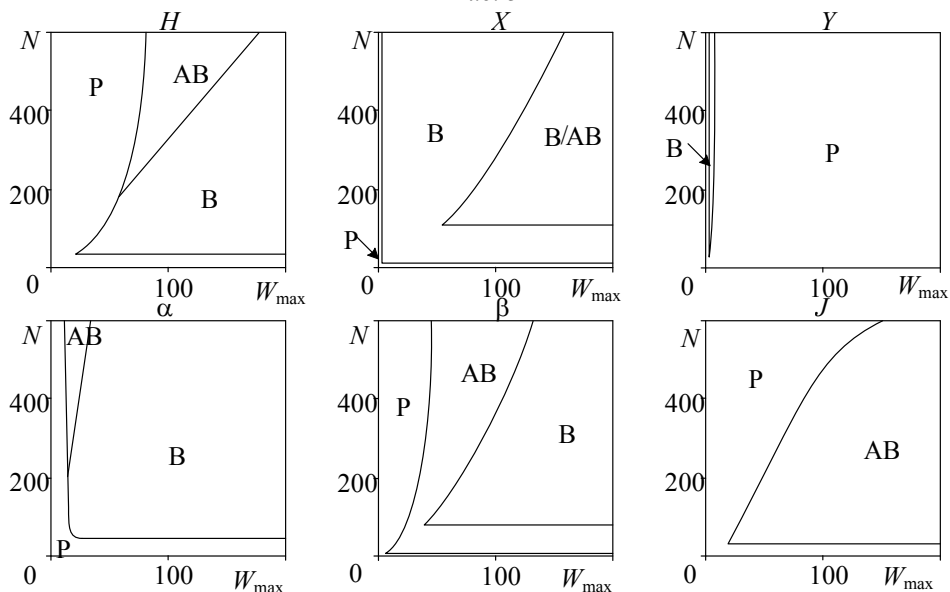


Рис. 4

Предложенный в работе [8] метод, основанный на смежной жадной стратегии синтеза разбиения, имеет наибольшие преимущества по сравнению с методом С. И. Баранова в следующих областях пространства параметров:

- по  $Z_X$  в области  $X_{max} = 50 \pm 20$ ,  $N = 500 \pm 200$ ;
- по  $Z_\alpha$  в области  $X_{max} = 80 \pm 70$ ,  $W_{max} = 110 \pm 90$ ,  $N = 400 \pm 300$ ;
- по  $Z_\delta$  в области  $X_{max} = 90 \pm 60$ ,  $W_{max} = 140 \pm 60$ ,  $N = 450 \pm 250$ ;

по сравнению с методом параллельно-последовательной декомпозиции:

- по  $Z_H$  в области  $X_{max} = 15 \pm 10$ ,  $W_{max} = 25 \pm 15$ ,  $N = 500 \pm 200$ ;
- по  $Z_X$  в области  $X_{max} = 35 \pm 15$ ,  $N = 500 \pm 200$ ;
- по  $Z_\delta$  в области  $W_{max} = 30 \pm 20$ ,  $N = 350 \pm 250$ .

Авторы статьи выражают благодарность всем добровольцам, принявшим участие в проекте Gerasim@Home и обсуждении деталей адаптации расчетного модуля под BOINC Грид, а также лично Сергею Юрьевичу Валяеву (SerVal) за предоставление технической возможности использования проекта Gerasim@Home для организации распределенных вычислений и ряд ценных советов и замечаний.

Работа выполнена в рамках государственного задания для Юго-Западного государственного университета на 2014—2017 гг., НИР № 2246; а также в рамках научной школы НШ-2357.2014.8.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянов С. Г., Зотов И. В., Титов В. С. Архитектура параллельных логических мультиконтроллеров. М.: Высш. школа, 2009. 233 с.
2. Ватутин Э. И., Зотов И. В., Титов В. С. и др. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультиконтроллеров. Курск: Изд-во КурскГТУ, 2010. 200 с.
3. Ватутин Э. И. Проектирование логических мультиконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 292 с.
4. Ватутин Э. И., Зотов И. В. Метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'04). М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2004. С. 884—917.
5. Ватутин Э. И., Зотов И. В. Параллельно-последовательный метод формирования субоптимальных разбиений параллельных управляющих алгоритмов. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2005613091 от 28.11.05.
6. Баранов С. И., Журавина Л. Н., Песчанский В. А. Обобщенный метод декомпозиции граф-схем алгоритмов // АиВТ. 1982. № 5. С. 43—51.
7. Ватутин Э. И. Библиотека функций построения разбиений методом С.И. Баранова с жадным последовательным формированием блоков. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010612902 от 28.04.10.
8. Ватутин Э. И., Леонов М. Е. Использование смежной окрестности при жадном последовательном формировании блоков разбиения граф-схем параллельных алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 6. С. 30—35.
9. Ватутин Э. И., Титов В. С. Библиотека функций для построения разбиений с использованием смежной жадной стратегии и последовательным формированием блоков. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013619395 от 03.10.13.
10. Ватутин Э. И., Волобуев С. В., Зотов И. В. Комплексная сравнительная оценка методов выбора разбиений при проектировании логических мультиконтроллеров // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'08). М.: ИПУ РАН, 2008. С. 1917—1940.
11. Ватутин Э. И., Волобуев С. В., Зотов И. В. Комплексный сравнительный анализ качества разбиений при синтезе логических мультиконтроллеров в условиях присутствия технологических ограничений // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'08). М.: ИПУ РАН, 2008. С. 643—685.
12. Ватутин Э. И., Титов В. С. Сравнение методов синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления с использованием двухпараметрических диаграмм // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации (Распознавание — 2012). Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2012. С. 138—140.
13. Ватутин Э. И., Титов В. С. Использование добровольных распределенных вычислений на платформе BOINC для анализа качества разбиений граф-схем параллельных алгоритмов // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'12). М.: ИПУ РАН, 2012. С. 37—54.
14. Ватутин Э. И., Титов В. С. Сравнение методов синтеза разбиений граф-схем параллельных алгоритмов с использованием двумерных диаграмм // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. 2012. № 3 (42). С. 66—74.

15. *Vatutin E. I.* Constructing Random Sample Parallel Logic Control Algorithms // 11<sup>th</sup> Intern. Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad, BOAC'06). St-Petersburg, 2006. P. 162—166.
16. *Ватутин Э. И.* Анализ эффективности и программная оптимизация методов синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления в среде PAE // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2. Ч. 1. С. 191—195.
17. *Ватутин Э. И., Титов В. С.* Алгоритмическая оптимизация программной реализации метода параллельно-последовательной декомпозиции граф-схем параллельных алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 6. С. 23—29.
18. *Ватутин Э. И., Валяев С. Ю.* Расчетный модуль для построения разбиений параллельных алгоритмов логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013618013 от 28.08.13.
19. *Заикин О. С., Посыпкин М. А., Семенов А. А., Храпов Н. П.* Опыт организации добровольных вычислений на примере проектов OPTIMA@home и SAT@home // Вестн. ННГУ. 2012. № 5(2). С. 338—346.
20. *Заикин О. С., Посыпкин М. А., Семенов А. А., Храпов Н. П.* Организация добровольных вычислений на платформе BOINC на примере проектов OPTIMA@home и SAT@home // CAD/CAM/CAE Observer. 2012. № 3 (71). С. 87—92.
21. *Posypkin M., Semenov A., Zaikin O.* Using BOINC desktop grid to solve large scale SAT problems // Computer Science. 2012. N 13 (1). P. 25—34.
22. [Электронный ресурс]: <<http://boincstats.com>>.
23. [Электронный ресурс]: <<http://gerasim.boinc.ru>>.
24. *Ватутин Э. И., Титов В. С.* Структурно-параметрическая оптимизация систем логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. Сер. „Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение“. 2012. № 2. Ч. 1. С. 12—17.

**Сведения об авторах**

- Эдуард Игоревич Ватутин** — канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск;  
E-mail: [evatutin@rambler.ru](mailto:evatutin@rambler.ru)
- Виталий Семенович Титов** — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра вычислительной техники, Курск; заведующий кафедрой;  
E-mail: [titov-kstu@rambler.ru](mailto:titov-kstu@rambler.ru)

Рекомендована Юго-Западным  
государственным университетом

Поступила в редакцию  
10.09.14 г.