

Э.И. ВАТУТИН, В.С. ТИТОВ

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

Приведено описание результатов 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-схемы параллельных алгоритмов, 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 коллектив взаимосвязанных параллельно работающих однотипных контроллеров, в совокупности решающих задачу по реализации заданного параллельного алгоритма логического управления. При проектировании подобных систем возникает ряд задач дискретной комбинаторной оптимизации, одной из которых является задача отыскания субоптимально-

го разбиения априорно известной граф-схемы параллельного алгоритма логического управления на последовательные блоки ограниченной сложности, каждый из которых реализуется одним из контроллеров в составе ЛМК. Задача относится к классу NP , что не позволяет произвести отыскание ее оптимального решения для задач практически важной размерности за приемлемое время, поэтому для ее решения известны и с успехом применяются различные эвристические методы [4–9], существенно отличающиеся 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 $Sep(A^0) = \{A_1, A_2, \dots, A_H\}$ 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 ω – обозначение бинарного отношения 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 на прием контроллером сигналов логического управления);

$Y(A_i) = \bigcup_{a_j \in A_i} Y(a_j)$ – множество микроопераций, входящих в вершины i -го блока (число дорожек на выдачу контроллером сигналов микроопераций), такое что

$$Z_H = H \left(Sep(A^0) \right) \rightarrow \min ,$$

$$Z_\alpha = \sum_{i=1}^H \sum_{j=1, j \neq i}^H \alpha(A_i, A_j) \rightarrow \min ,$$

$$Z_\delta = \delta \left(Sep(A^0) \right) \rightarrow \min ,$$

$$Z_X = \sum_{i=1}^H |X(A_i)| - |X(A^0)| \rightarrow \min ,$$

$$Z_Y = \sum_{i=1}^H |Y(A_i)| - |Y(A^0)| \rightarrow \min ,$$

где Z_H – число блоков в разбиении; Z_α – сложность сети межблочных связей, порождаемая разбиением $Sep(A^0)$; $\alpha(A_i, A_j)$ – коэффициент связи блоков (он равен 1, если блоки разбиения связаны по управлению в направлении от A_i к A_j , т.е. необходима команда межконтроллерной передачи управления, и 0 в противном случае); Z_δ – 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 априорно заданной выборки $\Lambda = \{G_1^0, G_2^0, \dots, G_K^0\}$ из K тестовых примеров G_k^0 , $k = \overline{1, K}$ (граф-схем параллельных алгоритмов в данном случае) с целью выяснения средних значений оптимизируемых показателей качества (и, соответственно, доверительных интервалов) и построение кривых полученного распределения, показывающих, в скольких случаях качество оптимизации выбранного критерия x ухудшается на заданную величину $\Delta\gamma_x$ (в абсолютных или относительных единицах). Выборка граф-схем алгоритмов Λ во всех экспериментах формируется с использованием генератора граф-схем алгоритмов с псевдослучайной структурой [15].

Подобное сравнение методов приведено в работе [10] (см. рис. 1, в), вре-

менные затраты на выполнение подобного эксперимента составляют величину порядка нескольких минут – нескольких часов в расчете на один эксперимент.

Спецификой рассматриваемой задачи является наличие существенного влияния 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 значений технологических ограничений X_{\max} (ограничение на число принимаемых контроллером сигналов логических условий от объекта управления), Y_{\max} (ограничение на число выдаваемых контроллером сигналов микроопераций для объекта управления) и W_{\max} (ограничение на емкость памяти контроллера), диктуемых элементной базой и особенностями схемотехнической реализации СЛУ, и размерности задачи, определяемой в данном случае числом вершин N в составе граф-схемы алгоритма управления. Учитывая возможность 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] было выполнено частичное его исследование путем изменения одного из параметров в заданном диапазоне при неизменных значениях остальных (см. рис. 1 г, д), в результате чего были получены одномерные графики зависимостей γ_x (средне выборочное значение показателя x) и ρ_x (вероятность получения решения с наименьшим значением минимизируемого критерия x) от изменяемого параметра $y \in \{X_{\max}, W_{\max}, N\}$. Временные затраты для получения подобных графиков зависимостей составляют величину порядка нескольких часов – десятков часов процессорного времени в расчете на один эксперимент. Для полученных графиков была выявлена зонная структура: в различных областях значений ограничений (слабые, сильные, очень сильные) методы демонстрируют различное качество минимизации различных частных

показателей, не позволяя выявить однозначно лучшего.

В работах [12–14] было предложено проведение сравнения методов синтеза разбиений с использованием двухпараметрических диаграмм (карт), показывающих зависимость значений γ_x и ρ_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 является достаточно ресурсоемким процессом (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, следуя 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 $Sep_{F_i}(A_j^0)$, где F_i – i -й метод построения разбиений, в составе выборки граф-схем алгоритмов Λ , соответствующей каждой из точек на карте, могут быть построены параллельно.

При ориентации вычислений на использование грид [18] время вычисления расчетного задания (англ. Work Unit, WU) не должно быть как очень маленьким, так и очень большим, и желательно должно составлять от нескольких минут до нескольких часов, что реализовано в виде следующего использования обозначенных выше стратегий: согласно первой стратегии выборки граф-схем алгоритмов для различных точек пространства параметров формируются параллельно на различных машинах, входящих в состав грид (1 стратегия распараллеливания); построение разбиений в рамках выборки производится последовательно. С ростом размерности задачи последовательное построение выборки с

результатами также становится достаточно время затратным, поэтому при $N > 500$ соответствующие выборки разбиваются на подвыборки, обрабатываемые параллельно (2 стратегия распараллеливания). При этом достигается эффективное использование вычислительных ресурсов (с близкой к 100% загрузкой).

В качестве инструментария для организации параллельных вычислений использованы технические возможности платформы добровольных распределенных вычислений BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing), активно используемой в ряде широко известных проектов распределенных вычислений (SETI@Home, Einstein@home, LHC@Home и др.). В России на платформе BOINC работает ряд проектов (SAT@Home, OPTIMA@Home, NetMax@Home [19–21]). Инфраструктура BOINC представляет собой распределенную грид-систему из более чем 6,5 млн. существенно неоднородных, географически удаленных вычислительных узлов, поддерживаемых более чем 2 млн. добровольцев, характеризующуюся суммарной интегральной производительностью порядка 7–8 PFLOPS [22].

Серверная часть кода, реализованная в рамках проекта распределенных вычислений Gerasim@home [23], выполняет функции управления выдачей расчетных заданий (исходный файл с параметрами расчета в формате XML размером несколько сотен байт) на удаленные клиентские машины по их запросу из программного модуля BOINC Manager, а также приема полученных результатов (результатирующий бинарный файл с выборкой значений показателей качества размером около 200 КБ без учета сжатия). С целью защиты от потенциальных ошибок различного характера каждое расчетное задание было обработано в двух экземплярах на различных машинах (кворум) с последующей побайтной сверкой полученных результатов (валидация).

Затраты вычислительного времени на проведенный эксперимент с использованием грид-инфраструктуры составили в общей сложности около 97 лет машинного времени (29,6 EFLOPs или 469 ГГц-лет, приведенные цифры не учи-

тывают вычислительные затраты выполненных ранее экспериментов [12–14], данные которых использованы в сравнении), достигнутый выигрыш во времени обработки по сравнению с реализацией расчетов на одной машине составил 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 TFLOP/s (3 TFLOP/s во время 5-дневного командного соревнования «Breaking Dawn», объявленного командой IBM).

Последовательная часть расчетов (постобработка) включает в себя расчет средневыборочных значений критериев γ_x по каждой из выборок в отдельности и вероятностей ρ_x путем сопоставления выборок, полученных разными методами синтеза разбиений, для выбранной точки пространства параметров [13]. Время постобработки составляет величину порядка нескольких десятков – сотен часов для каждого вычислительного эксперимента, основным ограничением при этом 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.

Следуя работам [12–14], для анализа применимости различных эвристических 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 N увеличена по сравнению с предыдущими экспериментами.

Общий вид зависимостей средне выборочных значений частных показателей качества γ_x от размерности задачи и силы ограничения приведен на рис. 2. Данные двумерные поверхности, полученные экспериментально, дают общее представление о виде соответствующих функциональных зависимостей и могут быть полезны, например, при выполнении структурно-параметрической оптимизации СЛУ [24], однако с точки зрения сопоставления различных эвристических методов они наименее показательны. С целью выявления областей качественного превосходства соответствующих методов была произведена оценка вероятностей ρ_x получения разбиений с минимальным значением выбранного частного показателя качества и отметка соответствующих областей пространства параметров, в которых соответствующие методы характеризуются максимальным значением указанной вероятности. Для указанных выше срезов полученные результаты, дополняющие [12], которые приведены на рис. 3 и 4.

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 $N > 700$. Предложенный в работе [8] метод, основанный на смежной жадной стратегии синтеза разбиения, имеет наибольшее превосходство над методом С.И. Баранова в следующих областях про-

странства параметров:

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

над 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_δ 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 Валяеву Сергею Юрьевичу (SerVal) за предоставление технической возможности использования проекта Gerasim@Home для организации распределенных вычислений и ряд ценных советов и замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архитектура параллельных логических мультиконтроллеров / *Емельянов С.Г., Зотов И.В., Титов В.С.* М.: Высшая школа, 2009. 233 с.
2. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультиконтроллеров / *Ватутин Э.И., Зотов И.В., Титов В.С.* и др. 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.: Институт 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 // Свидетельство об официальной 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 // Свидетельство о государственной 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 // *Известия высших учебных заведений. 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 // Свидетельство о госу-

- дарственной 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 // Известия Юго-Западного государственного университета. № 3 (42), 2012. С. 66–74.
 15. *Vatutin E.I.* Constructing Random Sample Parallel Logic Control Algorithms // 11th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad, BOAC'06). Saint-Petersburg, 2006. PP. 162–166.
 16. *Ватутин Э.И.* Анализ эффективности и программная оптимизация методов синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления в среде PAE // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. № 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 // Известия высших учебных заведений. 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 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618013 от 28.08.13.
 19. *Заикин О.С., Посыпкин М.А., Семёнов А.А., Храпов Н.П.* Опыт организации добровольных вычислений на примере проектов OPTIMA@home и SAT@home // Вестник ННГУ. № 5(2). 2012. С. 338–346.
 20. *Заикин О.С., Посыпкин М.А., Семёнов А.А., Храпов Н.П.* Организация добровольных вычислений на платформе BOINC на примере проектов OPTIMA@home и SAT@home // CAD/CAM/CAE Observer # 3 (71) / 2012. С. 87–92.
 21. *Posypkin, Mikhail and Semenov, Alexander and Zaikin, Oleg* (2012) Using BOINC desktop grid to solve large scale SAT problems. Computer Science, 13 (1). pp. 25–34.
 22. <http://boincstats.com>
 23. <http://gerasim.boinc.ru>
 24. *Ватутин Э.И., Титов В.С.* Структурно-параметрическая оптимизация систем логического управления с использованием добровольных распределенных вычислений // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2012. № 2. Ч. 1. С. 12–17.

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
01.06.2014

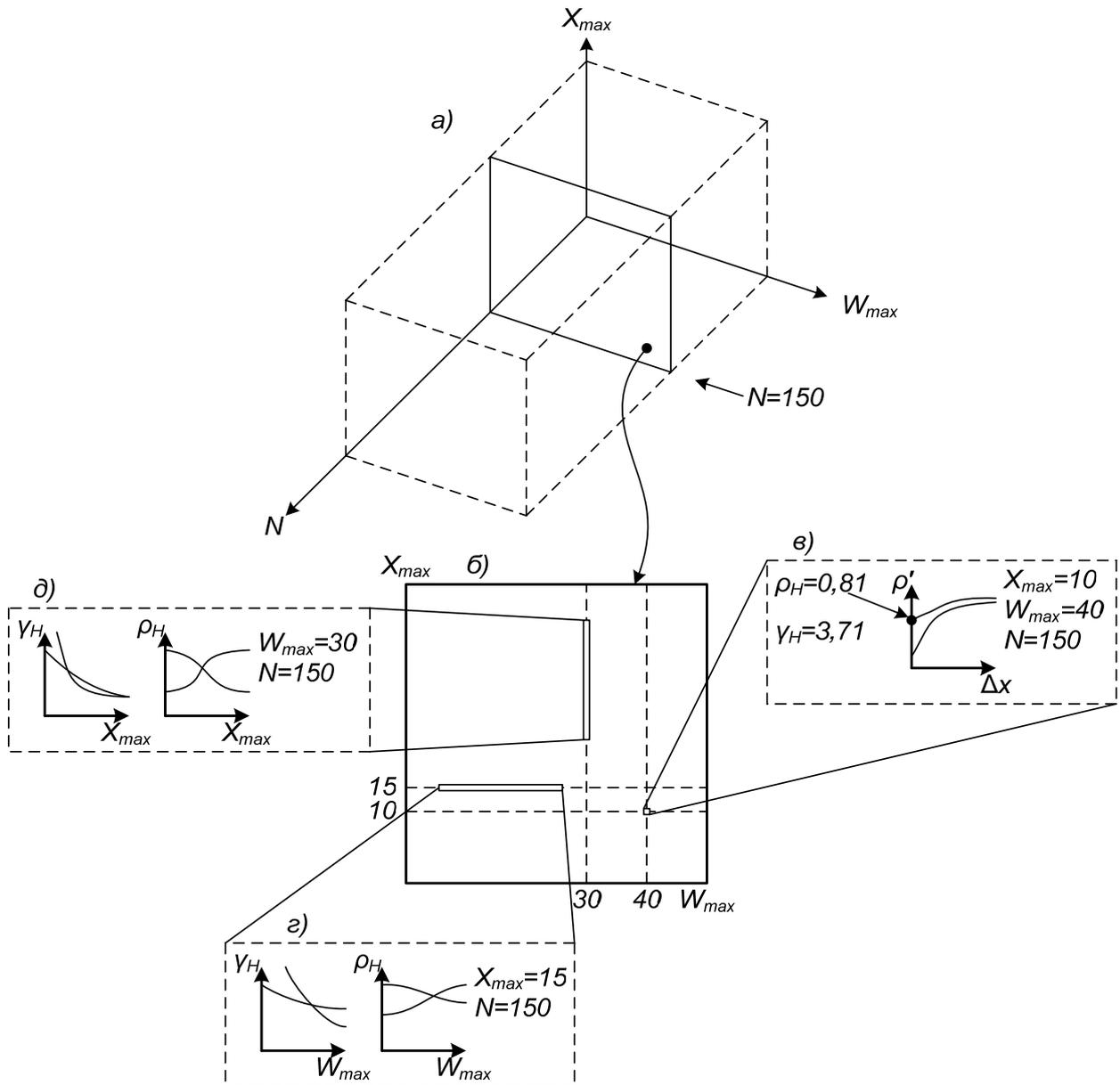


Рис. 1. Пространство параметров (а), карта в разрезе параметров (X_{max} , W_{max}) (б) и ранние вычислительные эксперименты (в, г, д)

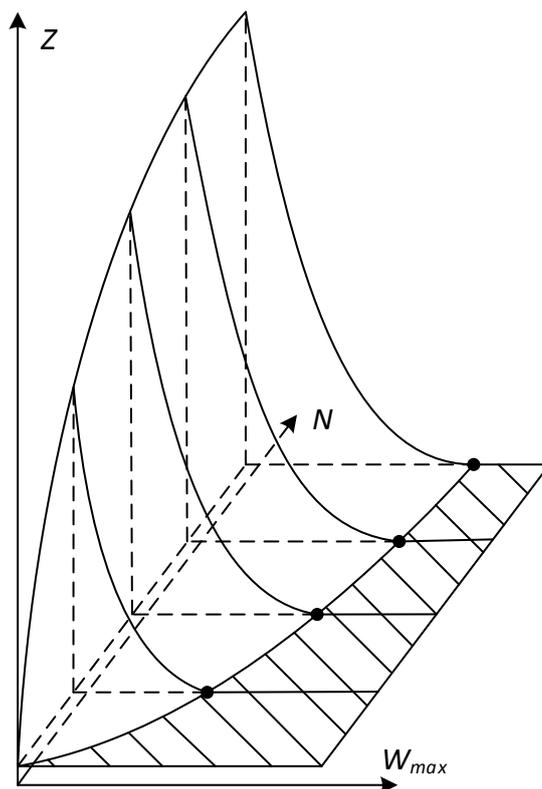


Рис. 2. Общий вид зависимостей частных показателей качества от размерности задачи и силы ограничения. Штриховкой показана область нечувствительности

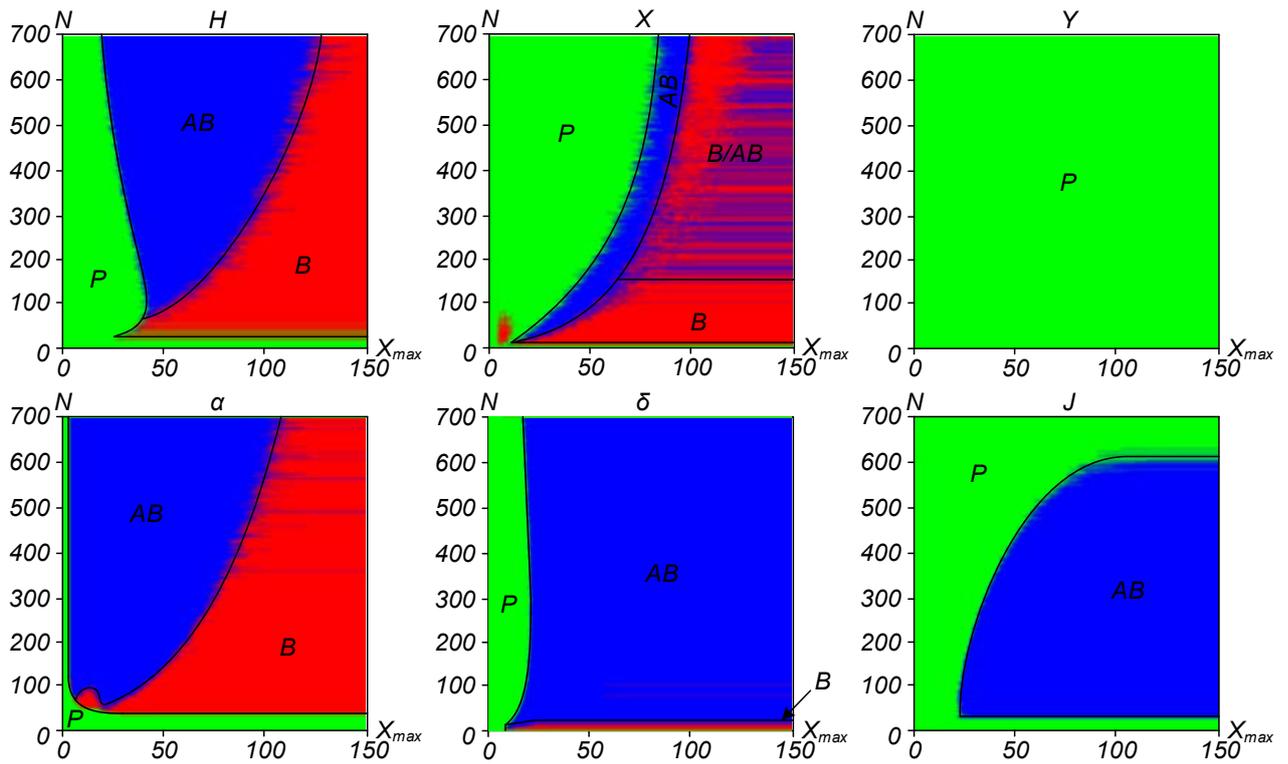


Рис. 3. Области качественного превосходства методов (зеленый – метод параллельно-последовательной декомпозиции, красный – метод С.И. Баранова, синий – смежный жадный метод)

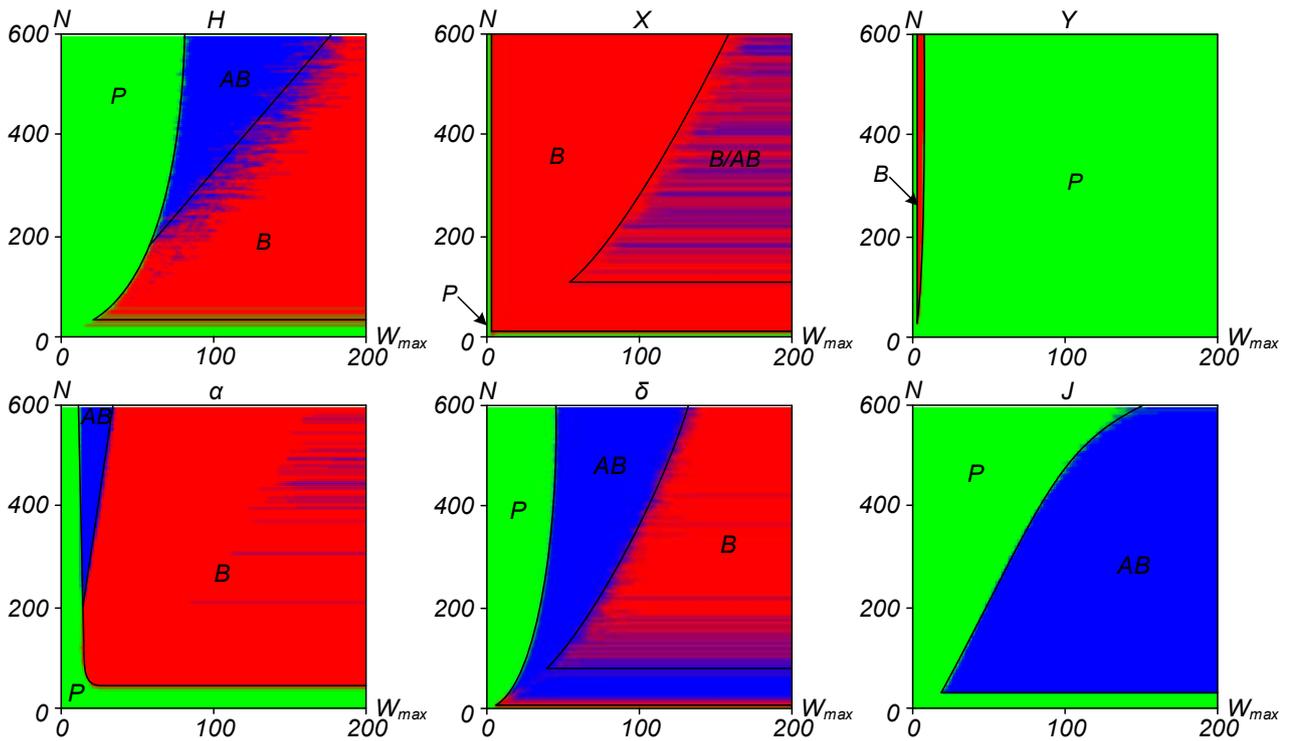


Рис. 4. Области качественного превосходства методов (зеленый – метод параллельно-последовательной декомпозиции, красный – метод С.И. Баранова, синий – смежный жадный метод)

SUPERIORITY AREAS ANALYSIS OF SEQUENTIAL HEURISTIC METHODS FOR GETTING SEPARATIONS DURING LOGICAL MULTICONTROLLES DESIGN

Abstract. Description of superiority areas of heuristic methods at multidimensional restrictions space during logical control systems design within logical multicontrolles approach is given.

Keywords. Logical control system, logical multicontrollers design, separations, parallel graph-schemes of algorithms, heuristic methods, discrete combinatorial optimization, BOINC