

© 2012 г. Э.И. ВАТУТИН, канд. техн. наук
В.С. ТИТОВ, д-р техн. наук
(Юго-западный государственный университет, Курск)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОБРОВОЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ПЛАТФОРМЕ BOINC ДЛЯ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА РАЗБИЕНИЙ ГРАФ-СХЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ

В работе приведено описание выполненных вычислительных экспериментов, целью которых являлось сравнение качества разбиений параллельных алгоритмов логического управления, полученных эвристическими методами, с использованием двумерных диаграмм (карт). Вычисления проведены с использованием возможностей платформы BOINC в рамках проекта Gerasim@Home. Получены новые результаты, уточняющие рекомендации по областям преимущественного использования методов синтеза разбиений в пределах пространства параметров $(X_{\max}, W_{\max}, N)$. Получены границы областей нечувствительности для методов синтеза разбиений, позволяющие сформулировать требования для разработчиков аппаратной части логических мультиконтроллеров с целью выполнения структурно-параметрической оптимизации.

USING VOLUNTEER DISTRIBUTED COMPUTING ON BOINC PLATFORM FOR QUALITY ANALYSIS OF SEPARATIONS OF PARALLEL LOGIC CONTROL ALGORITHMS / E.I. Vatutin (South West State University, 94 50 Let Oktyabrya, Kursk 305040, Russia, E-mail: evatutin@rambler.ru), V.S. Titov (South West State University, 94 50 Let Oktyabrya, Kursk 305040, Russia, E-mail: titov-kstu@rambler.ru). The article presents detailed description of computational experiments aimed to compare quality of separations of parallel logic control algorithms given by different heuristic methods using two-dimensional diagrams (maps). Calculations was performed using BOINC grid under Gerasim@Home project. New recommendations for areas of preferable using of methods within parameters space $(X_{\max}, W_{\max}, N)$ are showed. Boundaries of insensitivity for different methods are discovered. They are allow to formulate requirements for developers of hardware part of multicontrollers and can be used during structural-parametric optimization.

1. Введение

Одним из перспективных подходов к синтезу многомодульных однородных систем логического управления (СЛУ) является их реализация в базисе логических мультиконтроллеров (ЛМК) [1–4]. Подобные системы, представляющие собой коллектив параллельно работающих однотипных логических контроллеров, способны выполнять комплексные параллельные управляющие алгоритмы теоретически неограниченной сложности за счет их декомпозиции на компоненты, распределяемые между модулями, что обеспечивает гибкость, контролепригодность и отказоустойчивость.

Построение ЛМК сопряжено с необходимостью решения ряда оптимизационных задач на дискретных структурах. Особое место среди них занимает задача выбора субоптимального разбиения априорно известной граф-схемы параллельного алгоритма логического управления. Качество ее решения напрямую влияет на аппаратную сложность мультиконтроллера и определяет время выполнения алгоритма управления.

Обозначенная задача относится к классу NP и не допускает получение ее точного решения (за приемлемое время) для алгоритмов управления, содержащих более 15 вершин. Для ее решения известны [1, 2] различные эвристические методы, существенно отличающиеся по ряду ключевых характеристик, к которым в первую очередь относятся трудоемкость реализации, асимптотическая временная и емкостная сложности, состав оптимизируемых частных показателей качества и интегральное качество получаемых решений. Одним из методов является развиваемый авторами метод параллельно-

последовательной декомпозиции [5, 6], основанный на серии эквивалентных преобразований исходной граф-схемы алгоритма и синтезирующий результирующее разбиение путем анализа последовательности таблиц включений.

Вычислительные эксперименты по оценке качества получаемых решений, проводимые в разработанной среде РАЕ [7, 8], подтвердили его превосходство по сравнению с известными аналогами в условиях присутствия технологических ограничений, налагаемых элементной базой [9, 10], однако ряд тенденций, связанных в основном с поведением методов по мере роста среднего числа вершин N в граф-схемах алгоритмов управления, остался неисследованным.

Общепринятой стратегией сравнения эвристических методов является использование 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 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 показателя x ухудшается на заданную величину $\Delta\gamma_x$ (в абсолютных или относительных единицах). Подобное сравнение методов приведено в работе [9] (см. рис. 1, в), временные затраты на выполнение подобного эксперимента составляют величину порядка нескольких минут в расчете на один эксперимент. (Выборка граф-схем алгоритмов во всех экспериментах была получена с использованием генератора граф-схем алгоритмов с псевдослучайной структурой [9, 11].)

Спецификой рассматриваемой задачи является наличие существенного влияния на качество оптимизации частных показателей 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), $Y_{\max}$ (ограничение на число выдаваемых контроллером сигналов микроопераций) и $W_{\max}$ (ограничение на емкость памяти контроллера), диктуемых элементной базой, и размера N граф-схемы алгоритма управления, определяемого числом вершин в ее составе. Учитывая возможность беспрепятственного обхода ограничения $Y_{\max}$ путем дублирования мультиконтроллера в СЛУ [1, 2], фактически задача исследования поведения эвристических методов синтеза разбиений сводится к исследованию различных областей пространства параметров $\{X_{\max}, W_{\max}, N\}$. В работе [10] 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 (среднее значение показателя x) и ρ_x (вероятность получения решения с наименьшим значением минимизируемого показателя x) от изменяемого параметра $y \in \{X_{\max}, W_{\max}, N\}$. Временные затраты для получения подобных графиков зависимостей составляют величину порядка нескольких 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 демонстрировали различное качество решений, не позволяя выявить однозначно лучшего.

Дальним развитием экспериментов является исследование обоюдного влияния параметров на качество решений. Для этого необходим анализ качества разбиений выборок граф-схем алгоритмов объемом в сотни–тысячи граф-схем (с целью уменьшения доверительных интервалов для получаемых усредненных оценок), а также необходимо исследование поведения методов в условиях наличия ограничений. Необходимые вычислительные затраты составляют величину порядка десятков–сотен лет вычислительного

времени, а интересующие эксперименты невозможны без использования параллельных вычислительных систем.

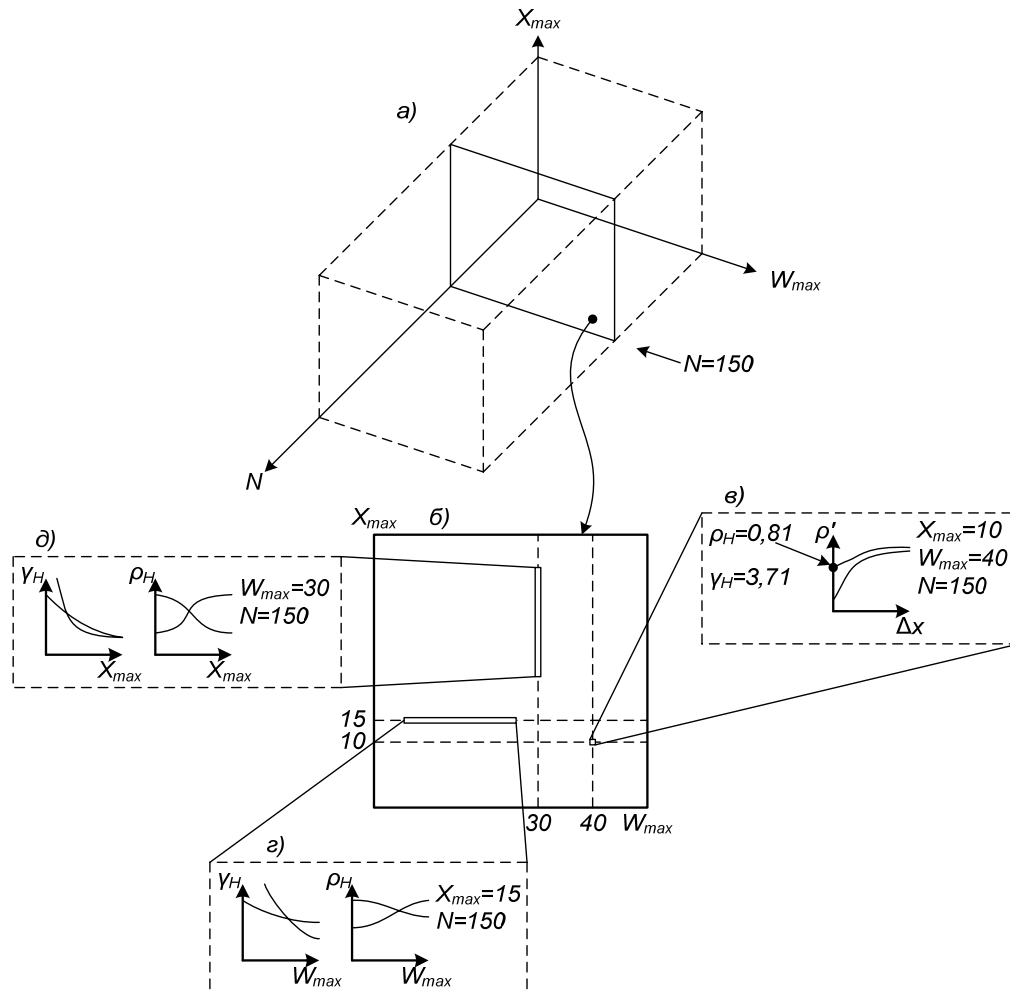


Рис. 1. Пространство параметров (а), карта в разрезе параметров (X_{max}, W_{max}) (б) и ранние вычислительные эксперименты (в, г, д)

В данной работе приведены новые результаты 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 (в особенности с ростом N), однако поставленная задача является слабосвязанной и, следовательно, может быть эффективно распараллелена.

- 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 $Sep_{F_i}(A_j^0)$ в составе выборки граф-схем алгоритмов Λ , соответствующей каждой из точек на карте, могут быть построены параллельно.

Последовательная часть расчетов (постобработка) включает в себя расчет значений γ_x и ρ_x для полученных в ходе вычислительных экспериментов выборок значений показателей качества.

2. Стратегия распараллеливания вычислений и ее техническая реализация

В качестве инструментария для организации параллельных вычислений использованы технические возможности платформы добровольных распределенных вычислений BOINC (Berkeley Open Infrastructure for Network Computing) [13, 14], активно используемой в ряде широко известных проектов распределенных вычислений (SETI@Home, Einstein@home, LHC@Home и др.) [14–16]. 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 5–6 PFLOPS [17].

Учитывая особенности и рекомендации к организации процесса вычислений на данной платформе, вычисления были распараллелены на уровне координат исследуемого пространства параметров (первая стратегия среди представленных выше), каждая из выборок граф-схем алгоритмов обрабатывалась последовательно в рамках одного расчетного задания, время выполнения которого составляло от нескольких секунд (область малых значений N) до 5–6 часов (область больших значений N). Использование потенциала многоядерных процессоров и многопроцессорных машин при этом реализовано с использованием возможностей клиентской программы BOINC Manager путем параллельного выполнения нескольких заданий с использованием SIMD-принципа (в данном случае, один расчетный модуль, запускаемый с разными входными параметрами) с близкой к 100% загрузкой всех доступных процессорных ядер, что весьма удобно в данной задаче, т.к. позволяет не производить более трудоемкое и менее эффективное в задаче исследования пространства параметров ручное распараллеливание расчетного кода методов синтеза разбиений.

Серверная часть кода, реализованная в рамках проекта распределенных вычислений Gerasim@home [18], 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 программы 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 трех экземплярах на разных машинах (т.н. кворум, равный трем) с последующей побайтной сверкой полученных результатов (т.н. валидация). Схематично организованный процесс вычислений представлен на рис. 2.

Затраты вычислительного времени на проведенные эксперименты с использованием грид-инфраструктуры составили в общей сложности около 170 лет машинного времени (51,6 EFLOPs или 818 ГГц-лет), достигнутый выигрыш во времени обработки по сравнению с реализацией расчетов на одной машине составил 155 раз (оценки выполнены круглосуточно работающего компьютера с процессором Intel Core 2 Duo E6300 1,86 ГГц, 2 ядра). В расчетах приняли участие более 1000 добровольцев (1100 компьютеров) из 61 страны мира, обеспечивая среднюю производительность проекта по данным [17] на уровне 1 TFLOPS. Объем полученных в ходе эксперимента «сырых» данных составил 235 ГБ.

Постобработка результатов заключалась в расчете средневыворочных значений показателей γ_x по каждой из выборок в отдельности и вероятностей p_x путем сопоставления выборок, полученных разными методами, для выбранной точки пространства параметров (рис. 3). Время постобработки составило величину порядка 5–23 часов для каждого вычислительного эксперимента, основным ограничением при этом является скорость чтения большого объема данных с жесткого диска.

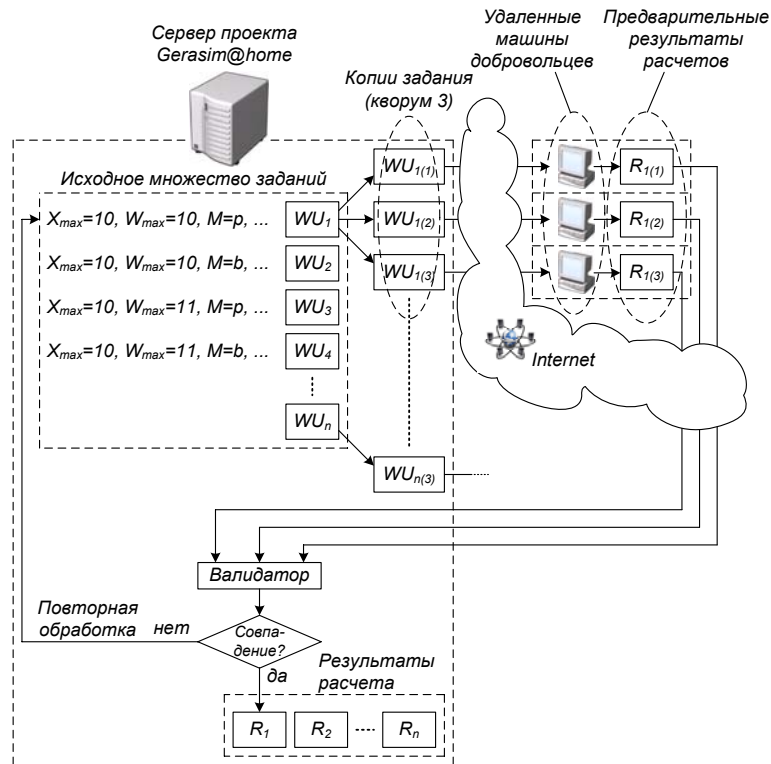


Рис. 2. Схематичное изображение процесса расчета с использованием распределенной грид-системы платформы BOINC. Здесь WU_i – i -е расчетное задание (WU – work unit), $WU_{i(j)}$ – i -е расчетное задание с учетом кворума, R_i – результат обработки i -го расчетного задания, $R_{i(j)}$ – результат обработки i -го расчетного задания с учетом кворума.

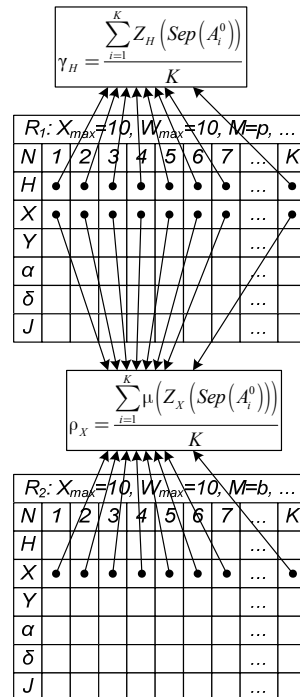


Рис. 3. Схематическое изображение процесса постобработки результатов. Здесь $Z_x(\text{Sep } A)$ – значение показателя качества $x \in \{H, X, Y, \alpha, \delta, J\}$ в разбиении $\text{Sep } A$, H – число блоков, X – дублирование логических условий, Y – дублирование микроопераций, α – сложность сети межблочных связей, δ – интенсивность межблочных взаимодействий, J – интегральный показатель качества, $\mu(Z_x) \in \{0, 1\}$ – функция, равная единице в случае, если найденное разбиение по показателю качества x лучше разбиений, полученных другими методами.

В результате постобработки были получены карты (двумерные массивы), представляющие собой набор срезов пространства параметров, общим объемом 96 МБ. Полученные карты были использованы в дальнейшем для детального сравнения методов синтеза разбиений, результаты которого представлены ниже.

3. Результаты вычислительных экспериментов

С целью исследования пространства параметров были выполнен ряд вычислительных экспериментов, основными среди которых являются:

- 1) $3 \leq W_{\max} \leq 200$, $1 \leq N \leq 600$ при $X_{\max} = +\infty$ и $Y_{\max} = +\infty$;
- 2) $4 \leq X_{\max} \leq 150$, $1 \leq N \leq 500$ при $W_{\max} = +\infty$ и $Y_{\max} = +\infty$.

Во всех выполненных экспериментах максимальное число логических условий $X(G^0) = 200$ и максимальное число микроопераций $Y(G^0) = 200$, объем псевдослучайной выборки граф-схем алгоритмов $K = 5000$.

3.1. Средние значения показателей качества и вероятности получения решений с минимальным значением выбранного показателя

На рис. 4–7 приведены экспериментально полученные зависимости, показывающие абсолютные значения оптимизируемых показателей качества.

Полученные зависимости подтверждают сделанные ранее [10] выводы о том, что по мере усиления ограничения значения показателей качества увеличиваются. Приведенные зависимости показывают, что усиление ограничения $X_{\max}$ в меньшей степени сказывается на ухудшении показателей качества по сравнению с усилением ограничения $W_{\max}$. При этом ограничение $X_{\max}$ практически не влияет на увеличение степени дублирования микроопераций.

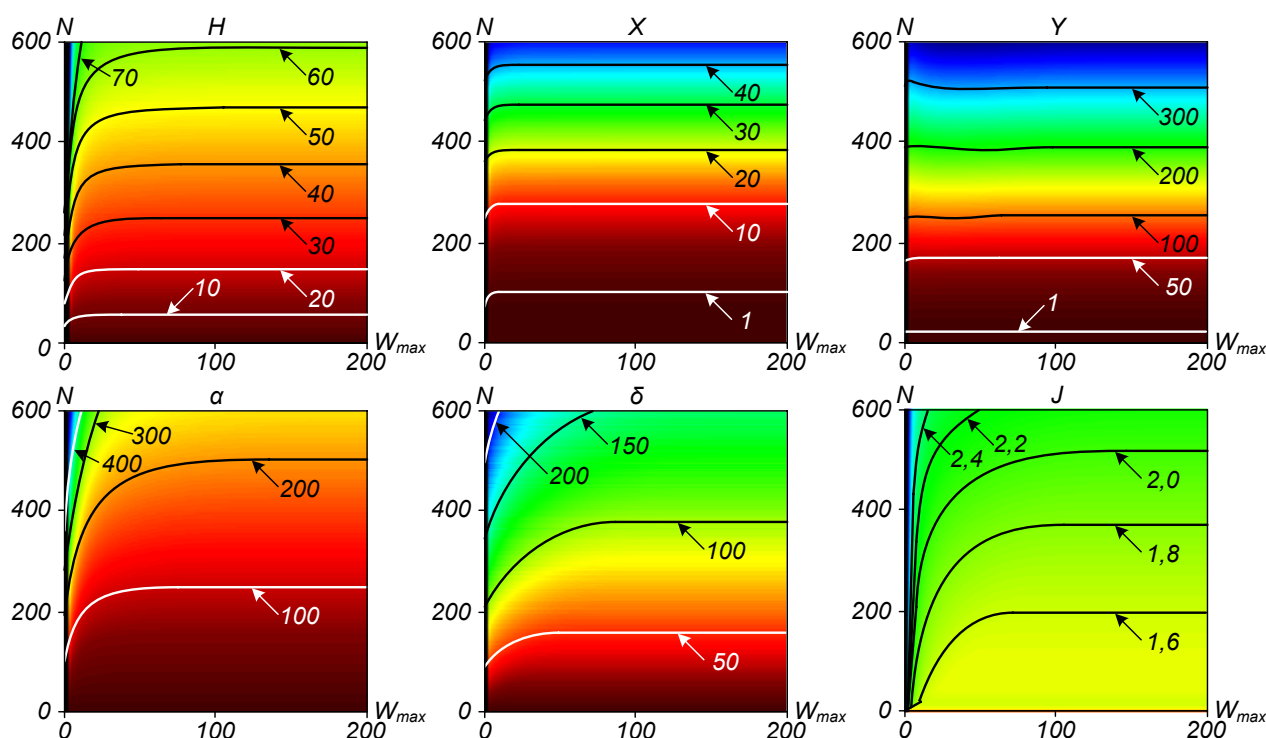


Рис. 4. Линии уровня усредненных значений γ_x показателей качества для метода С.И. Баранова [19, 20] (эксперимент 1)

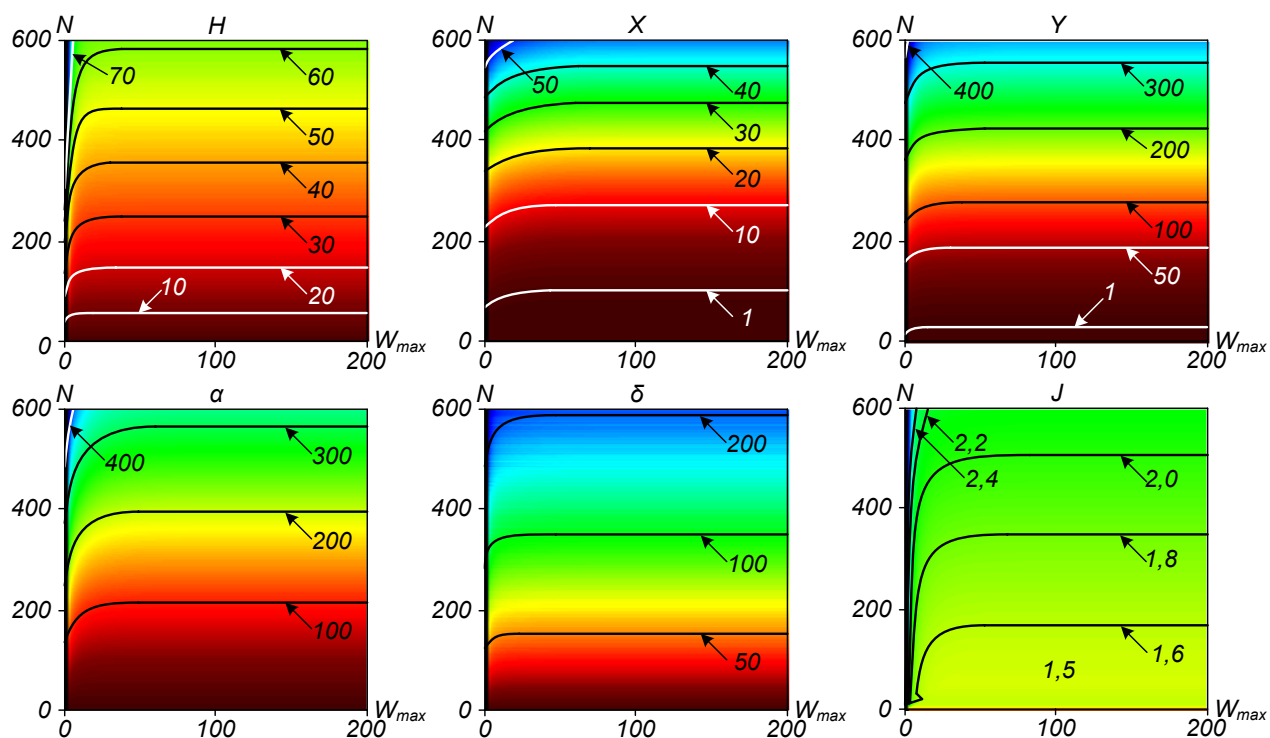


Рис. 5. Линии уровня усредненных значений γ_x показателей качества для параллельно-последовательного метода (эксперимент 1)

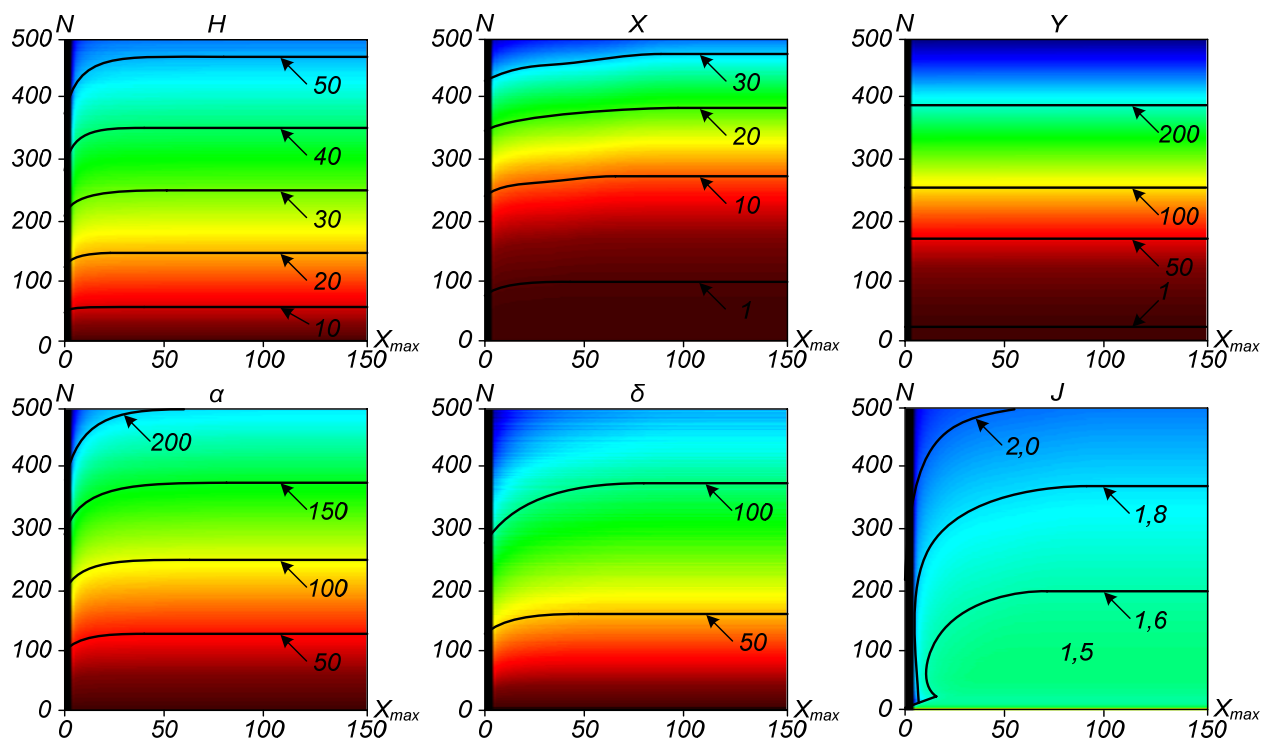


Рис. 6. Линии уровня усредненных значений γ_x показателей качества для метода С.И. Баранова (эксперимент 2)

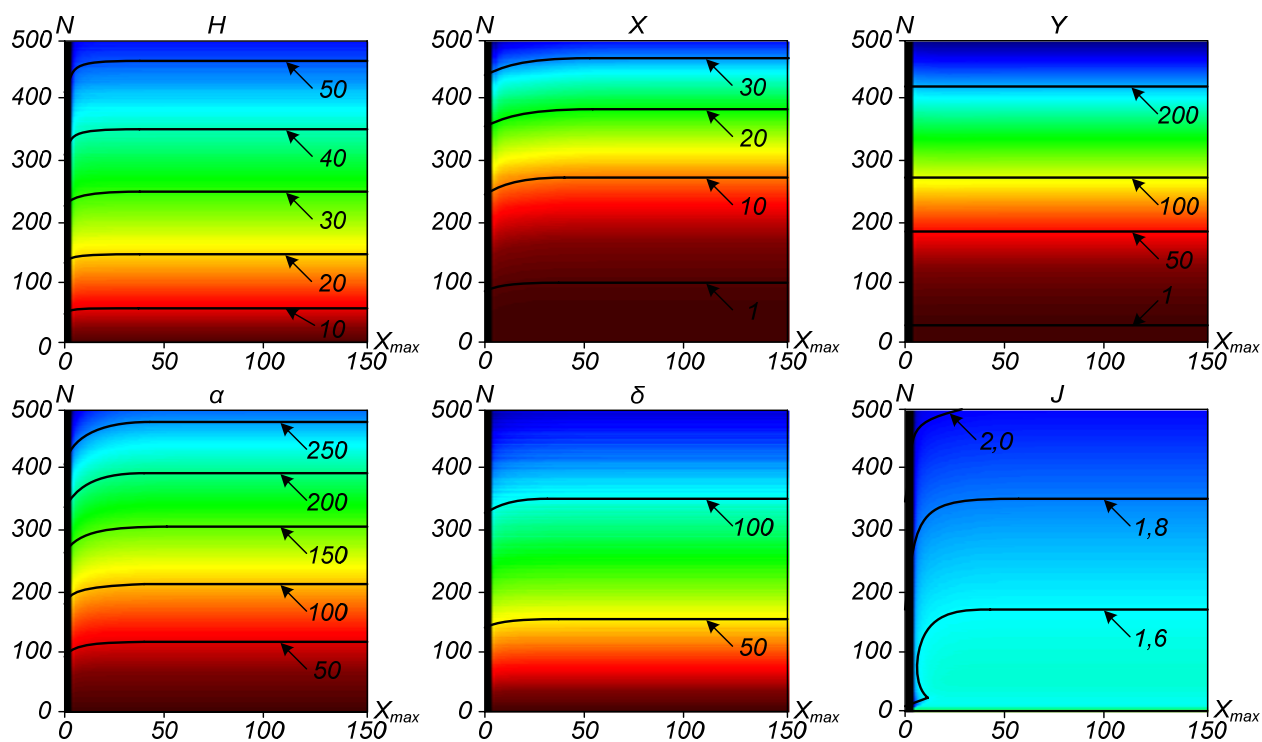


Рис. 7. Линии уровня усредненных значений γ_x показателей качества для параллельно-последовательного метода (эксперимент 2)

На рис. 8–11 приведены линии уровня для вероятностей ρ_x получения решения с минимальным значением выбранного показателя качества.

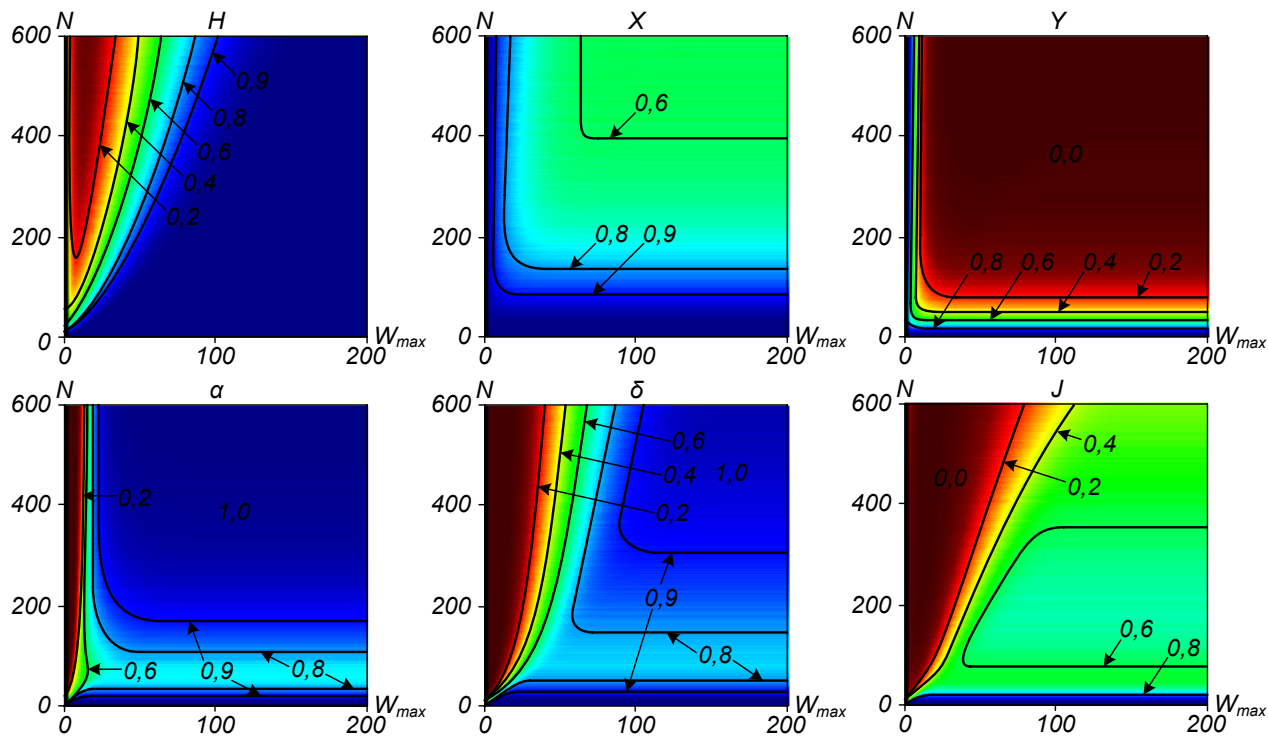


Рис. 8. Линии уровня значений вероятности ρ_x получения показателя качества с минимальным значением для метода С.И. Баранова (эксперимент 1)

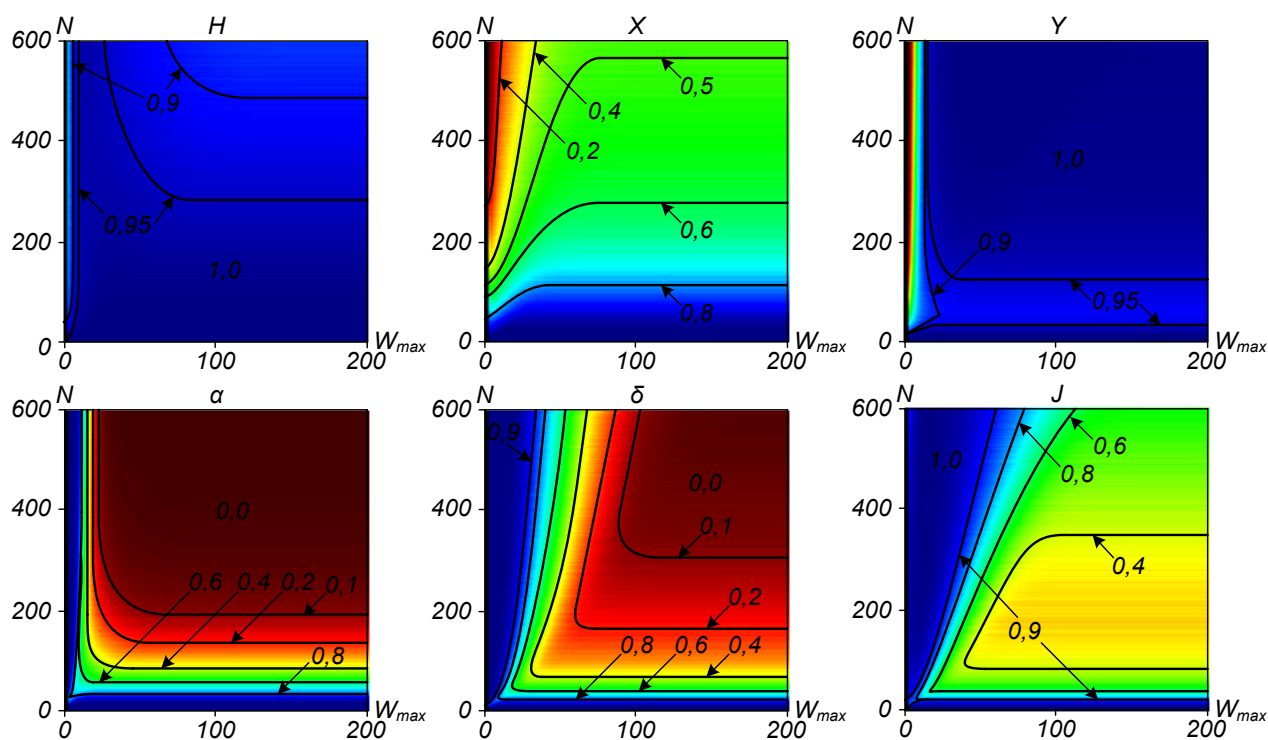


Рис. 9. Линии уровня значений вероятности ρ_x получения показателя качества с минимальным значением для параллельно-последовательного метода (эксперимент 1)

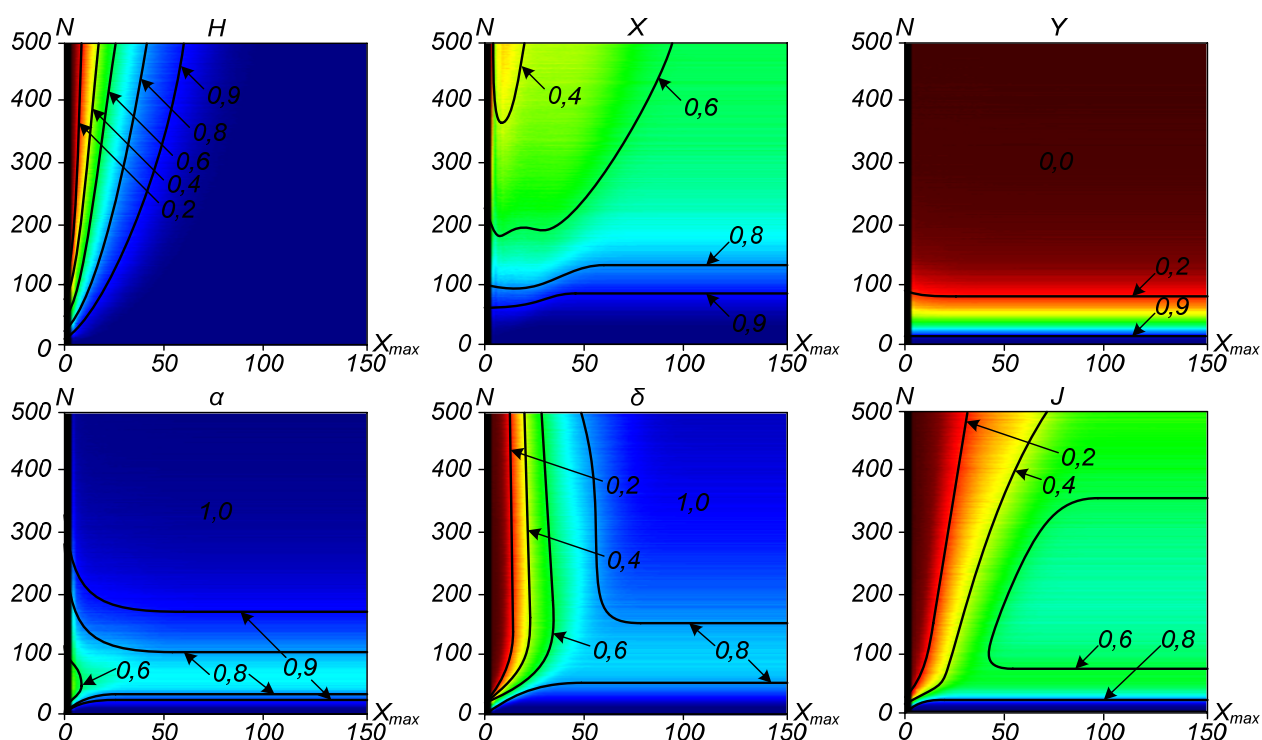


Рис. 10. Линии уровня значений вероятности ρ_x получения показателя качества с минимальным значением для метода С.И. Баранова (эксперимент 2)

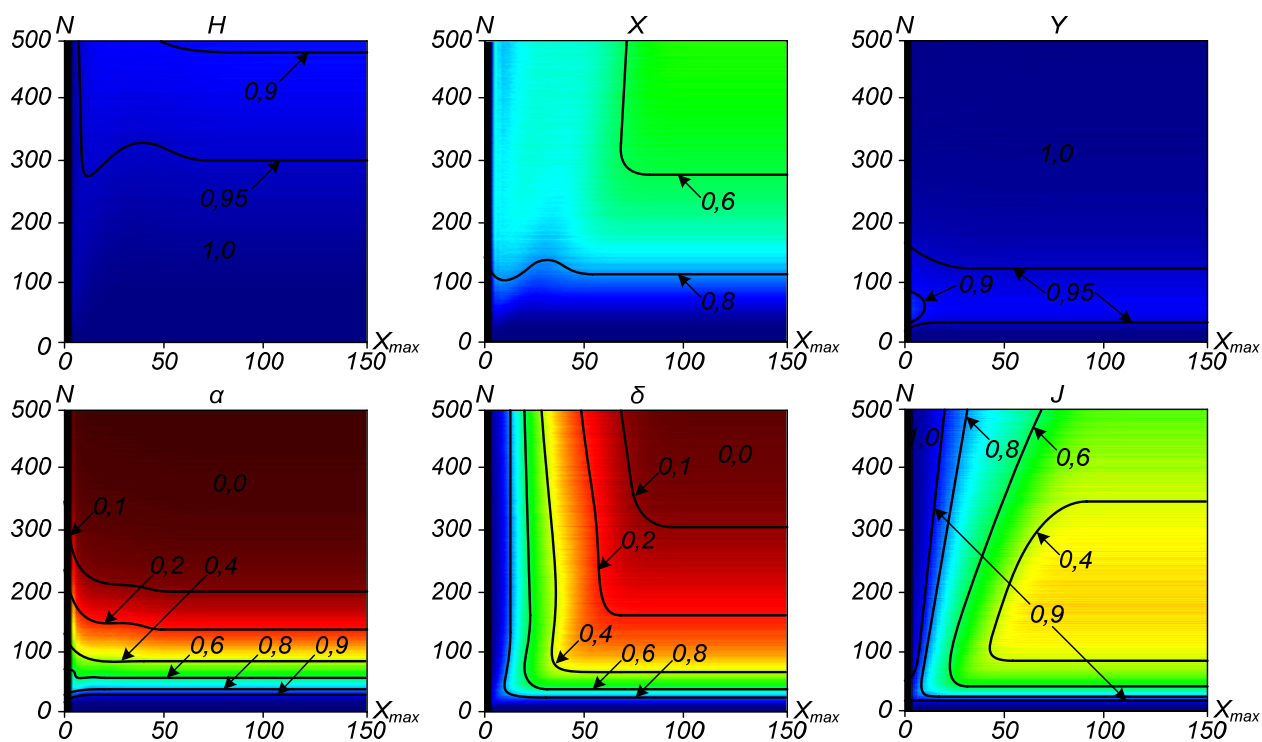


Рис. 11. Линии уровня значений вероятности ρ_x получения показателя качества с минимальным значением для параллельно-последовательного метода (эксперимент 2)

Приведенные карты позволяют оценить вероятность получения разбиения с минимальным значением выбранного показателя качества в зависимости от области на карте.

3.2. Анализ областей нечувствительности методов

Зависимости значения выбранного показателя качества y от значения ограничения x имеют качественно схожий вид, представленный на рис. 12.

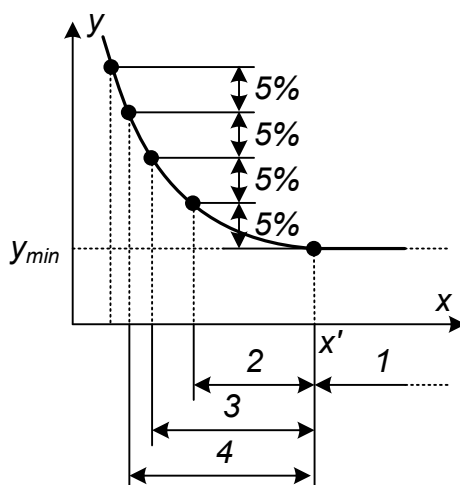


Рис. 12. Типичная зависимость показателя качества x от значения ограничения y (1 – область нечувствительности; 2, 3, 4 и т.д. – области соответственно не более чем 5%-, 10%-, 15%- и т.д. ухудшения значения показателя по отношению к значению $y_{\min}$ в области нечувствительности)

В ходе анализа приведенных на рис. 4–7 результатов можно отметить, что типовые зависимости абсолютных значений показателей качества на полученных двумерных картах имеют схожий вид (рис. 13).

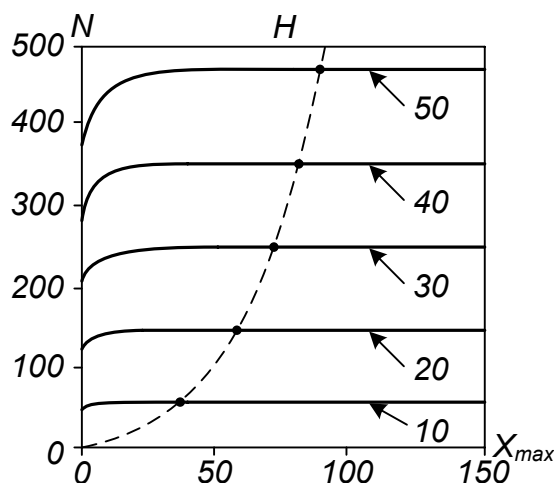


Рис. 13. Пример типовой зависимости абсолютного значения показателя качества (в данном примере, среднего числа блоков H в разбиениях, полученных методом С.И. Баранова) от координат области в составе пространства параметров. Пунктирной линией обозначена граница области нечувствительности

На приведенных двумерных картах также можно выделить две области, располагающиеся слева и справа от пунктирной линии. Область, располагающаяся справа, является областью нечувствительности, в ней для каждого конкретного значения N имеется точка $X'_{\max}$, правее которой изменение численного значения технологического ограничения не оказывает влияния на качество разбиения.

Особой точкой на приведенном на рис. 12 графике является точка ограничения области нечувствительности с координатами $(x', y_{\min})$, расположенная между областями 1 и 2: любое ослабление значения ограничения в диапазоне $x' \leq x$ не сказывается на значениях показателя качества, принимающего свое минимально возможное значение $y_{\min}$ для заданных условий вычислительного эксперимента (метод синтеза разбиений, размер граф-схемы алгоритма, параметры генератора псевдослучайных граф-схем и т.д.). Положение данной точки зависит прежде всего от среднего числа вершин N в граф-схемах алгоритмов выборки Λ , что позволяет экспериментальным путем получить приведенные на рис. 12 графики зависимости положения точки загиба x' от N для различных показателей качества. (Положение точки загиба также зависит от объема выборки граф-схем алгоритмов K в вычислительном эксперименте: с ростом K положение точки x' смещается в область ослабления ограничения, имея конечный предел $\lim_{K \rightarrow \infty} x'$. С учетом того, что объем выборки K линейно влияет на время вычислительных экспериментов, для приведенных ниже рекомендаций условно полагаем, что $x'|_{K=50\,000} \approx \lim_{K \rightarrow \infty} x'$ с точностью в пределах нескольких процентов, что было проверено в ограниченной области пространства параметров при $K = 50\,000$. Для приведенных на рис. 14 зависимостей это означает возможное незначительное смещение приведенных кривых вверх).

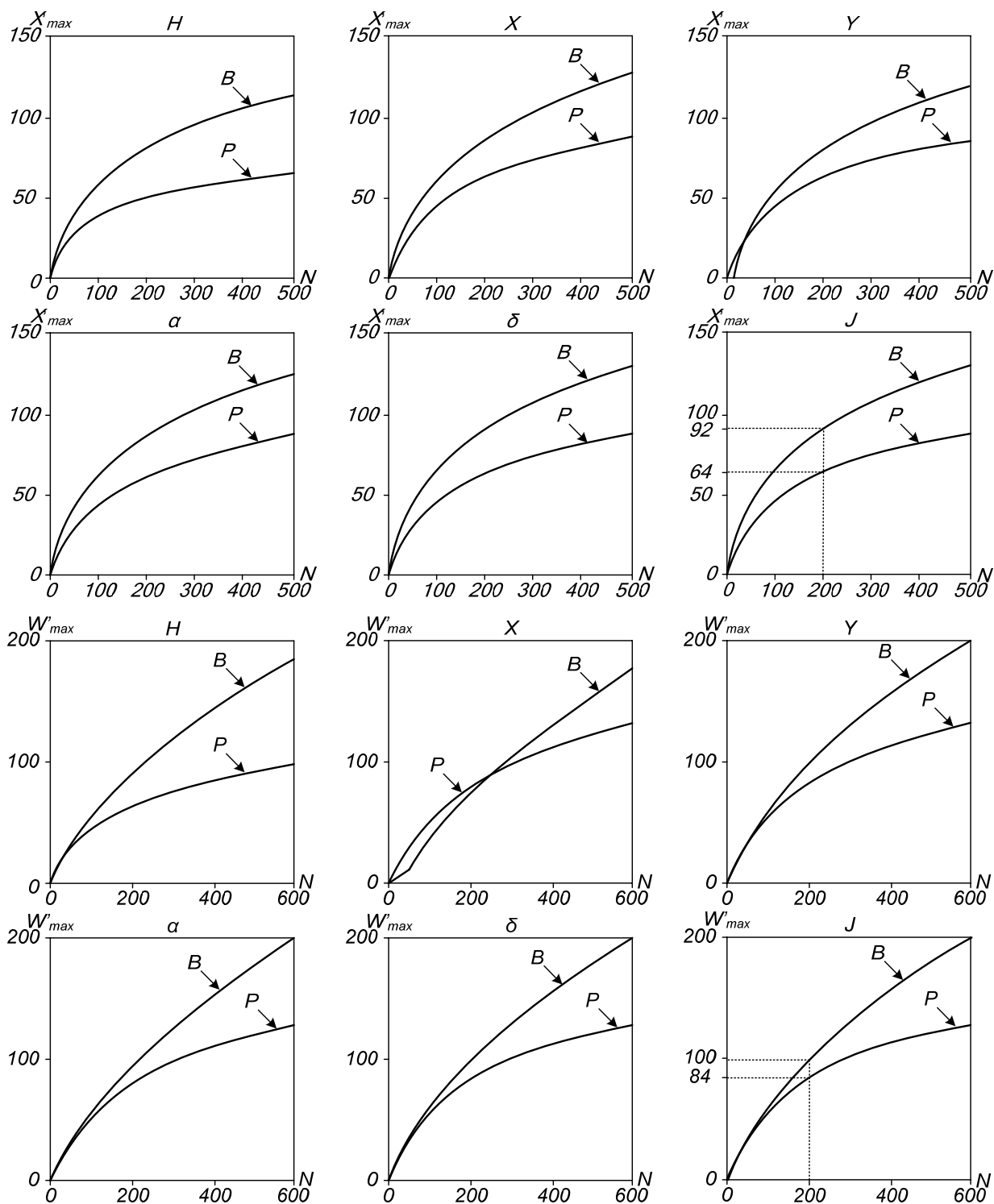


Рис. 14. Зависимости пороговых значений ограничений $X'_{\max}$ и $W'_{\max}$ от среднего числа вершин в граф-схемах алгоритмов N (B – метод С.И. Баранова, P – параллельно-последовательный метод)

Полученные зависимости интересны с первую очередь тем, что с их помощью можно сформулировать рекомендации для разработчиков аппаратной части ЛМК. Например, для ЛМК, ориентированного на реализацию произвольных граф-схем алгоритмов управления из $N=200$ вершин с использованием параллельно-последовательного метода, в составе контроллеров требуется не более $X'_{\max}=64$ выводов для приема сигналов логических условий и не более $W'_{\max}=84$ ячеек памяти исходя из графиков для интегрального

показателя качества J (для метода С.И. Баранова указанные значения составляют соответственно $X'_{\max} = 92$ и $W'_{\max} = 98$). А, зная значения технологических ограничений, можно определить рекомендуемое число контроллеров в составе ЛМК. Для выбранного значения $N = 200$ оно составляет 26 (см. рис. 4–7). При усилении ограничений, например, из-за производственных ограничений, указанное рекомендуемое значение может возрасти, но не более чем до 37 (при $X_{\max} \rightarrow 0$ и $W_{\max} \rightarrow 0$).

Еще одной особенностью полученных кривых является зависимость расположения точки ограничения области нечувствительности от метода синтеза разбиения. Из полученных экспериментальных данных следует, что для параллельно-последовательного метода ширина области нечувствительности больше, чем для метода С.И. Баранова, что является неоспоримым плюсом, т.к. для большего диапазона значений ограничений метод не демонстрирует ухудшения качества разбиений.

3.3. Анализ областей качественного превосходства методов

В результате дополнительного анализа полученных данных [21] можно получить области предпочтительного использования методов. На приведенных ниже рис. 15–16 приведены области, в которых участвовавшие в сравнении методы проявляют преимущество по оптимизации выбранного показателя качества (качественное превосходство).

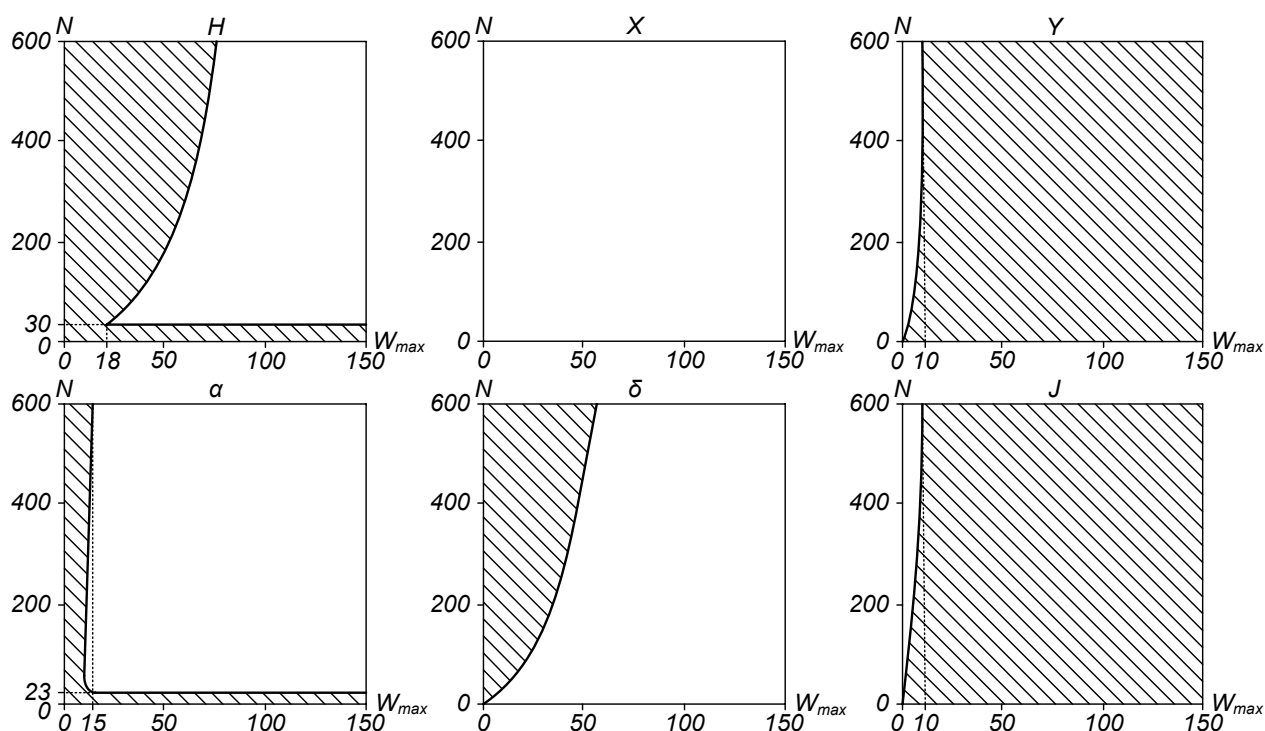


Рис. 15. Результаты вычислительного эксперимента 1 (белые области – преимущество метода С.И. Баранова, заштрихованные – параллельно-последовательного метода)

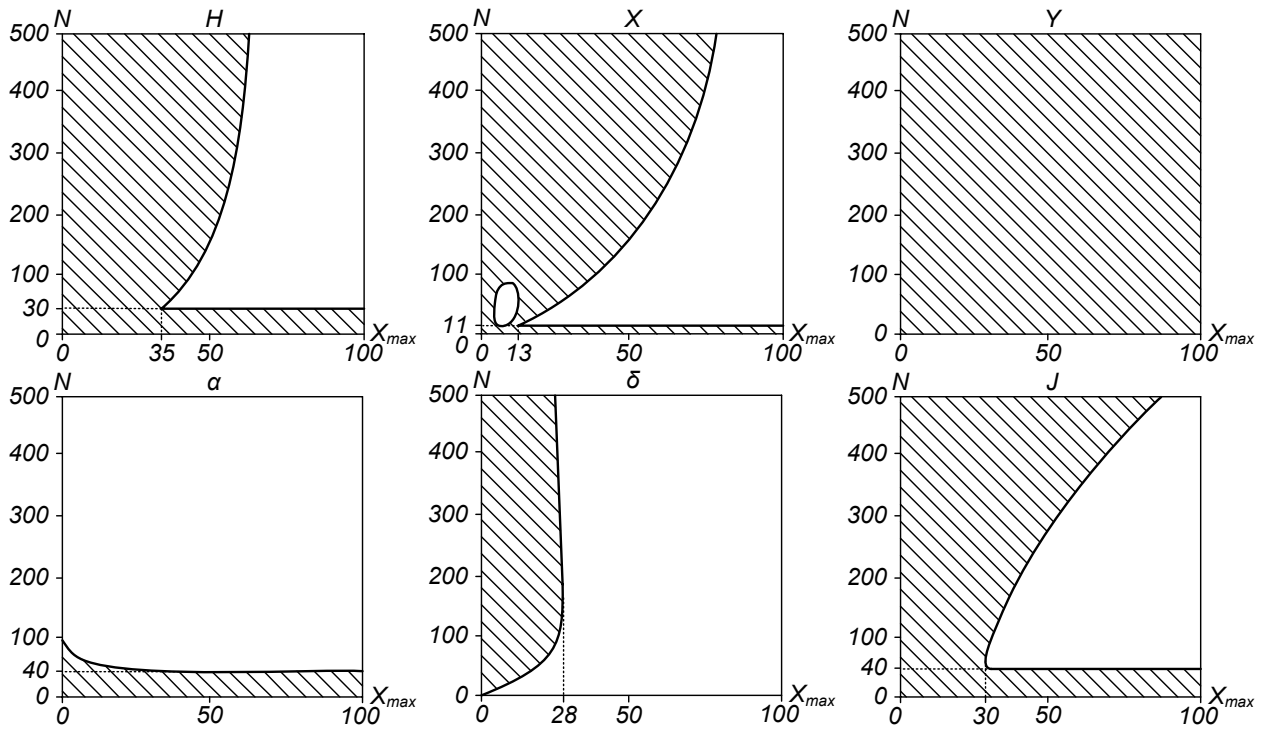


Рис. 16. Результаты вычислительного эксперимента 2 (белые области – преимущество метода С.И. Баранова, заштрихованные – параллельно-последовательного метода)

Полученные данные в целом подтверждают сделанные ранее [10] выводы о наличии ряда зон в пространстве параметров, причем предпочтительной зоной для метода С.И. Баранова является зона слабых или отсутствующих ограничений, а для параллельно-последовательного метода – зона сильных ограничений. Новыми являются следующие исключения из общего правила:

- 1) Преимущество параллельно-последовательного метода по оптимизации распределения микроопераций и интегральному показателю качества нивелируется в области очень сильных ограничений по емкости памяти контроллера ($W_{\max} \leq 10$).
- 2) Преимущество параллельно-последовательного метода по оптимизации сложности сети межблочных связей отсутствует при любых значениях ограничения на число принимаемых сигналов логических условий $X_{\max}$ при размере граф-схемы алгоритма управления $N \geq 40$.
- 3) С ростом размера граф-схемы алгоритма управления N ширина зоны преимущества параллельно-последовательного метода в области ограничения на число принимаемых сигналов логических условий $X_{\max}$ растет.

3.4. Анализ количественного превосходства методов

Кроме качественного превосходства вызывает интерес анализ того, на сколько тот или иной метод лучше оптимизирует значение показателя качества по сравнению с аналогами (количественное превосходство). Для этого для множества значений выбранного показателя качества, полученных различными методами синтеза разбиений, в выбранной точке пространства параметров вычисляется значение ухудшения качества решения

$$\Delta\gamma_x^{F_i} = \frac{\gamma_x^{F_i} - \min_{j=1, N_F} \gamma_x^{F_j}}{\min_{j=1, N_F} \gamma_x^{F_j}} \cdot 100\%,$$

для удобства выражаемое в процентах. Здесь F_i – i -й метод синтеза разбиений, N_F – число методов синтеза разбиений, принимавших участие в эксперименте, $\min_{j=1, N_F} \gamma_x^{F_j}$ – условный оптимум для показателя качества x . Полученные зависимости приведены на рис. 17–20.

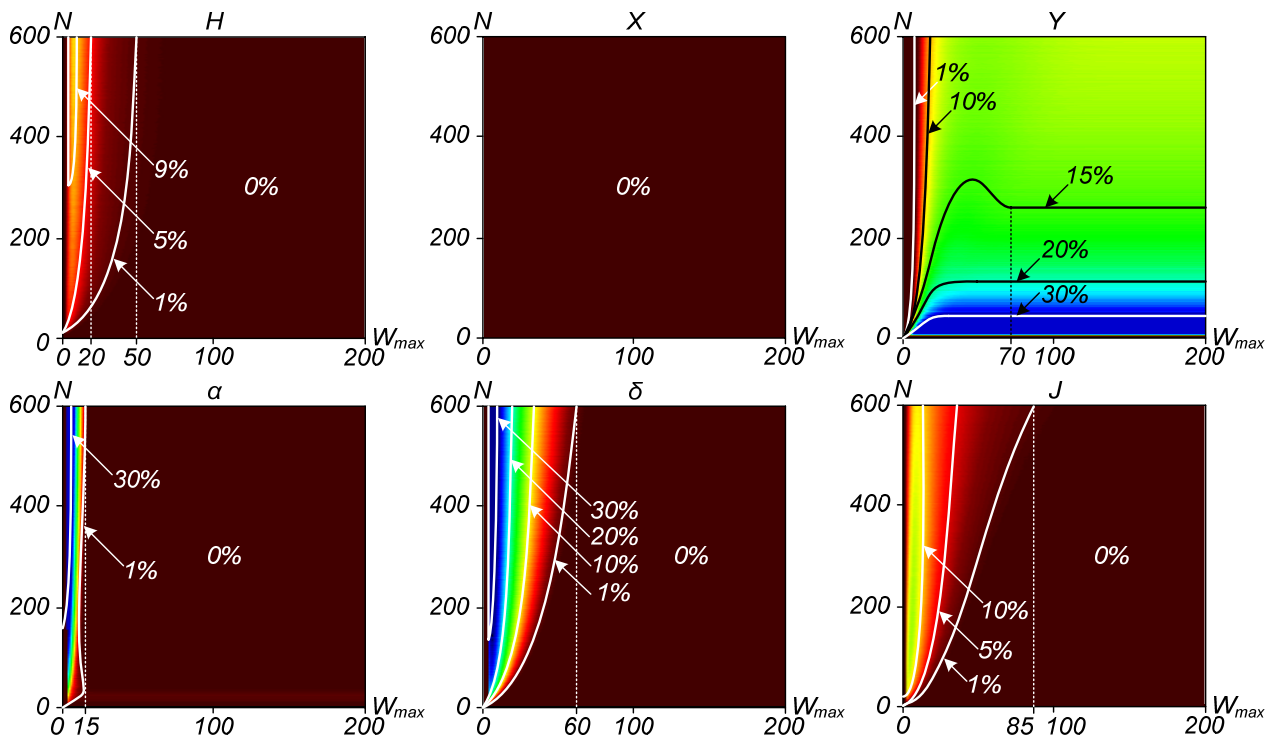


Рис. 17. Ухудшение качества минимизации показателей для метода С.И. Баранова по отношению к наилучшему решению (эксперимент 1)

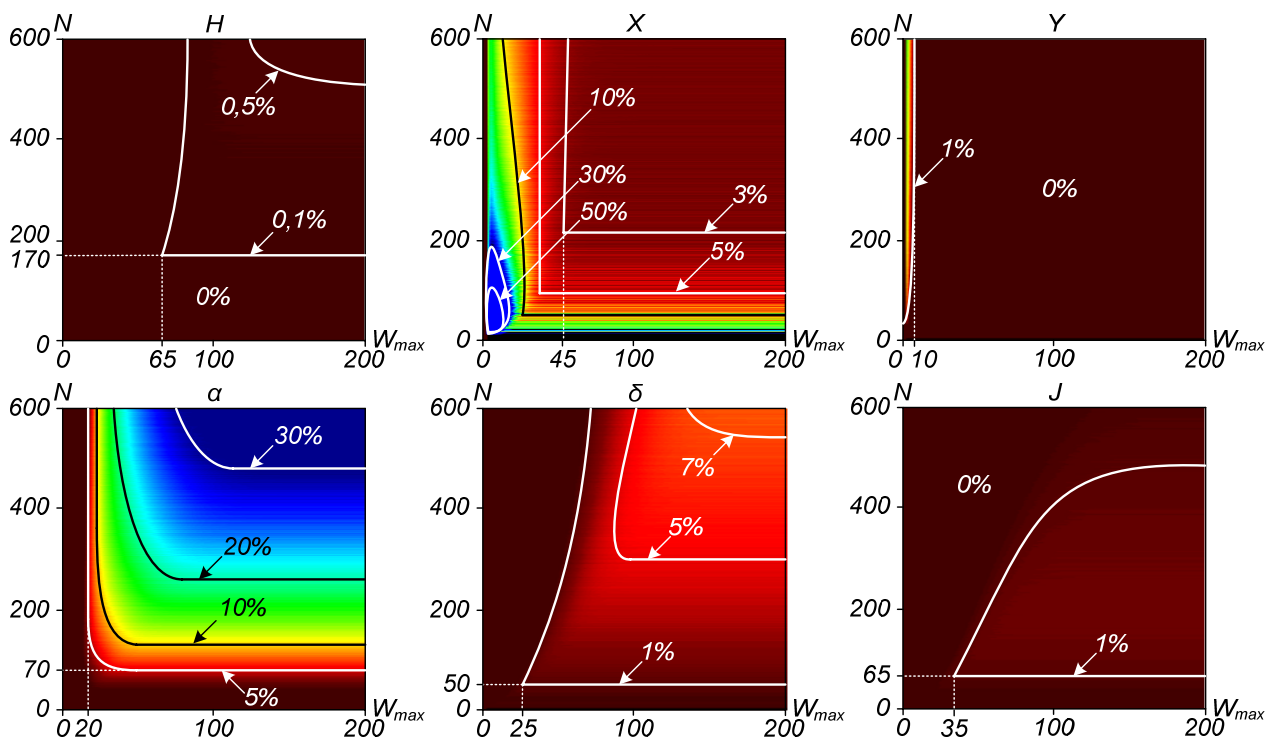


Рис. 18. Ухудшение качества минимизации показателей для параллельно-последовательного метода по отношению к наилучшему решению (эксперимент 1)

Полученные зависимости показывают, что параллельно-последовательный метод обеспечивает близкую к условному оптимуму степень минимизации числа блоков и распределения микроопераций (ухудшение по сравнению с условно-оптимальным решением не более чем на 0,5% и 1% соответственно в 10% случаев); степень минимизации дублирования логических условий хуже условного оптимума на 3–50% в зависимости от области приблизительно в 50% случаев и снижается по мере увеличения числа вершин в составе граф-схемы; сложность сети межблочных связей близка к условному оптимуму при малом размере граф-схем ($N < 70$) и ухудшается не более чем на 30% с ростом размера граф-схемы до 600 вершин; интенсивность межблочных взаимодействий хуже условного оптимума на 1–7% и увеличивается с ростом размера граф-схемы. По интегральному показателю качества параллельно-последовательный метод имеет тотальное преимущество на всей плоскости пространства параметров (ухудшение составляет величину порядка 1% в 40% случаев).

Метод С.И. Баранова демонстрирует хорошее распределение сигналов логических условий, в точности равное условному оптимуму во всей плоскости параметров; число блоков увеличивается по мере усиления ограничения (до 9% в области $W_{\max} \leq 10$ в 80% случаев); степень дублирования микроопераций выше условного оптимума на 30% в 60% случаев при малом числе вершин в составе граф-схем, отставание снижается до 15% практически во всех случаях с ростом числа вершин до 600 и стремится к условному оптимуму при усилении ограничения до $W_{\max} \leq 20$; сложность сети межблочных связей близка к условному минимуму в абсолютном большинстве случаев в области слабых ограничений и быстро возрастает (до 30%) в 80% случаев при усилении ограничения $W_{\max} \leq 15$; аналогичным образом ведет себя интенсивность межблочных взаимодействий, начинающая возрастать (до 30%) в области ограничения $W_{\max} \leq 60$ в подавляющем большинстве случаев. По интегральному показателю качества метод С.И. Баранова дает решения, в точности совпадающие с условным оптимумом в 40–80% случаев в зависимости от размера граф-схемы в области слабых ограничений ($W_{\max} \geq 85$); по мере усиления ограничения ухудшение интегрального показателя составляет до 10% практически во всех случаях.

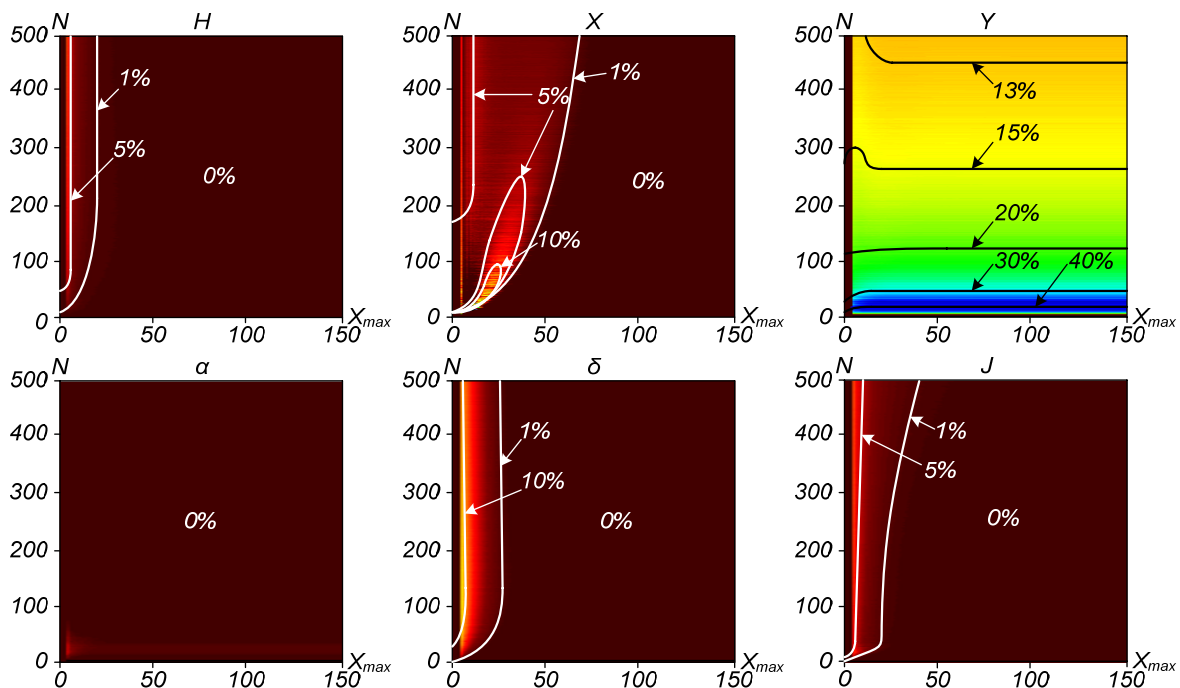


Рис. 19. Ухудшение качества минимизации показателей для метода С.И. Баранова по отношению к наилучшему решению (эксперимент 2)

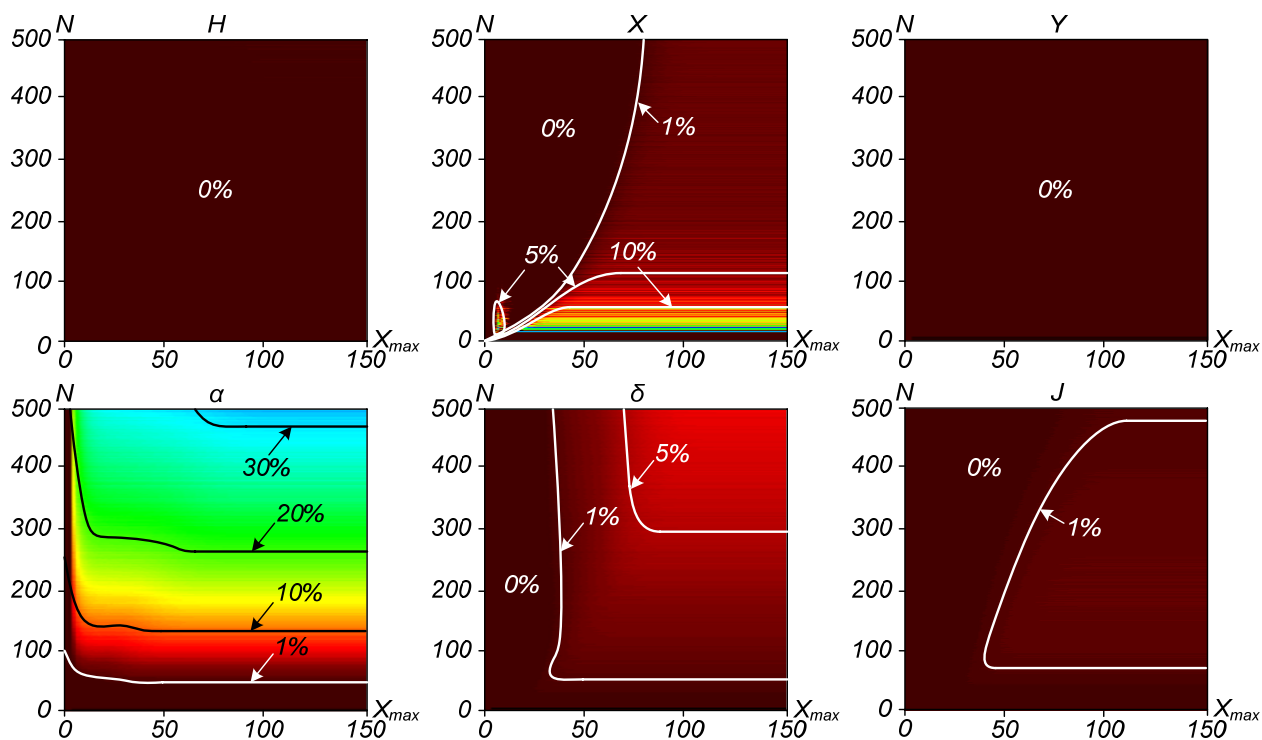


Рис. 20. Ухудшение качества минимизации показателей для параллельно-последовательного метода по отношению к наилучшему решению (эксперимент 2)

Параллельно-последовательный метод всегда обеспечивает практически равное условному оптимуму число блоков в разбиениях и степень дублирования микроопераций независимо от области на карте; по оптимизации распределения сигналов логических условий метод проигрывает на граф-схемах алгоритмов с малым числом вершин ($N < 150$) на 5–10% в 20–30% случаев; проигрыш по числу межблочных связей составляет не более 30% в большинстве случаев и увеличивается с ростом N ; проигрыш по интенсивности межблочных взаимодействий составляет не более 5% в большинстве случаев при наличии слабых ограничений и большого числа вершин ($N > 300$) в составе граф-схемы и практически пропадает по мере усиления ограничения; по интегральному показателю метод обеспечивает ухудшение качества не более чем на 1%.

Метод С.И. Баранова обеспечивает условный оптимум по оптимизации сложности сети межблочных связей в независимости от области карты; ухудшение числа блоков в разбиениях составляет не более 5% в области сильного ограничения ($X_{\max} < 20$), дублирования сигналов логических условий – не более 5–10% в области $X_{\max} < 40$, интенсивности межблочных взаимодействий – не более 10% в области $X_{\max} < 25$; проигрыш по степени дублирования микроопераций составляет до 40% при малом размере граф-схем алгоритмов и уменьшается до 13% с ростом числа вершин в абсолютном большинстве случаев. Ухудшение интегрального показателя качества составляет не более 5% в 70% случаев в области $X_{\max} < 40$.

Качественно полученные зависимости схожи с приведенными выше зависимостями от ограничения $W_{\max}$ за исключением того, что ухудшение значений показателей качества в относительных единицах меньше по мере усиления ограничения.

4. Выводы

Полученные двумерные зависимости являются гораздо более подробными и удобными для анализа по сравнению с полученными ранее одномерными [10]. Они позволяют подтвердить сделанный ранее вывод о том, что однозначного предпочтения нельзя отдать ни одному из методов синтеза разбиений. Параллельно-последовательный метод обеспечивает высокое качество решений по интегральному показателю за счет оптимизации числа блоков и распределения микроопераций, однако уступает при распределении логических условий в области сильных ограничений, в минимизации сложности сети межблочных связей и интенсивности межблочных взаимодействий в области слабых ограничений с ростом размера граф-схемы алгоритма. Метод С.И. Баранова наоборот демонстрирует ухудшение интегрального качества решений по мере усиления ограничения, выигрывая при этом по распределению логических условий, сложности сети межблочных связей и интенсивности межблочных взаимодействий в области слабых ограничений.

В ходе проведенных вычислительных экспериментов были выявлены границы областей нечувствительности средних значений показателей качества, полученные по мере усиления значений технологических ограничений и позволяющие сформулировать рекомендации разработчикам аппаратной части ЛМК (табл. 1).

Табл. 1. Средний размер граф-схем алгоритмов и значения предельных технологических ограничений в зависимости от числа модулей в составе мультиконтроллера для метода параллельно-последовательной декомпозиции

Число контроллеров (H) в составе мультиконтроллера без учета избыточности	Число вершин (N) реализуемой граф-схемы алгоритма, не более (при условии $X_{\max} \geq X'_{\max}$ и $W_{\max} \geq W'_{\max}$)	Предельные ограничения	
		$X'_{\max}$	$W'_{\max}$
$3 \times 3 = 9$	50	30	34
$4 \times 4 = 16$	110	49	61
$5 \times 5 = 25$	200	64	84
$6 \times 6 = 36$	312	76	105
$7 \times 7 = 49$	450	86	120

Предельные ограничения на число принимаемых сигналов логических условий являются значительными (в отличие от предельных ограничений на емкость памяти микропрограмм), что вынуждает экономить дорожки, используемые для приема контроллером сигналов логических условий, заставляя переходить в область сильных ограничений, в которой метод параллельно-последовательной декомпозиции выглядит предпочтительнее [10, 21].

Еще одной особенностью полученных кривых является зависимость расположения точки ограничения области нечувствительности от метода синтеза разбиения. Из полученных экспериментальных данных следует, что для параллельно-последовательного метода ширина области нечувствительности больше, чем для метода С.И. Баранова, что является неоспоримым преимуществом, т.к. для большего диапазона значений ограничений метод не демонстрирует ухудшения качества разбиений.

5. Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность всем добровольцам, принявшим участие в расчетах и обсуждении деталей адаптации расчетного модуля под BOINC грид, а также лично Валяеву Сергею Юрьевичу (SerVal), разработчику серверного кода проекта Gerasim@home под операционную систему Microsoft Windows, за предоставление технической возможности использования проекта Gerasim@Home для организации распределенных вычислений и ряд ценных советов и замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Организация и синтез микропрограммных мультимикроконтроллеров / *Зотов И.В. и др.*; Курск: Изд-во «Курск», 1999. 368 с.
2. Архитектура параллельных логических мультимикроконтроллеров / *Емельянов С.Г., Зотов И.В., Титов В.С.* М.: Высшая школа, 2009. 233 с.
3. Комбинаторно-логические задачи синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления при проектировании логических мультимикроконтроллеров / *Э.И. Ватутин, И.В. Зотов, В.С. Титов и др.*; Курск: изд-во КурскГТУ, 2010. 200 с.
4. *Ватутин Э.И.* Проектирование логических мультимикроконтроллеров. Синтез разбиений параллельных граф-схем алгоритмов. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. 292 с.
5. *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.
6. *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.
7. *Ватутин Э.И., Зотов И.В.* Программная система для построения разбиений параллельных управляющих алгоритмов // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'06). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2006. С. 2239–2250.
8. *Ватутин Э.И., Зотов И.В.* Визуальная среда синтеза разбиений параллельных алгоритмов логического управления // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613222 от 30.07.07.
9. *Ватутин Э.И., Волобуев С.В., Зотов И.В.* Комплексная сравнительная оценка методов выбора разбиений при проектировании логических мультимикроконтроллеров // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'08). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 1917–1940.
10. *Ватутин Э.И., Волобуев С.В., Зотов И.В.* Комплексный сравнительный анализ качества разбиений при синтезе логических мультимикроконтроллеров в условиях присутствия технологических ограничений // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'08). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2008. С. 643–685.
11. *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.
12. <http://boinc.berkeley.edu>
13. <http://ru.wikipedia.org/wiki/BOINC>
14. <http://setiathome.berkeley.edu>
15. <http://einstein.phys.uwm.edu>
16. <http://lhcatomeclassic.cern.ch/sixtrack/>
17. <http://boincstats.com>
18. <http://gerasim.boinc.ru>
19. *Баранов С.И., Журавина Л.Н., Песчанский В.А.* Обобщенный метод декомпозиции граф-схем алгоритмов // А и ВТ. 1982. № 5. С. 43–51.
20. *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.
21. *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.