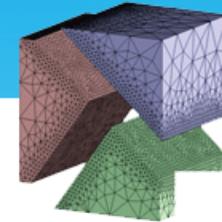




НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ *им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО*  
Национальный исследовательский университет



Факультет вычислительной математики и кибернетики  
Кафедра информатики и автоматизации научных исследований



Николай Старостин к.т.н., доцент

# Топологический синтез многослойных сверхбольших интегральных схем с использованием высокопроизводительных вычислений

Результаты НИР Н-491-99

Руководство: д.т.н., проф. М.Х. Прилуцкий

Отчетный семинар по СИ7 , ННГУ, 2014

# Предметная область

## Синтез топологии интегральных схем –

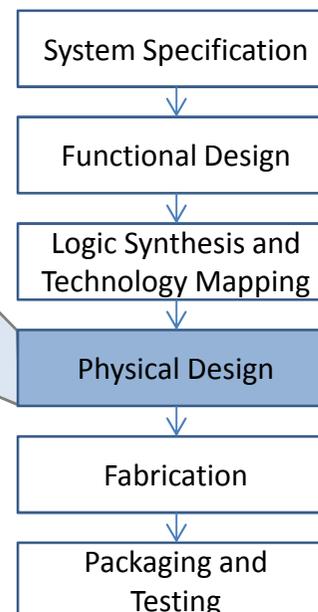
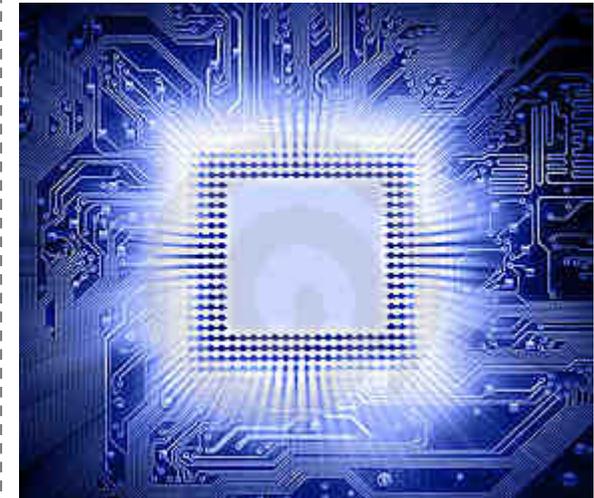
сложная многостадийная технология, архитектура которой сильно зависят от техпроцесса производства ИС, ее структуры и функциональных, параметрических и других требований заказчика.

## Физическое проектирование включает этапы:

1. **Partitioning** компоновка схемы;
2. **Chip Planning** планирование кристалла;
3. **Placement** размещения элементов;
4. **Clock Synthesis** синтез синхросигналов;
5. **Routing** трассировка цепей;
6. **Timing Closure** оптимизация синхросигналов.

**Лидеры в области** (Electronic Design Automation):  
*Synopsys, Cadence, Mentor Graphics.*

В основе лежат **графовые методы** решения задач проектирования.



## Цели и задачи

**Цель – разработка отечественных средств физического проектирования интегральных схем.**

**Этапы:**

**2014** Partitioning

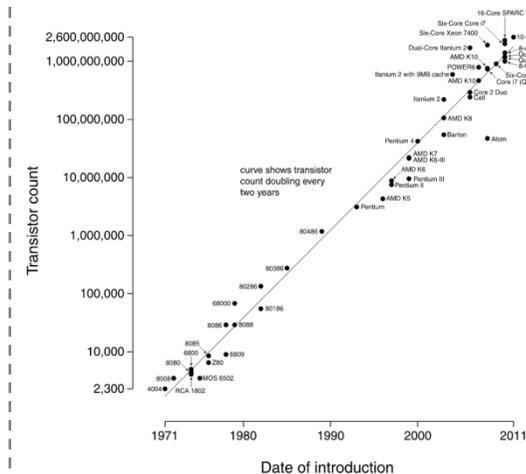
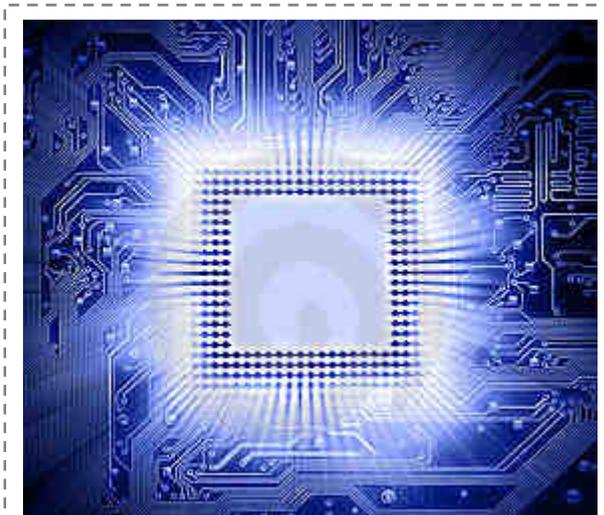
**2015** Chip Planning (Floorplanning, Pin Assignment, Power and Ground Routing)

**2016** Placement (Global and Detail Placing) + Clock Synthesis

**2017** Routing (Global and Detail Routing) + Timing Closure.

**Математические аспекты:** NP-трудные задачи, графовые модели ИС сверхбольших размеров ( $>10^9$ ) многоуровневые методы, параллельные алгоритмы, распределенность данных

**Технические аспекты:** сложные и постоянно развивающиеся промышленные форматы в маршрутах проектирования



Число транзисторов на кристалле удваивается каждые 24 месяца. (освоен техпроцесс 10 нм, предел 5 нм, ~2020)

# 2014 – Partitioning

**2014 год – концентрация усилий на разработку инструмента решения задачи компоновки ИС сверхбольших порядков ( $10^9$  компонентов).**

**Этапы 2014-2017:**

**2014 Partitioning**

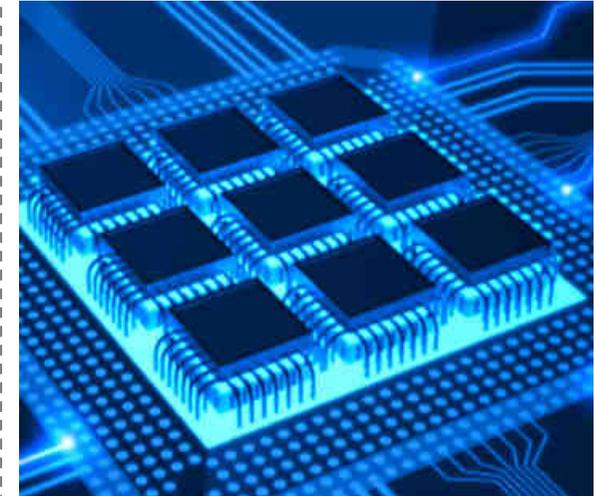
**2015 Chip Planning** (Floorplanning, Pin Assignment, **Power and Ground Routing**)

**2016 Placement** (Global Placing, Detail Placing) + Clock Synthesis

**2017 Routing** (Global Routing, Detail Routing) + Timing Closure.

**Задачи 2014:**

1. Разработка алгоритма компоновки ИС (2013)
2. Параллельный многоуровневый алгоритм компоновки ИС на распределенной памяти
3. Программная реализация
4. Апробация на сверхбольших задачах
5. **Математические проблемы в решении задач Chip Planning и Placement**



**ЦЕЛЬ:** Разбить схему на несколько кристаллов ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема, FPGA)

**ИНДИКАТОРЫ:**

**Публикации** в журналах «Web of Science», «Scopus», РИНЦ  
**Доклады** на международных конференциях  
**РИД** (авторские свидетельства)  
**Проекты** НИОКР

# Постановка задачи

Гиперграф  $H(V, E, w)$ , где  $V$  – вершины (компоненты схемы);  
 $E$  – гиперребра (цепи схемы);  $w: V \rightarrow N$  – веса вершин (размеры).

Задача **k-partitioning** заключается в распределении компонент  $V$   
по фиксированному набору  $(V_1, \dots, V_k)$  кристаллов ПЛИС.

$$\bigcup_{i=1, k} V_i = V; \quad V_i \cap V_j = \emptyset; \quad (1)$$

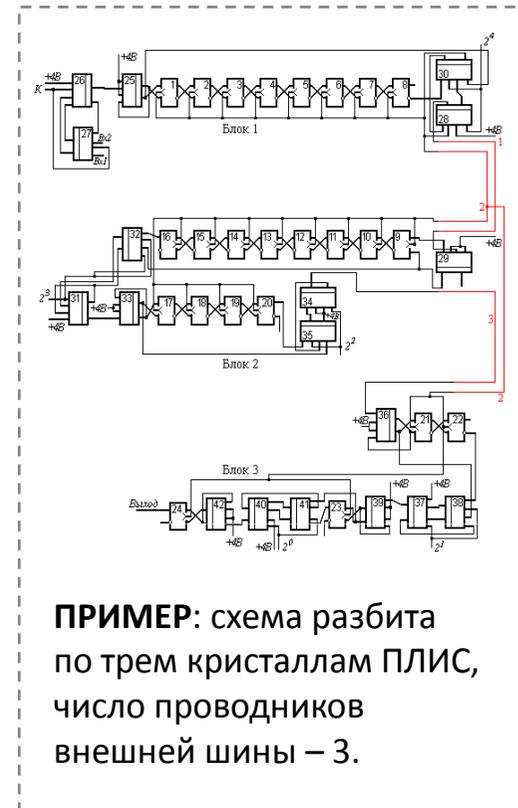
Кристалл ПЛИС имеет ограниченную **вместимость**:

$$\sum_{v_j \in V_i} w(v_j) \leq W, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2)$$

**Критерий** направлен на минимизацию цепей внешней шины  
(проводники, связывающие компоненты разных ПЛИС)

$$B(V_1, \dots, V_k) = \sum_{e_j \in E} b(e_j, V_1, \dots, V_k) \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$\text{где } b(e_j, V_1, \dots, V_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } \forall v_l \in e_j, v_l \in V_i, a \in \{1, \dots, k\}; \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$



**Задача k-partitioning** принадлежит к классу **NP-трудных задач!**

# Технология решения

Гиперграфы – сложные с точки зрения хранения и обработки на вычислительной технике объекты. У коллектива есть опыт решения декомпозиционных задач на классических графах.

## 1. Переход к задаче $k$ -partitioning на классических графах.

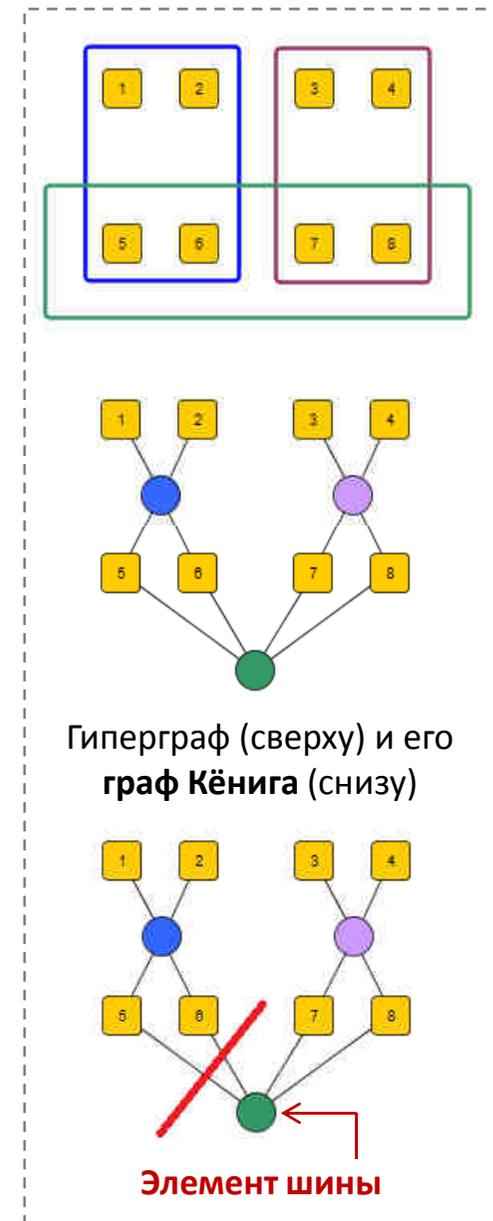
Выбрана схема перехода к графу Кёнига – каждое гиперребро трансформируется в новую вершину графа нулевого веса, а инцидентные ему вершины связываются ребрами с новой вершиной. Сведение к задаче **сбалансированного  $k$ -разбиения графа**. Балансный коэффициент выбирается исходя из вместимости ПЛИС.

## 2. Решение задачи $k$ -partitioning на классических графах.

Получение декомпозиции многоуровневым методом. Проблема разработки параллельного алгоритма для распределенного графа.

## 3. Интерпретация решения в терминах гиперграфовой модели.

Носит технический характер – вычисляются вершины нулевого веса, инцидентные сечению. Эти вершины соответствуют гиперребрам, которые моделируют цепи внешней шины.



# Сбалансированное $k$ -разбиения графа

Рассматривается взвешенный неориентированный граф  $G(V, E, w, u)$ , где  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  – множество вершин;  $E \subseteq V^{(2)}$  – множество ребер;  $w: V \rightarrow N$  – «веса» вершин;  $u: E \rightarrow N$  – «веса» ребер.

Задача  $k$ -разбиения графа  $G(V, E, w, u)$  состоит в поиске  $(V_1, \dots, V_k)$

$$\max_{i=1, k} W(V_i) \leq c \frac{W(V)}{k}, \quad (1)$$

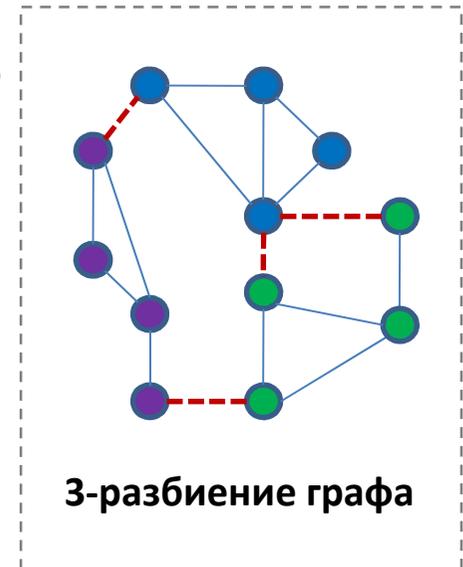
$$\text{где } W(S) = \sum_{v \in S} w(v), \quad S \subseteq V,$$

$c \in [1, \infty)$  – параметр разбиения.

Часто в задаче вместо параметра  $c$  используют параметр  $\varepsilon = 100 \cdot (c - 1)$ , который называют дисбалансом (с англ., imbalance).

$$F(V_1, \dots, V_k) = \sum_{e \in Q(V_1, \dots, V_k)} u(e) \rightarrow \min, \quad (2)$$

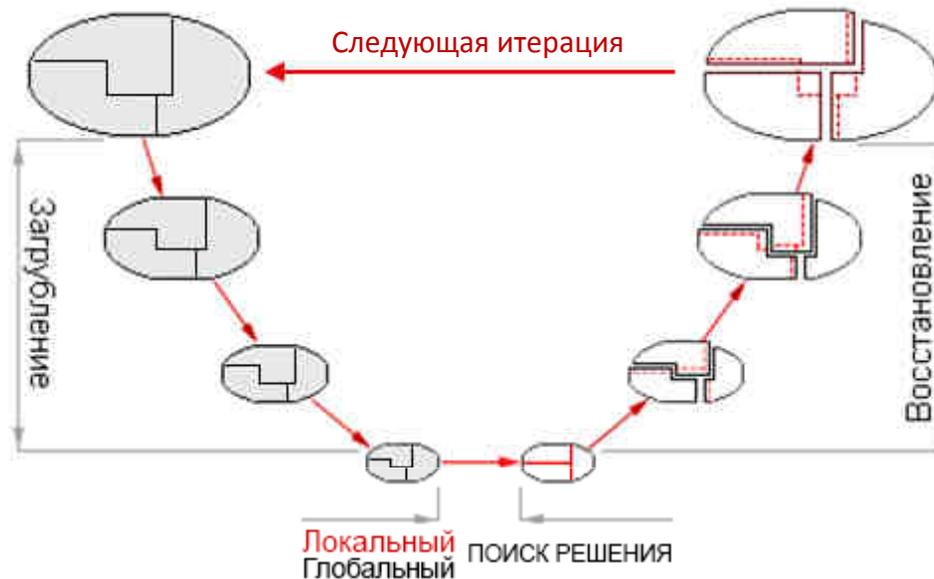
где  $Q(V_1, \dots, V_k) = \{\{v_i, v_j\} \in E \mid v_i \in V_i, v_j \in V_j, i = \overline{1, k}, j = \overline{1, k}, i \neq j\}$ .



**3-разбиение графа**

Задача  
сбалансированного  
 $k$ -разбиения графа  
принадлежит к  
классу  
NP-трудных задач!

# Многоуровневый итерационный метод



**Идея** использовать полученное решение на следующей итерации.

**Значения (сечение, баланс) любой проекции являются достижимыми оценками для решения на исходном графе.**

Это позволяет сравнивать решения на любом из уровней, а значит осуществлять поиск (локальный или глобальный). Найденное решение при восстановлении на исходный граф не может ухудшиться. Может только улучшиться за счет локальной оптимизации на промежуточных уровнях.

## Фаза редукции

1. Эксплуатирует информацию о структуре найденного решения.
2. Реализует однозначную проекцию решения на грубый граф.
3. Обеспечивает принцип сравнения проекций на всех уровнях.

## Фаза поиска

1. Разные стратегии поиска решения.
2. Локальный поиск пытается улучшить проекцию решения.
3. Глобальный поиск пытается найти новое решение.

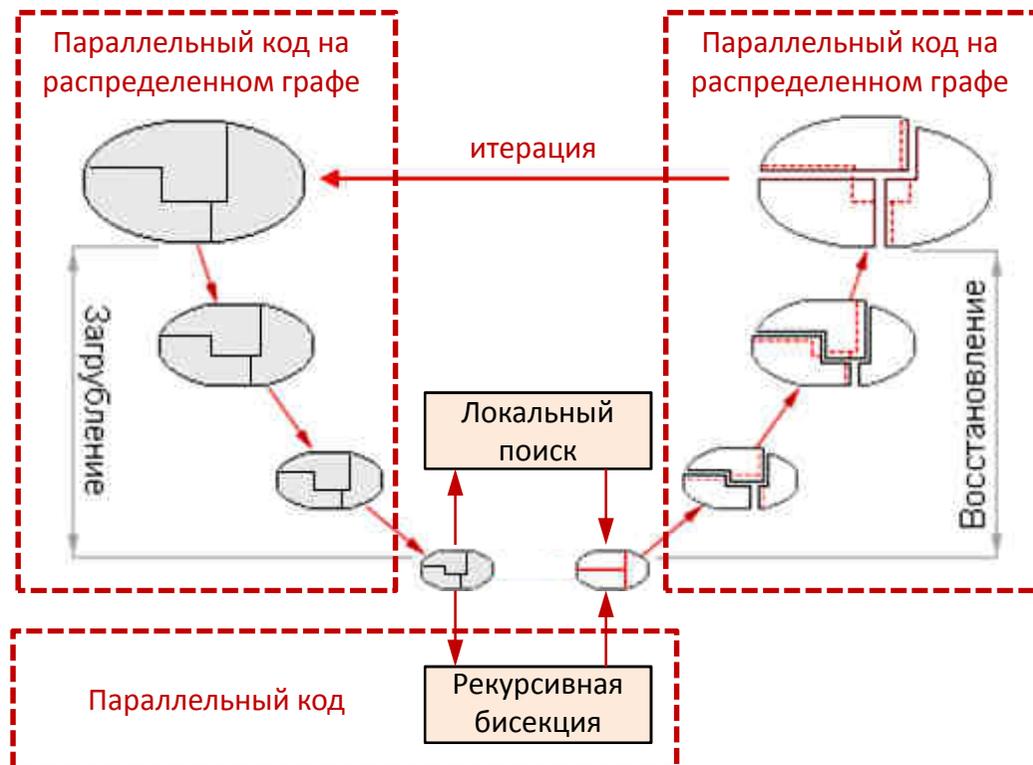
## Фаза восстановления

1. Проекция рекорда на исходный граф.
2. Пытается улучшить рекорд на разных уровнях редукции

# Параллельный и распределенный

## Тезисы

1. Можно свести задачу к порядкам, решаемым нераспределенным алгоритмом.
2. Для этого нужны [быстрые, параллельные] алгоритмы закругления, восстановления решения и локального поиска.



## Особенности

Граф распределен и его фрагменты на каждом процессоре, в общем случае  $k \neq p$ .

Параллельные средства: MPI

Программные интерфейсы – аналоги PARMETIS v.4.0.2.

# Тесты на бенчмарках

<http://staffweb.cms.gre.ac.uk/~wc06/partition>

graph	V	E	k=2			k=4			k=8			k=32			k=64					
			record	METIS	MATRUZ	record	METIS	MATRUZ	record	METIS	MATRUZ	record	METIS	MATRUZ	record	METIS	MATRUZ			
edd20	2395	7462	536 [IPMNEZ]	744	700	1134 [HYPAL]	1272	1239	1657 [HYPAL]	1863	1840	2028 [*+IPMNEZ]	2396	2309	2342 [KaBaPET]	2897	2704	2923 [KaBaPET]	3444	3602*
dete	2851	15093	181 [SDP]	200	195	363 [KaFFPaE]	433	397	628 [NW]	787	686	1076 [FSMAGP]	1289	1171	1743 [FSMAGP]	2032	1894	2747 [KaBaPET]	3461	2938
3elt	4720	13722	87 [JE]	87	87	197 [NW]	214	203	329 [KaFFPaE]	394	346	557 [KaFFPaE]	597	595	930 [FSMAGP]	1021	1019	1498 [KaBaPET]	1658	1642
uk	4824	6837	18 [JE]	27	20	39 [*+KFFP]	57	42	75 [KaFFPaE]	124	87	137 [*+IPMNEZ]	185	157	256 [KaBaPE]	303	269	394 [KaBaPE]	498	446
edd32	4960	9462	10 [J2.0]	11	10	33 [JE]	51	33	66 [FF]	100	69	117 [JE]	197	117	212 [JE]	292	212	476 [*+IPMNEZ]	610	556
bcsstk33	8738	291583	9914 [U]	10453	9914	20158 [FSMAGP]	23140	21679	33908 [FSMAGP]	35048	37514	54119 [FSMAGP]	59422	58911	76079 [*+IPMNEZ]	83710	83250	105338 [*+IPMNEZ]	114366	115338*
whitaker3	9800	28989	126 [JE]	135	126	378 [NW]	402	378	644 [*+IPMNEZ]	693	679	1068 [KaBaPET]	1218	1177	1632 [KaBaPET]	1798	1781	2438 [KaBaPET]	2703	2687
creck	10240	30380	182 [NW]	211	182	360 [NW]	450	360	666 [KaFFPaE]	735	717	1063 [FSMAGP]	1246	1123	1655 [*+KFFP]	1846	1780	2490 [KaBaPET]	2720	2821
wing_nodel	10937	75488	1668 [SDP]	1852	1689	3534 [FSMAGP]	3820	3667	5339 [FSMAGP]	5772	5906	8160 [FSMAGP]	8848	8678	11536 [FSMAGP]	12558	12682	15515 [FSMAGP]	16977	16954
fe_4elt2	11143	32818	130 [MRSB]	132	130	335 [FSMAGP]	385	350	578 [KaFFPaE]	673	620	979 [FSMAGP]	1117	1057	1571 [*+IPMNEZ]	1742	1695	2415 [KaBaPET]	2693	2653
vibrobox	12328	165250	10310 [JE]	11269	10310	18943 [FSMAGP]	21642	20346	23924 [KaFFPaE]	29021	31470	31232 [*+IPMNEZ]	36418	41622	38848 [*+IPMNEZ]	44588	46038	46094 [*+IPMNEZ]	51874	51029
bcsstk29	13992	302748	2818 [GrPart]	3057	2818	7925 [KaFFPaE]	9317	8328	13540 [KaFFPaE]	18769	13736	20924 [NW]	30563	23691	33451 [KaBaPE]	41319	37153	53981 [*+IPMNEZ]	62837	60330*
4elt	15606	45878	137 [NW]	148	137	319 [NW]	381	331	515 [FSMAGP]	600	547	887 [KaBaPE]	1084	1008	1493 [KaBaPE]	1757	1642	2485 [KaBaPET]	2772	2690
fe_sphere	16386	49153	384 [JE]	430	384	764 [FSMAGP]	820	806	1152 [JE]	1289	1320	1678 [FSMAGP]	1871	1954	2427 [FSMAGP]	2825	2761	3456 [FSMAGP]	3969	4027
cti	16840	48232	318 [JE]	357	318	889 [FSMAGP]	1213	976	1684 [*+KFFP]	2020	1813	2701 [KaBaPE]	3294	2948	3911 [KaBaPE]	4791	4308	5473 [KaBaPET]	6457	6471
memplus	17758	54196	5263 [HYPAL]	6367	6566	9292 [KaFFPaE]	10239	10305	11543 [*+KFFP]	12446	12531	12799 [*+IPMNEZ]	15674	14583	13877 [*+IPMNEZ]	16623	16171	15877 [*+IPMNEZ]	18213	18081
cs4	22499	43858	353 [KaFFPaE]	425	391	917 [*+IPMNEZ]	1072	1019	1420 [*+IPMNEZ]	1743	1624	2043 [KaBaPE]	2465	2331	2859 [*+IPMNEZ]	3390	3237	3962 [KaBaPE]	4628	4377
bcsstk30	28924	1007284	6251 [JE]	7054	6251	16372 [KaBaPE]	17671	16552	34068 [FSMAGP]	35793	34541	68787 [*+IPMNEZ]	81063	73294	109548 [*+IPMNEZ]	125964	122824	167049 [*+IPMNEZ]	186904	191159*
bcsstk31	35588	572914	2662 [HYPAL]	2983	2740	7082 [KaBaPE]	8372	7368	12843 [*+IPMNEZ]	14685	13458	22859 [*+IPMNEZ]	28824	24651	36383 [KaBaPE]	44237	39610	55396 [*+IPMNEZ]	64750	67656
fe_pwt	36519	144794	340 [KaPaPar]	374	340	700 [KaFFPaE]	841	704	1405 [FSMAGP]	1634	1435	2737 [FSMAGP]	2945	2807	5306 [KaBaPE]	6063	5575	7959 [FSMAGP]	8792	8653
bcsstk32	44609	985046	4667 [JE]	5330	4933	9181 [KaBaPET]	13826	11176	18955 [*+IPMNEZ]	25107	21254	34374 [KaBaPE]	47024	36522	58352 [*+IPMNEZ]	69063	62047	88598 [*+IPMNEZ]	108568	97405
fe_body	45087	163734	262 [MQ]	289	262	598 [*+IPMNEZ]	674	643	1012 [*+IPMNEZ]	1183	1093	1683 [KaBaPE]	1975	2057	2678 [*+IPMNEZ]	3381	3135	4501 [*+IPMNEZ]	6004	5096
t60k	60005	89440	65 [SDP]	84	82	203 [*+KFFP]	272	219	441 [*+IPMNEZ]	547	475	787 [KaBaPE]	937	905	1291 [KaBaPE]	1579	1501	2015 [*+IPMNEZ]	2445	2323
wing	62032	121544	773 [*+KFFP]	898	850	1593 [*+IPMNEZ]	1990	1798	2440 [*+IPMNEZ]	2952	2794	3775 [*+IPMNEZ]	4535	4359	5513 [*+IPMNEZ]	6539	6301	7534 [*+IPMNEZ]	9033	8578
brck2	62631	366559	660 [SDP]	767	706	2731 [KaFFPaE]	3126	2826	6592 [KaFFPaE]	7762	7062	11055 [KaBaPE]	13399	11912	16765 [KaBaPE]	19951	17996	25108 [FSMAGP]	29096	27002
finen512	74752	261120	162 [Ch2.0]	162	162	324 [Ch2.0]	324	324	648 [Ch2.0]	648	648	1296 [Ch2.0]	1296	1296	2592 [Ch2.0]	2592	2592	10560 [NW]	11214	10560
fe_tooth	78136	452591	3773 [SDP]	4339	4044	6765 [KaBaPE]	7976	7915	11151 [*+IPMNEZ]	13292	12220	16973 [*+IPMNEZ]	20500	18483	24274 [*+IPMNEZ]	28632	26518	33403 [*+IPMNEZ]	39133	36683
fe_rotor	99617	662431	1940 [KaFFPaE]	2206	2023	7050 [KaBaPE]	8104	7606	12309 [KaFFPaE]	14587	13386	19680 [KaFFPaE]	22860	21608	30356 [KaFFPaE]	34860	33874	44381 [*+IPMNEZ]	50818	48778
598e	110971	741934	2336 [MQ]	2505	2424	7816 [*+IPMNEZ]	8447	8185	15413 [*+IPMNEZ]	17282	16630	25198 [*+IPMNEZ]	28328	28516	37644 [*+IPMNEZ]	43549	42138	54684 [FSMAGP]	61961	60593
fe_ocean	143437	409593	311 [GrPart]	529	336	1693 [FSMAGP]	2099	1785	3886 [KaBaPE]	4927	4117	7338 [FSMAGP]	9347	8177	12034 [*+IPMNEZ]	15818	13395	19394 [*+IPMNEZ]	23834	20463
144	144649	1074393	6345 [*+IPMNEZ]	6793	6648	15140 [*+IPMNEZ]	17179	16779	24179 [*+IPMNEZ]	27621	27193	36608 [*+IPMNEZ]	41880	40057	54168 [*+IPMNEZ]	61070	60702	75777 [*+IPMNEZ]	86198	84564
wave	156317	1059331	8524 [KaFFPaE]	9044	8883	16638 [*+IPMNEZ]	19596	18503	28489 [*+IPMNEZ]	33586	31116	42025 [*+IPMNEZ]	47321	46821	59611 [*+IPMNEZ]	67068	65972	82006 [*+IPMNEZ]	93122	90867
m14b	214765	1679018	3802 [MQ]	4003	3895	12948 [*+IPMNEZ]	14023	13317	25126 [*+IPMNEZ]	27869	26926	41098 [*+IPMNEZ]	45718	46868	63411 [*+IPMNEZ]	72841	70544	94140 [*+IPMNEZ]	109045	104437
auto	448695	3314611	9450 [MQ]	10648	10290	25789 [KaFFPaE]	28783	27827	44732 [*+IPMNEZ]	48953	48399	74272 [*+IPMNEZ]	84400	80607	119004 [*+IPMNEZ]	130074	128003	169290 [*+IPMNEZ]	187554	183198

Обновление  
осень 2013 года

Chris Walshaw

The Graph  
Partitioning Archive

University of  
Greenwich

Продукт JOSTLE

В среднем вес  
сечения разбиений  
на 6.7% меньше  
сечений чем METIS.

Удалось  
воспроизвести  
24 рекорда.

# Тесты на сверхбольших задачах

ГРАФ	k	ЯДЕР	PARMATRUZ *		DISMATRUZ редукция 60%		DISMATRUZ редукция 10%	
			Сечение	Время (сек)	Сечение	Время (сек)	Сечение	Время (сек)
800835	32	1	11552	20	11924	8.3	11580	5.6
		4	11552	7	11705	3.3	11934	2.1
	1024	1	87052	164	89322	85	93970	19.9
		4	87052	43	93947	12.3	106735	9.9
trubka	32	1	1211023	509	1234494	192.6	1196827	40.14
		4	1211023	169	1196387	42	1224167	19.5
	1024	1	7232042	3360	7363833	1773.7	7481822	316
		4	7232042	844	7313827	354	8558495	110.6
P4_6  V =4 216 212  E = 1,4E+8	1024	1					11002180	435
		2					11304127	192
		4					11904791	119

Время выполнения компоновки (в секундах)

Тестовая схема 1 млрд. элементов	Коэффициент редукции 10					
	Использовано узлов (по 4 ядра на узле)					
Кол-во частей	1	4	16	32	64	128
2			224.4	188.3	196.1	297.1
1024			819.3	637.2	564.6	598.7
32768				100972	63279	77113

\*Пустота в ячейках означает, что такой эксперимент провести не удалось по причине нехватки памяти

**РЕАЛИЗАЦИЯ**  
язык C++, MPI.

**Задачи k-partitioning.**

**Техника:** МКП 320  
(Саров)

**ОС** Unix x64

**Техника:** Лобачевский  
(Н.Новгород)

**ОС** Windows x64

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Афраймович Л.Г., Власов В.С., Куликов М.С., Прилуцкий М.Х., Седаков Д.В., Старостин Н.В., Филимонов А.В. Задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами // Автоматизация в промышленности. №8, 2014, с.17-21
2. Бартенев Ю.Г., Старостин Н.В., Филимонов А.В. Многоуровневый алгоритм уменьшения ширины ленты симметрической распределенной матрицы // Системы управления и информационные технологии, №3.1(57), 2014. – С. 116-120
3. Балашов В.В., Попов Д.В., Старостин Н.В. Практическое применение собственной программной системы синтеза топологии в сквозном маршруте проектирования. Инженерный вестник Дона, 2014, <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2440>
4. Прилуцкий М.Х., Кумагина Е.А. Оптимальные стратегии распределения разнородных ресурсов в сетевых канонических структурах // Системы управления и информационные технологии. №1(55). 2014. С. 60–64
5. Старостин Н.В., Филимонов А.В. Декомпозиция графовых структур в топологическом синтезе интегральных схем. Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах. Материалы XIV международной конференции "Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах" (10-12 ноября, ПНИПУ, г. Пермь).
6. Starostin N.V., Klyuev I.V. Iteration multilevel method for the travelling salesman problem. Knowledge-Based Software Engineering, 11th Joint Conference, JCKBSE 2014, Volgograd, Russia, September 17-20, 2014, 477-482
7. Афраймович Л.Г., Прилуцкий М.Х., Старостин Н.В., Филимонов А.В. и др. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программное обеспечение «Кристалл».
8. Афраймович Л.Г., Прилуцкий М.Х., Старостин Н.В., Филимонов А.В. И др. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Программное обеспечение «Синтез».

### ИНДИКАТОРЫ:

**Публикации** в журналах «Web of Science», «Scopus», «РИНЦ»

**Обещали 4 выполнили 4**

**Доклады** на международных конференциях:

**Обещали 1 выполнили 2**

**РИД** (авторские свидетельства)

**Обещали 1 подали 1**

**Проекты** НИОКР

**договор № 829 от 16 мая 2014 г. на сумму 1 500 000 руб. (в 2014: 750 000 руб. – 1 этап выполнен)**