

REFERENCES

1. *Stepanenko S.A.* Otsenki uskoreniya vychisleniy gibridnymi sistemami [Evaluation of the acceleration of hybrid computing systems], *Plenarnye doklady Pyatoy Mezhdunarodnoy konferentsii «Parallel'nye vychisleniya i zadachi upravleniya» PACO 2010. Moskva, 26–28 oktyabrya 2010 g* [Plenary papers of the Fifth International conference "Parallel computations and control problems" PACO 2010. Moscow, 26-28 October 2010]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A.Trapeznikova RAN, 2010, pp. 61-71.
2. *Kalyaev I.A., Levin I.I.* Rekonfiguriruemye multikonveyernye vychislitel'nye sistemy dlya resheniya potokovykh zadach obrabotki informatsii i upravleniya [Reconfigurable multiconference computing system for solving ow problems of information processing and management], *Plenarnye doklady Pyatoy Mezhdunarodnoy konferentsii «Parallel'nye vychisleniya i zadachi upravleniya» PACO 2010. Moskva, 26–28 oktyabrya 2010 g* [Plenary papers of the Fifth International conference "Parallel computations and control problems" PACO 2010. Moscow, 26-28 October 2010]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2010, pp. 23-38.
3. *Bondalapati K., Prasanna V.K.* Reconfigurable Computing Systems, *Proc. IEEE*, 2002, Vol. 90, No. 7, pp. 1201-1217.
4. *Stepanenko S.A.* Sposob opredeleniya struktury gibridnoy vychislitel'noy sistemy [The way to define the structure of the hybrid computing system]. Patent RF № 2436151 na izobretenie.
5. Oak Ridge changes Jaguar's spots from CPUs to GPUs. Available at: http://www.theregister.co.uk/2011/10/11/oak_ridge_cray_nvidia_titan/.
6. *Tsil'ker B.Ya., S.A.Orlov.* Organizatsiya EVM i system [Organization of computers and systems]. St. Petersburg, 2004, 668 p.
7. Available at: <http://content.dell.com/us/en/gen/spredir.ashx/solutions/poweredge-c410x-thinkers>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Левин.

Степаненко Сергей Александрович – Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»; e-mail: ssa@vniief.ru; 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, 37; главный научный сотрудник; д.ф.-м.н.

Stepanenko Sergey Alexandrovich – Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics"; e-mail: ssa@vniief.ru; 37, Mira Avenue, Sarov, Nizhniy Novgorod region, 607188, Russia; chief research; dr. ofphis.-math. sc.

УДК 004.382.2

А.К. Мельников

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Рассматриваются пути модернизации, направленные на увеличение значений технических характеристик составных элементов реконструируемой вычислительной системы, таких как производительность и количество вычислительных элементов. Пути модернизации основываются на увеличении производительности вычислительных элементов за счет применения кристаллов программируемых логических интегральных схем новых поколений и на увеличении количества вычислительных элементов системы. Анализ путей модернизации проводится в условиях сохранения времени решения задачи при увеличении её размерности. Приводятся результаты анализа применения экстенсивного, интензивного и комбинированного путей модернизации при принятых ограничениях. При применении различных путей модернизации исследуются зависимости значений технических характеристик модернизируемой реконструируемой вычислительной системы от значений приращения размерности решаемой задачи и значений других её параметров.

Реконструируемые вычислительные системы; кластерные системы; программируемые логические интегральные схемы.

A.K. Melnikov

RESEARCH OF POSSIBLE MODIFICATIONS OF RECONFIGURABLE COMPUTER SYSTEMS

The paper covers research of ways of modification of reconfigurable computer systems based on FPGAs, like increasing of technical characteristics of elements of the reconfigurable computer system such as the performance and the number of computational elements. Ways of modification are based on increasing of the performance of computational elements by using FPGA chips of new generations, and on increasing of the number of computational elements of the system. Analysis of ways of modification is performed according to the following condition: the time of the task execution remains constant when its dimension grows. The results of analysis of application of extensive, intensive and combined ways of modification with accepted limitations are shown. Using various ways of modification we analyze dependencies of technical characteristics of the modified reconfigurable computer system from the increment of the dimension of the solving task and values of its other parameters.

Reconfigurable computer systems; cluster systems; FPGA.

Введение. В настоящее время наряду с развитием универсальных процессоров бурно развивается направление по созданию программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), основным отличием которых является возможность программно настраивать их архитектуру (конфигурировать, реконфигурировать) под требования решаемой задачи. Использование для построения многопроцессорных вычислительных систем (МВС) в качестве вычислительных элементов (ВЭ) отдельных ПЛИС либо функциональных устройств на базе ПЛИС открыло целое направление по разработке реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [1, 2], общая концепция создания которых представлена в [3] и целом ряде работ тех же авторов [4, 5].

К настоящему моменту изготовлено и активно используется в разных областях деятельности значительное количество РВС на базе ПЛИС [6, 7, 8], что делает актуальным рассмотрение путей их дальнейшей модернизации для увеличения сложности решаемых РВС задач.

1. Экстенсивный путь модернизации РВС. Рассмотрим некоторые требования, предъявляемые к характеристикам вычислительных элементов ВЭ РВС, построенных по кластерному принципу [1], [9, 10]. Будем полагать, что проблемная область, для решения задач которой используется РВС во время t , содержит проблемы вычислительной сложности $K=K(t)$. Вычислительная сложность задач проблемной области выражается степенной функцией и имеет вид

$$K(t)=A^{v(t)},$$

где $v(t)$ – размерность или значность задачи; $v(t) \in \mathbb{N}$ – множество натуральных чисел, является возрастающей функцией; $A = \text{const}$ от 2 до 256.

Также положим, что РВС во время t – РВС(t) – содержит $n(t)$ однородных ВЭ на базе ПЛИС производительностью $p(t)$ решений в секунду каждый, и РВС(t) решает задачи сложности $K(t)$ за время T , т.е.

$$A^{v(t)} / (n(t) \times p(t)) = T. \quad (1)$$

Рассмотрим, как нужно модернизировать РВС($t+\Delta$), удовлетворяющую условию (1), через время Δ , когда необходимо будет решать задачу большей значности $v(t+\Delta)$ за то же время T . Обозначив число ВЭ РВС($t+\Delta$) во время ($t+\Delta$) через $n(t+\Delta)$ и производительность каждого ВЭ через $p(t+\Delta)$ согласно (1), выпишем условие модернизации следующим образом:

$$A^{v(t+\Delta)} / (n(t+\Delta) \times p(t+\Delta)) = T. \quad (2)$$

Путь модернизации РВС, при котором увеличивается количество ВЭ $n(t+\Delta)$ при сохранении производительности каждого ВЭ, т.е.

$$p(t+\Delta) = p(t),$$

назовем экстенсивным путем модернизации РВС.

Из сделанного предположения об экстенсивном пути модернизации условие модернизации (2) принимает следующий вид:

$$A^{v(t+\Delta)} / (n(t+\Delta) \times p(t)) = T. \quad (3)$$

Учитывая (1), получаем соотношение

$$n(t+\Delta) / n(t) = A^{v(t+\Delta) - v(t)}, \quad (4)$$

определяющее, во сколько раз мы должны увеличить число ВЭ РВС(t) для решения задачи повышенной значности $v(t+\Delta)$ за то же время T.

В табл. 1 для разных значений A приведены коэффициенты увеличения количества ВЭ РВС(t) при увеличении значности решаемых задач предметной области на $v(t+\Delta) - v(t)$, обозначим их через $\alpha_A(v(t+\Delta) - v(t))$.

Таблица 1

Коэффициенты увеличения значений технических характеристик модернизированной РВС(t+A)

$v(t+\Delta) - v(t)$ \ A	1	2	4	8	10
2	2	4	16	256	1024
10	10	100	10 000	100 000 000	10 000 000 000
26	26	676	456 976	208 827 064 576	$\sim 1,41 \times 10^{14}$
32	32	1024	1 048 576	$\sim 1,09 \times 10^{12}$	$\sim 1,12 \times 10^{15}$
256	265	65 536	16 777 216	$\sim 1,84 \times 10^{19}$	$\sim 1,20 \times 10^{24}$

Таким образом, у модернизированной во время $(t+\Delta)$ РВС(t+\Delta), решающей за фиксированное время T задачу повышенной значности $v(t+\Delta)$, количество ВЭ $n(t+\Delta)$ – при сохранении производительности каждого $p(t+\Delta)$ на прежнем уровне $p(t)$ определяются следующим образом:

$$n(t+\Delta) = n(t) \times \alpha_A(v(t+\Delta) - v(t)). \quad (5)$$

2. Интенсивный путь модернизации РВС. Теперь определим производительность ВЭ $p(t+\Delta)$, модернизированной во время $(t+\Delta)$ РВС(t+\Delta), решающей за фиксированное время T задачу повышенной значности $v(t+\Delta)$ при условии сохранения количества ВЭ, т.е.

$$n(t+\Delta) = n(t),$$

назовем этот путь интенсивным путем модернизации РВС.

При указанных предположениях условие модернизации (2) принимает вид

$$A^{v(t+\Delta)} / (n(t) \times p(t+\Delta)) = T. \quad (6)$$

Учитывая (1), получаем отношение

$$p(t+\Delta) / p(t) = A^{v(t+\Delta) - v(t)}. \quad (7)$$

Определим (7) как коэффициент увеличения производительности ВЭ модернизированной РВС(t+\Delta).

Анализируя (4) и (7), видим, что табл. 1 содержит общие коэффициенты увеличения значений технических характеристик РВС(t+\Delta), определяемых параметрами задачи предметной области.

При использовании экстенсивного пути модернизации РВС, даже при увеличении значности задачи на 1 для $A=2$, необходимо увеличить количество оборудования $n(t+\Delta)$ (количество ВЭ) РВС($t+\Delta$) по сравнению с количеством оборудования РВС(t) вдвое, что по финансовым затратам сопоставимо с построением уже имеющейся РВС(t). При значительном росте значений параметров решаемой задачи предметной области модернизация РВС экстенсивным путем вряд ли практически выполнима и имеет смысл.

Рассмотрим интенсивный путь модернизации РВС. В качестве ВЭ построения РВС используются функциональные устройства (вычислительные платы), состоящие из нескольких ПЛИС. Прирост производительности ВЭ при использовании ПЛИС разных поколений [5] приведен в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты увеличения производительности ВЭ РВС при использовании ПЛИС разных поколений

Характеристики ВЭ	Тип ПЛИС					
	Virtex-2 Pro	Virtex-4	Virtex-5	Virtex-6	Virtex-7	Virtex8 Ultra Scale
Индекс версии кристалла -i	3	4	5	6	7	8
Год выпуска (t_i)	2004	2006	2007	2009	2012	2015
Производительность ВЭ $maxp(t_i) \times 10^9$ (resh./c)	17	50	140	360	785	2200
Коэффициент увеличения производительности $\alpha(i) = p(t_{i+1}) / p(t_i)$	2,94	2,80	2,57	2,18	2,36	2,8

Анализ значений коэффициентов прироста производительности $\alpha(i)$ из табл. 2 показывает, что при переходе от одной версии кристаллов к другой версии их значение не превышает 3, что в соответствии со значениями коэффициентов $\alpha_A(v(t+\Delta_i)-v(t))$ табл. 1 может позволить увеличить значность решаемой задачи лишь на 1 и то при наименьшем $A=2$.

3. Комбинированный путь модернизации РВС. Как видно из анализа экстенсивного и интенсивного путей модернизации РВС, они не приводят к результатам, позволяющим значительно повысить значность $v(t+\Delta)$ решаемых задач при сохранении времени их решения T . Логично рассмотреть **комбинированный путь** модернизации РВС, заключающийся в увеличении производительности ВЭ $p(t+\Delta)$ в РВС($t+\Delta$) за счет применения кристаллов ПЛИС новых поколений с одновременным увеличением количества ВЭ $n(t+\Delta)$. Предположим, что мы будем проводить модернизацию РВС во время, когда появилось следующее поколение кристаллов, т.е.

$$t = t_i, t+\Delta = t_{i+1}, \quad (8)$$

обозначения приводятся в соответствии с обозначениями, примененными в табл. 2.

Тогда условие модернизации (2) имеет вид

$$A^{v(t_{i+1})} / (n(t_{i+1}) \times p(t_{i+1})) = T \quad (9)$$

и, учитывая (1) и (9), можем записать равенство

$$A^{v(t_i)} / (n(t_i) \times p(t_i)) = A^{v(t_{i+1})} / (n(t_{i+1}) \times p(t_{i+1})),$$

которое, учитывая коэффициент увеличения производительности из табл. 2 – $\alpha(i) = p(t_{i+1}) / p(t_i)$, принимает вид

$$n(t_{i+1}) / n(t_i) = 1 / \alpha(i) \times A^{v(t_{i+1}) - v(t_i)}. \quad (10)$$

Определим α как математическое среднее $\alpha(i)$ из табл. 2, тогда $\alpha=2,6$, преобразуем (10) к виду

$$n(t_{i+1}) / n(t_i) = 0,38 \times A^{v(t_{i+1}) - v(t_i)}. \quad (11)$$

Значения коэффициентов увеличения количества ВЭ РВС(t_{i+1}), модернизированной при применении комбинированного пути, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты увеличения значений количества ВЭ РВС(t_{i+1}), комбинированного пути модернизации

$v(t_{i+1}) - v(t_i)$ A	1	2	4	8	10
2	0,76	1,52	6,08	97	389,12
10	3,8	38	3 800	38 000 000	3 800 000 000
26	9,88	256,88	173 650	79 354 284 538	$\sim 5,35 \times 10^{13}$
32	12,16	389,12	398 458	$\sim 4,14 \times 10^{11}$	$\sim 4,25 \times 10^{14}$
256	97,28	24 903	6 375 342	$\sim 6,99 \times 10^{18}$	$\sim 4,56 \times 10^{23}$

Соотношения (4), (7) и (11) показывают, что для увеличения значности решаемой задачи с $v(t)$ до $v(t+\Delta)$ значения параметров ВЭ модернизированной РВС($t+\Delta$) зависят не только от самой величины, на которую мы хотим повысить значность $v(t+\Delta) - v(t)$, но и от того уже достигнутого нами значения значности $v(t)$, с которого мы это повышение хотим произвести.

Также эти соотношения показывают, что каждый следующий шаг в повышении значности решаемой задачи требует все большего увеличения ресурсов РВС($t+\Delta$), таких как производительность вычислительных элементов $p(t+\Delta)$ и их количество $n(t+\Delta)$.

Заключение. Проведенные рассуждения позволяют сделать следующие выводы о рассмотренных путях модернизации РВС.

Применение путей модернизации реконфигурируемых вычислительных систем, основанных только на использовании кристаллов новых поколений и увеличении количества вычислительных элементов, не позволяет достигнуть практически значимого увеличения размерности задач, имеющих степенную сложность при сохранении времени их решения. Это оставляет актуальным дальнейшее проведение исследований и разработку других методов модернизации реконфигурируемых вычислительных систем для эффективного решения задач повышенной размерности, имеющих степенную сложность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воеводин Вл.В. Суперкомпьютеры: вчера, сегодня и завтра // Наука и жизнь. – 2000. – № 5. – С. 76-83.
2. Каляев А.В., Левин И.И. Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. – М.: Янус-К, 2003. – 380 с.
3. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры: Монография / Под общ. ред. И.А. Каляева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. – 344 с.
4. Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС // Интеллект & Технологии. – 2014. – № 1(7). – С. 40-47.

5. Дордопуло А.И., Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы нового поколения // Вычислительные методы и программирование. – 2011. – Т. 12. – С. 82-89.
6. Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Гудков В.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС VIRTEX-7 // Программная инженерия. – 2014. – № 6. – С. 3-8.
7. Дордопуло А.И., Левин И.И., Каляев И.А., Семерников Е.А. Высокопроизводительные реконфигурируемые вычислительные системы на основе ПЛИС Virtex-6 и Virtex-7 // Труды Международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии 2012 (PaVT'2012)» (Новосибирск, 26-30 марта 2012 г.). – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2012. – С. 449-458.
8. Левин И.И., Дордопуло А.И., Каляев И.А., Семерников Е.А. Реконфигурируемая вычислительная система PBC-7 на основе ПЛИС VIRTEX-7 // Труды 6-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления МКПУ-2013, 30 сентября-5 октября 2013 г., с. Дивноморское, Геленджик, Россия. – Т. 4. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 166-169.
9. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы. – М.: Нолидж, 1999. – 320 с.
10. Левин И.И., Мельников А.К. Методы управления гибридными высокопроизводительными вычислительными комплексами // Материалы 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2014)»: в 2 т. Т. 1. – Ростов-на-Дону. Изд-во ЮФУ, 2014. – С. 55-60.

REFERENCES

1. Voevodin V.I. Superkomp'yutery: vchera, segodnya i zavtra [Supercomputers: yesterday, today and tomorrow], *Nauka i zhizn'* [Science and life], 2000, No. 5, pp. 76-83.
2. Kalyaev, A.V., Levin I.I. Modul'no-narashchivaemye mnogoprotsessornye sistemy so strukturno-protsedurnoy organizatsiyey vychisleniy [Modular expandable multiprocessor system with structural and procedural organization of computing]. Moscow: Yanus-K, 2003, 380 p.
3. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A., Shmoylov V.I. Rekonfiguriruemye mul'tikonveyernye vychislitel'nye struktury [Reconfigurable multiconference computational patterns]: Monografiya. 2nd ed., pererab. i dop. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2009, 344 p.
4. Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS [Reconfigurable computing system based on FPGA], *Intellekt & Tekhnologii* [Intelligence & Technology], 2014, No. 1(7), pp. 40-47.
5. Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Levin I.I., Semernikov E.A. Vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy novogo pokoleniya [High-performance reconfigurable computing system of the new generation], *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computational methods and programming], 2011, Vol. 12, pp. 82-89.
6. Levin I.I., Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Gudkov V.A. Vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS VIRTEX-7 [High-performance reconfigurable computing system based on FPGA VIRTEX-7], *Programmnaya inzheneriya* [Program engineering], 2014, No. 6, pp. 3-8.
7. Dordopulo A.I., Levin I.I., Kalyaev I.A., Semernikov E.A. Vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy na osnove PLIS Virtex-6 i Virtex-7 [High-performance reconfigurable computing system based on FPGA Virtex-6 and Virtex-7], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii 2012 (PaVT'2012)» (Novosibirsk, 26-30 marta 2012 g.)* [Proceedings of International scientific conference "Parallel computing technologies 2012 Pushchino'2012") (Novosibirsk, Russia, 26-30 March 2012)]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2012, pp. 449-458.

8. *Levin I.I., Dordopulo A.I., Kalyaev I.A., Semernikov E.A.* Rekonfiguriruemaya vychislitel'naya sistema RVS-7 na osnove PLIS VIRTEX-7 [Reconfigurable computing system RVS-7 FPGA-based VIRTEX-7], *Trudy 6-y Vserossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya MKPU-2013, 30 sentyabrya-5 oktyabrya 2013 g.* [Proceedings of the 6th all-Russian multicongress on the management of mku-2013, September 30-October 5, 2013], s. Divnomorskoe, Gelendzhik, Rossiya. Vol. 4. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2013, pp. 166-169.
9. *Korneev V.V.* Parallelnye vychislitel'nye sistemy [The parallel computing system]. Moscow: Nolidzh, 1999, 320 p.
10. *Levin I.I., Mel'nikov A.K.* Metody upravleniya gibridnymi vysokoproizvoditel'nymi vychislitel'nymi kompleksami [Management methods hybrid high-performance computing complexes], *Materialy 3-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Superkomp'yuternye tekhnologii (SKT-2014)»* [The materials of the 3rd all-Russian scientific-technical conference "Supercomputer technologies (SKT-2014)"]: v 2 vol. Vol. 1. Rostov-on-Don: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2014, pp. 55-60.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Мельников Андрей Кимович – НТЦ ЗАО «ИнформИнвестГрупп»; e-mail: ak@iigroup.ru; 117587, Москва, Варшавское шоссе, 125, стр. 17; тел.: 84952870035; к.т.н.; доцент ВАК; главный научный сотрудник.

Melnikov Andrey Kimovitch – STC CLSC InformInvestGroup; e-mail: ak@iigroup.ru; 125, Varshavskoye road, building 17, Moscow, 117587, Russia; phone: +74952870035; cand. of eng. sc.; associate professor of SAC; chief research officer.