Раздел I. Современные вычислительные технологии в задачах управления и моделирования

УДК 519.224.22 DOI 10.18522/2311-3103-2021-7-6-19

А.К. Мельников, И.И. Левин, А.И. Дордопуло, И.В. Писаренко

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЧНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ЗНАЧЕНИЙ СТАТИСТИК

В статье рассматривается решение вычислительно-трудоемкой задачи – расчета распределений вероятностей значений статистик – с помощью современных вычислительных технологий. Для сокращения вычислительной сложности при обеспечении достаточного уровня эффективности критериев не ниже заданного порога предложено использование Δ-точных приближений. Для расчета точных приближений используется метод второй кратности, основанный на решении системы линейных уравнений, который позволяет при заданном вычислительном ресурсе рассчитывать точные приближения для максимальных значений параметров выборок. Наиболее трудоемкая часть метода второй кратности состоит в процедуре последовательного получения векторов возможных решений и их проверки на принадлежность к самим решениям. Проверка векторов возможных решений на принадлежность к решениям системы информационно независима, поэтому алгоритм расчета можно распараллелить по данным. Приведена формула определения алгоритмической сложности расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик, на основе которой получены оценки сложности современных практических задач для выборок со следующими значениями (N, n) мощности алфавита и объёма выборки: (256,1280), (128,640), (128, 320) и (192,3200) при точности расчета $\Delta=10^{-5}$. Вычислительная сложность расчета составляет от $9{,}68\cdot10^{22}$ до $1{,}60\cdot10^{52}$ операций, средняя – порядка $4{,}55\cdot10^{25}$ операций, число проверяемых векторов – от $6{,}50\cdot10^{23}$ до $1{,}39\cdot10^{50}$, а число решений – от $4{,}67\cdot10^{12}$ до $5{,}60\cdot10^{25}$ соответственно. Общее время решения при круглосуточном режиме вычислений не должно превышать 30 дней или $2{,}592\cdot10^{6}$ сек. Для полученных оценок сложности проанализированы возможности современных кластерных вычислительных систем на основе универсальных процессоров, графических ускорителей и реконфигурируемых вычислительных систем на основе программируемых логических интегральных схем. Для каждой технологии определено число вычислительных узлов, требуемых для расчета точных приближений с указанными параметрами в заданное время. Показано, что ни одна из рассмотренных вычислительных технологий на современном уровне развития техники не позволяет получить решение для необходимых параметров расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик. В заключении сделан вывод о необходимости анализа возможностей перспективных вычислительных технологий на основе квантовых и фотонных компьютеров, а также гибридных вычислительных систем для расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик с заданными параметрами в оперативно-приемлемое время.

Вероятность; статистика; точное распределение; точное приближение; алгоритмическая сложность; кластерная система; процессор; графический ускоритель; реконфигурируемая вычислительная система; ПЛИС.

A.K. Melnikov, I.I. Levin, A.I. Dordopulo, I.V. Pisarenko

ANALYSIS OF ADVANCED COMPUTER TECHNOLOGIES FOR CALCULATION OF EXACT APPROXIMATIONS OF STATISTICS PROBABILITY DISTRIBUTIONS

In the paper we consider the solution of a computationally expensive problem such as calculation of statistics probability distribution with the help of modern computer technologies. To reduce computational complexity and to provide a sufficient level of criteria efficiency not less than the specified threshold, we suggest to use Δ*-exact approximations. To calculate exact approximations, we use the method of second order, based on solution of a system of linear equations. Owing to this method, it is possible to calculate exact approximations for the maximum values of sample parameters for available computational resource. The most laborious part of the method of second order is the procedure of sequential detection of the vectors of possible solutions and test if the vectors belong to the set of solutions. The system solution set membership test for the vectors of possible solutions is data independent, so the algorithm can be data-parallelized. We give the algorithm complexity equation for calculation of exact approximations of statistics probability distributions. Using this equation, we calculated the complexity of modern practical problems for the samples with the parameters (N, n) of the alphabet power and the sample size: (256,1280), (128,640), (128, 320), and (192,3200) for the accuracy of calculations* $\Delta=10^{-5}$*. The computational complexity is* $9.68\cdot10^{22}$*-*$1.60\cdot10^{52}$ *operations, and its average value is about* $4.55\cdot10^{25}$ *operations, the number of tested vectors is* $6.50\cdot10^{23}$*-*$1.39\cdot10^{50}$*, and the number of solutions is* $4.67\cdot10^{12}$*-*$5.60\cdot10^{25}$*, respectively. The total solution time for clock-round duration of calculations cannot exceed 30 days or* $2.592\cdot10^{6}$ *sec. For the obtained complexity evaluation, we analysed abilities of modern cluster computer systems based on general-purpose processors, graphic accelerators, and FPGA-based reconfigurable computer systems. For each technology, we determined the number of computational nodes needed for calculation of exact approximations with the specified parameters during the specified time. We proved that it is impossible to obtain a solution for the required parameters of exact approximations of statistics probability with the help of the reviewed modern computer technologies. In conclusion, we claim that it is necessary to analyse the abilities of advanced computer technologies based of quantum and photonic computers, and also hybrid computer systems for calculation of exact approximations of statistics probability distributions with the specified parameters during reasonable time.*

Probability; statistic; exact distribution; exact approximation; algorithm complexity; cluster system; processor; graphic accelerator; reconfigurable computer system; FPGA.

Введение. Применение критериев с наибольшей относительной эффективностью [1] для статистической обработки последовательностей (текстов) позволяет максимально снизить число ложно принятых решений о справедливости проверяемых гипотез, тем самым увеличивая общую скорость обработки. Наибольшую относительную эффективность обеспечивают критерии на основе точных распределений эталонных статистик, но их расчет для большинства значений параметров выборок, таких как мощность алфавита N и объем выборки n (т.е. длины последовательности, текста), является вычислительно трудоемкой задачей, не всегда разрешимой даже с использованием современных вычислительных средств [2]. Для сокращения вычислительной сложности с одновременным обеспечением заданного уровня эффективности критериев вместо точных распределений можно использовать их точные приближения [3, 4] с возможной потерей эффективности критерия не ниже заданного порога.

В качестве точных приближений распределений используются Δ-точные распределения [5], которые отличаются от точных распределений на заранее заданную незначительно малую величину Δ. Одним из методов расчета точных приближений является метод второй кратности, основанный на решении системы линейных уравнений, который позволяет при заданном ресурсе рассчитывать точные приближения для максимальных значений параметров выборок. Метод имеет полиномиальную сложность, но из-за роста требований к значениям параметров выборок требует для своей реализации применения современных вычислительных технологий.

Данная статья посвящена анализу возможностей современных вычислительных технологий и технических средств для расчета точных приближений распределений с максимально возможными значениями параметров выборок.

Постановка задачи. Точные приближения распределений вероятностей значений статистики $P_\Delta\{S_{N,n} \geq c\}$ для выборки длины n, алфавита $A_N = \{a_1, \ \dots \ , a_N\}$ мощности N, отличающиеся от точных распределений $P_T\{S_{N,n} \geq c\}$ на заранее задаваемую сколь угодно малую величину Δ, описываются как

$$|P_\text{T}\{S_{N,n} \geq c\} - P_\Delta\{S_{N,n} \geq c\}| \leq \Delta. \quad (1)$$

Для расчета точных приближений (1) более предпочтителен метод второй кратности (МВК), основанный на решении системы линейных уравнений

$$\begin{cases} \mu_0^{(v)} + \mu_1^{(v)} + \ \dots \ + \mu_n^{(v)} = N \\ 1 \cdot \mu_1^{(v)} + 2 \cdot \mu_2^{(v)} + \ \dots \ + n \cdot \mu_n^{(v)} = n. \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mu_j^{(v)}$ определяет число знаков алфавита A_N, встретившихся j раз в ν-й выборке объёма n.

Алгоритм МВК [6] основан на последовательном переборе векторов $\mu^{(v)} = \{\mu_0^{(v)}, \mu_1^{(v)}, \ \dots \ , \mu_n^{(v)}\}$ области поиска $M_{n,r}^N$

$$M_{n,r}^N = \{\mu_i^{(v)} | i = \overline{0, r}, \ \mu_i^{(v)} \in N, \ 0 \leq \mu_i^{(v)}; \ \mu_i^{(v)} = 0 | i = \overline{r+1, n}; \ r \leq n\}, \quad (3)$$

ограниченной значением параметра r ≤ n. Для каждого $\mu^{(v)}$ проверяется принадлежность к решениям системы линейных уравнений

$$\begin{cases} \mu_0^{(v)} + \mu_1^{(v)} + \ \dots \ + \mu_n^{(v)} = N \\ 1 \cdot \mu_1^{(v)} + 2 \cdot \mu_2^{(v)} + \ \dots \ + n \cdot \mu_n^{(v)} = n. \end{cases}, \quad (4)$$

где в соответствии с методикой расчета точных приближений [7] параметр ограничения r оценивается с помощью вероятности статистики максимальной частоты

$$M_n = \max_{i=1}^{N} h_i$$

при выполнении условия $r = m(N, n, \Delta) = \{\min \ \ m \, | P\{M_n < m\} \geq 1 - \Delta\}$, где Δ есть точность. Если $\mu^{(v)}$ принадлежит решениям (4), то в зависимости от $\mu^{(v)}$ вычисляются значения статистики $S_{N,n}(\mu^{(v)})$ и вероятности $P\left(S_{N,n} = S_{N,n}(\mu^{(v)})\right)$, с которой эта статистика принимает полученное значение.

Алгоритмическая сложность [8] МВК определяется выражением

$$C_{МВК}\big(P_\Delta\{S_{N,n} \geq c\}\big) = L_{\mu(N,n,r)} \cdot 5 \cdot r + K_\mu(N, n, r) \cdot (5(r+1) + 2(N+r) + 3) +$$
$$+2 \cdot K_\mu(N, n, r) \cdot \log_2 K_\mu(N, n, r) + 2 \cdot K_\mu(N, n, r), \quad (5)$$

где основная трудоёмкость сосредоточена в первом члене, вычисляемом как

$$L_{\mu(N,n,r)} = (N+1)^{\min \ \left(\left[\frac{n}{N}\right], r\right) + 1} \cdot \frac{\left(\min \ \left(\left[\frac{n}{N}\right], r\right)\right)!}{\left(n + \min \ \left(\left[\frac{n}{N}\right], r\right)\right)!} \cdot \frac{(n+r)!}{r!}. \quad (6)$$

Определим алгоритмическую сложность расчета точных приближений для параметров на границе Фишера n=5N [9], а также для параметров в середине области неопределенности, ограниченной сверху и снизу границей Фишера и осью абсцисс, соответственно (рис. 1).

Рис. 1. Примеры параметров выборок для оценки алгоритмической сложности расчетов точных приближений распределений

Из выражений (5) и (6) видно, что алгоритмическая сложность расчета $C_{МВК}(P_{\Delta}\{S_{N,n} \geq c\})$ экспоненциально зависит от объёма выборки n, так как параметр ограничения r является неубывающей функцией, зависящей от n : r=f(n), а из условия n_1<n_2 следует $f(n_1)\leq f(n_2)$. Таким образом, задачу расчета точных приближений можно отнести к классу задач полиномиальной сложности, для решения которых требуется полиномиальное время $2^{\text{poly}\,(r)}$, где poly (r) – это полином степени r [10].

Как уже отмечалось, наиболее трудоемкая часть метода МВК сосредоточена в процедуре последовательного получения векторов возможных решений и их проверки на принадлежность к самим решениям (схему процедуры см. на рис. 2).

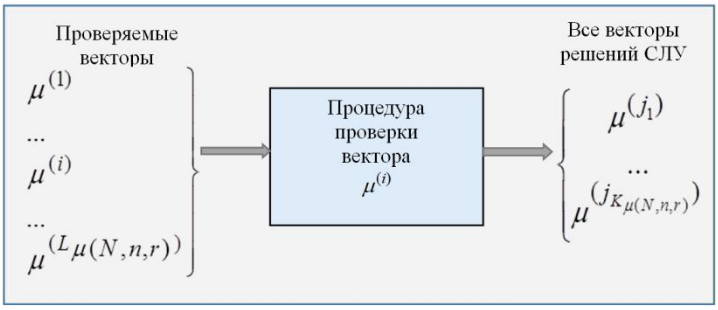

Рис. 2. Схема процедуры проверки векторов

Алгоритм можно распараллелить по данным. Проверка любых $\mu^{(i)}$ и $\mu^{(j)}$ на принадлежность к решениям системы при $i\neq j$ информационно независима и может выполняться одновременно или параллельно.

Метод МВК позволяет вычислять точные приближения распределений $P_{\Delta}\{S_{N,n} \geq c\}$ для максимальных значений параметров выборки N и n при одинаковом вычислительном ресурсе.

Современные задачи требуют расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик для значений мощности алфавита N до 256 и значений объёмов выборки до 1280 за общее время вычислений не более 30 дней. Поэтому анализ вычислительных технологий, типов вычислительных систем и программного обеспечения будет выполняться для указанных параметров.

Оценка вычислительной сложности метода расчета точных приближений распределений. Для оценки вычислительной сложности согласно современным требованиям практических задач были определены выборки со следующими значениями (N, n) параметров мощности алфавита и объёма выборки: (256,1280), (128,640), (128, 320) и (192,3200). Для определения параметра ограничения r зададим точность вычислений $\Delta=10^{-5}$. Согласно методике расчета точных приближений [7], при помощи программы [11] был вычислен параметр r. В результате получены следующие значения параметров ограничений:

$$r = m(N, 5N, \Delta) = m(256, 1280, 10^{-5}) = 23;$$

$$r = m(N, 5N, \Delta) = m(128, 640, 10^{-5}) = 22;$$

$$r = m(128, 320, 10^{-5}) = 16;$$

$$r = m(192, 320, 10^{-5}) = 14.$$

Далее, согласно (5) и (6), с помощью программы [12] вычислены значения алгоритмической сложности расчета точных приближений распределений и сокращенного количества проверяемых векторов для получения всех решений. Данные по алгоритмической сложности, полученные для рассматриваемых параметров выборок, представлены в таблице 1.

Согласно таблице 1, максимальная вычислительная сложность расчета составляет $1{,}60\cdot10^{52}$ операций, средняя – примерно $4{,}55\cdot10^{25}$ операций. В процессе расчета точных приближений необходимо проверить от $6{,}50\cdot10^{23}$ до $1{,}39\cdot10^{50}$ векторов и получить от $4{,}67\cdot10^{12}$ до $5{,}60\cdot10^{25}$ решений. Общее время вычислений не должно превышать один месяц или 30 дней ($2{,}592\cdot10^{6}$сек.) в круглосуточном режиме.

Таблица 1

Характеристики алгоритма расчета точных приближений для различных параметров выборок

№ п/п	Параметры выборки N/n	Параметр ограничения объема выборки r	Число проверок сокращенное $L_{\mu(N,n,r)}$	Число решений $K_\mu(N, n, r$	Общая сложность $C_{МВК}(P_\Delta\{S_{N,n} \geq$ (операций)	Необходимая производит. для месяца расчета (оп/сек)
1	256 / 1280	23	$1{,}39\cdot10^{50}$	$5{,}60\cdot10^{25}$	$1{,}60\cdot10^{52}$	$6{,}15\cdot10^{45}$
2	128 / 640	22	$2{,}67\cdot10^{27}$	$1{,}76\cdot10^{20}$	$2{,}94\cdot10^{29}$	$1{,}13\cdot10^{23}$
3	192 / 320	14	$6{,}50\cdot10^{23}$	$4{,}67\cdot10^{12}$	$4{,}55\cdot10^{25}$	$1{,}75\cdot10^{19}$
4	128 / 320	16	$1{,}21\cdot10^{21}$	$2{,}23\cdot10^{13}$	$9{,}68\cdot10^{22}$	$3{,}72\cdot10^{16}$

Поэтому производительность вычислительной системы для выполнения расчета точных приближений с учетом требований к времени решения должна составлять от $1{,}75\cdot10^{19}$ оп/сек до $6{,}15\cdot10^{45}$ оп/сек. Оценим возможность выполнения поставленной задачи с помощью современных вычислительных технологий.

Применение универсальных процессоров для расчета точных приближений распределений. Процессоры x86 с 32-х и 64-разрядной обработкой данных классической фон-неймановской архитектуры являются основной и наиболее массовой универсальной вычислительной архитектурой для построения многопроцессорных высокопроизводительных систем (МВС) кластерного типа [13].

Производительность МВС на процессорах (CPU) P_{CPU} при условии её неограниченной масштабируемости для реализации методов расчета точных приближений определяется как

$$P_{CPU} = N_{CPU} \cdot K_{CPU} \cdot H_{1\_CPU}, \tag{7}$$

где N_{CPU} – количество процессоров;

K_{CPU} – число поддерживаемых параллельных аппаратных потоков;

H_{1_CPU} – частота одного процессора.

Для оценки числа процессоров, необходимых для решения задачи с учетом ограничений по времени, рассмотрим гипотетический процессор CPU, поддерживающий 8 параллельных аппаратных потоков на частоте 3000 МГц, т.е. $K_{CPU}=8$ и $H_{1\_CPU}=3 \cdot 10^9$. Тогда для достижения минимальной по табл. 1 производительности в $P_{CPU} \geq 1{,}75 \cdot 10^{19}$ оп/сек необходимо использовать

$$N_{CPU} \geq \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{K_{CPU} \cdot H_{1\_CPU}} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{8 \cdot 3{,}0 \cdot 10^9} = 7{,}29 \cdot 10^8,$$

т.е. примерно 729 миллионов гипотетических процессоров. Полученное значение на 1,5-2 десятичных порядка превышает число ядер (не процессоров!) самых мощных суперЭВМ мира из списка TOP500 [14], таких как Fugaku [13, 14] с 7 млн. ядер и Sunway TaihuLight [13, 14] с 10 млн. ядер.

Для возможности расчета точных приближений для всех значений рассматриваемых параметров выборок $\{N = \overline{2,256},\ n = \overline{1,5N}\}$ нужно использовать

$$N_{CPU} \geq \frac{6{,}15 \cdot 10^{45}}{K_{\Gamma CPU} \cdot H_{1\_CPU}} = \frac{6{,}15 \cdot 10^{45}}{8 \cdot 3{,}0 \cdot 10^9} = 2{,}56 \cdot 10^{35}$$

узлов, что на современном уровне развития процессорных архитектур и технологий построения кластерных МВС является недостижимым рубежом. Производительность современных CPU, недостаточная для решения поставленной задачи, и глобальные физические ограничения, связанные с ростом их производительности, не позволяют организовать вычисление точных приближений только на их основе, так как для решения задачи даже в минимальной постановке требуются сотни миллионов универсальных процессоров.

Применение технологии графических ускорителей для расчета точных приближений распределений. Развитие технологии графических ускорителей GPU (Graphic Processing Unit) [13], изначально предназначенных для расчета трехмерной графики в реальном масштабе времени, привело к их применению в высокопроизводительных вычислениях. Современные графические ускорители GPU, содержащие тысячи узкоспециализированных ядер, обеспечивают высокую степень параллелизма и могут выполнять задачи в многопоточном параллельном режиме. Например, стандартная игровая видеокарта GEFORCE RTX-3090 содержит 10 496 ядер NVIDIA CUDA, работающих на частоте 1,70 ГГц (1,7 10^9 оп/сек) [15].

Производительность вычислительной системы на основе GPU P_{GPU} может быть грубо определена как произведение числа графических ускорителей GPU в системе N_{GPU}, количества ядер каждого ускорителя GPU K_{CP} и их производительности, оцениваемой с учетом тактовой частоты H_{CP}

$$P_{GPU} = N_{GPU} \cdot K_{CP} \cdot H_{CP}. \tag{8}$$

Для того чтобы обеспечить $P_{GPU} \geq 1{,}75 \cdot 10^{19}$, система на основе GEFORCE RTX-3090 должна состоять не менее чем из

$$N_{RTX\ 3090} \geq \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{K_{RTX} \cdot H_{RTX}} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{1{,}05 \cdot 10^{4} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{9}} = 9{,}80 \cdot 10^{5}$$

узлов, а система на основе NVIDIA Quadro K6000 [16], для которой производительность одной видеокарты оценивается как

$$\text{К}_{\text{К6000}} \cdot \text{Н}_{\text{К6000}} = 16{,}3 \cdot 10^{12} \text{ оп/сек},$$

должна состоять не менее чем из

$$N_{K\ 6000} \geq \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{K_{K\ 6000} \cdot H_{K\ 6000}} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{1{,}63 \cdot 10^{13}} = 1{,}07 \cdot 10^{6}$$

узлов. Несмотря на разницу в свойствах рассмотренных графических ускорителей, их число, требуемое для расчетов точных приближений, оценивается примерно в один миллион штук, что невозможно при современном уровне развития архитектур графических ускорителей и технологий построения вычислительных систем на их основе. Таким образом, недостаточная производительность современных графических ускорителей не позволяет только с их помощью организовать вычисление точных приближений.

Применение параллельно-конвейерных технологий ПЛИС для расчета точных приближений распределений. Технология программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA – Field Programmable Gate Array), сочетающая в себе возможности параллельных и конвейерных вычислений, в отличие от вычислительных систем с жестко заданной архитектурой, построенных на CPU и GPU, позволяет реконфигурировать [17] (подстраивать) архитектуру вычислительной системы на базе ПЛИС под архитектуру решаемой задачи. Учет информационных зависимостей в структуре прикладной задачи [17] позволяет обеспечить высокую реальную производительность вычислений при решении трудоемких задач в различных областях науки и техники [18]. Например, вычислительный блок (ВБ) новейшей системы «Сегин» на ПЛИС семейства UltraScale+ (высота 3U, 96 кристаллов XCVU9P-1FLGC2104E, выполненных по технологии 16 нм) достигает производительности 240 Тфлопс ($2{,}4 \cdot 10^{14}$ оп/сек) [19].

Реконфигурируемые вычислительные системы обладают существенными преимуществами в реальной производительности и энергоэффективности по сравнению с многопроцессорными вычислительными системами кластерной архитектуры, но их широкое применение во многом сдерживается высокой сложностью программирования. Сложность эффективного программирования РВС на основе ПЛИС, признанная многими исследователями [20, 21], привела к созданию новых средств автоматической трансляции [21–27] последовательных программ в конфигурационные файлы ПЛИС. Большинство приведенных в [21] трансляторов (DWARV [22], BAMBU [23], LegUP [24], Xilinx Vivado [25]) преобразуют вычислительно трудоемкий фрагмент задачи на языке С в IP-ядро и синтезируют в ПЛИС специализированный вычислитель на основе автоматной модели или процессорной парадигмы, которые демонстрируют существенный выигрыш в скорости вычислений по сравнению с процессорной реализацией [21]. Для многокристальных РВС [18] создан комплекс [27] трансляции и автоматического масштабирования последовательной программы на языке *C* с автоматической синхронизацией размещенных в каждой ПЛИС фрагментов задачи. Наличие средств автоматической трансляции последовательных программ в конфигурационные файлы ПЛИС позволяет реализовать задачу расчета точных приближений с помощью параллельно-конвейерных технологий ПЛИС с достаточной эффективностью.

При решении задачи расчета точных приближений производительность реконфигурируемой многопроцессорной вычислительной системы на базе ПЛИС $P_{ПЛИС}$ можно грубо оценить как произведение количества вычислительных блоков (ВБ) $N_{ВБ\_ПЛИС}$ в системе и производительности одного ВБ $P_{ВБ\_ПЛИС}$.

$$P_{ПЛИС} = N_{ВБ\_ПЛИС} \cdot P_{ВБ\_ПЛИС}. \tag{9}$$

Оценим число ВБ, необходимых для достижения производительности $P_{ПЛИС} \geq 1{,}75 \cdot 10^{19}$

$$N_{\text{ВБ\_ПЛИС}} \geq \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{P_{\text{ВБ\_ПЛИС}}} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{19}}{2{,}4 \cdot 10^{14}} = 7{,}29 \cdot 10^{4}$$

ВБ, а для расчета точных приближений для всех значений рассматриваемых параметров выборок $\{N = \overline{2,256},\ n = \overline{1,5N}\}$ необходимо использовать

$$N_{\text{ВБ\_ПЛИС}} \geq \frac{6{,}15 \cdot 10^{45}}{P_{\text{ВБ\_ПЛИС}}} = \frac{6{,}15 \cdot 10^{45}}{2{,}4 \cdot 10^{14}} = 2{,}56 \cdot 10^{31}$$

более $2{,}56 \cdot 10^{31}$ вычислительных блоков. Очевидно, что создать вычислительную систему для решения данной задачи на основе только ПЛИС-технологий проблематично из-за необходимости очень большого числа вычислительных блоков.

Сравнение вычислительных технологий и выбор технических средств для расчета точных приближений распределений. Характеристики производительности аппаратных средств технологий, выбранных для проведения расчетов распределений, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Производительность вычислительных технологий

Параметры технологий	**Вычислительные технологии**		
	ПЛИС	**GPU**	**CPU**
Производительность вычислительных элементов (оп/сек) (узлы, блоки, карты, процессоры)	$2{,}4 \cdot 10^{14}$	$1{,}78 \cdot 10^{13}$	$2{,}4 \cdot 10^{10}$
Количество вычислительных элементов для расчета ТПР для выборки № 1 (256/1280) со сложностью $6{,}15 \cdot 10^{45}$ оп.	$2{,}6 \cdot 10^{31}$	$3{,}5 \cdot 10^{32}$	$2{,}6 \cdot 10^{35}$
Количество вычислительных элементов для расчета ТПР для выборки № 3 (192/320) со сложностью $1{,}75 \cdot 10^{19}$ оп.	$7{,}3 \cdot 10^{4}$	$9{,}8 \cdot 10^{5}$	$7{,}3 \cdot 10^{9}$
Количество вычислительных элементов для расчета ТПР для выборки № 4 (128/320) со сложностью $3{,}72 \cdot 10^{16}$ оп.	$1{,}6 \cdot 10^{2}$	$2{,}1 \cdot 10^{3}$	$1{,}6 \cdot 10^{6}$

Анализ возможности использования вычислительных технологий для расчета точных приближений распределений показывает, что в настоящее время ни одна из вычислительных технологий не может предоставить необходимый вычислительный ресурс. Современные процессоры обладают производительностью до 10^{10} операций в секунду, что не позволяет выполнить расчеты в заданное время для всех значений параметров не только на одном процессоре, но и на суперЭВМ из первой пятерки списка TOP500. Графические ускорители, обладающие производительностью до 10^{13} операций в секунду, обеспечиваемой одним вычислительным блоком, также не позволяют на современном уровне технологий построить вычислительную систему, рассчитывающую все значения параметров в заданное время. Параллельно-конвейерные технологии ПЛИС с реальной производительностью до 10^{14} операций в секунду для 1 вычислительного блока обладают наибольшим потенциалом для реализации метода второй кратности для наибольших значений параметров выборок.

Для решения этой вычислительно-трудоемкой задачи в заданное время необходимо проанализировать возможности перспективных вычислительных технологий на основе квантовых и фотонных компьютеров, а для рассмотренных вычислительных технологий на текущем уровне развития техники возможным решением является создание конвергентных (гибридных) или гетерогенных вычислительных систем, способных решить задачу с заданными параметрами в оперативно-приемлемое время.

Благодаря совместному применению рассмотренных вычислительных технологий для реализации метода расчета распределений в рамках единого гибридного вычислителя [19], можно увеличить значения параметров выборок, для которых будут доступны вычисления распределений. Такой гибридный вычислитель может состоять из нескольких вычислительных компонент, каждая из которых поддерживает одну или несколько вычислительных технологий. Благодаря возможности распараллеливания метода расчета распределений по данным, части метода можно выполнять на соответствующих по производительности вычислительных компонентах гибридного вычислителя. Данные компоненты могут состоять из универсальных процессоров, ускорителей на графических видеокартах и вычислительных блоков на базе ПЛИС. Производительность гибридного вычислителя $P_{ГВ}$ для вычисления распределений можно оценить как сумму производительностей его компонент

$$P_{ГВ} = P_{ПЛИС} + P_{GPU} + P_{CPU}. \quad (10)$$

Здесь производительность каждого компонента, согласно (5-7), грубо оценивается как произведение числа соответствующих вычислительных узлов (блоков) на их производительность

$$P_{ГВ} = N_{ВБ\_ПЛИС} \cdot P_{ВБ\_ПЛИС} + N_{GPU} \cdot P_{GPU} + N_{CPU} \cdot P_{1\_CPU}. \quad (11)$$

Теперь, имея значения параметров выборки N и n, для которых необходимо рассчитать распределение, определяем требуемый вычислительный ресурс $C_{МВК}\left(P_{\Delta}\{S_{N,n} \geq c\}\right)$ по формуле (5). Учитывая возможное время расчета $t_{\text{расчета}}$, определяем необходимую производительность гибридного вычислителя

$$P_{\text{ГВ}} = P_{\text{ГВ}}(N, n) = \frac{C_{\text{МВК}}\left(P_{\Delta}\{S_{N,n} \geq c\}\right)}{t_{\text{расчета}}}.$$

С помощью выражения (10) получаем возможный состав его технических средств. Состав технических средств гибридного вычислителя можно определить простым подбором. Количество вычислительных блоков на ПЛИС $N_{ВБ\_ПЛИС}$ определим как

$$N_{ВБ\_ПЛИС} = [\frac{P_{ГВ}}{P_{ВБ\_ПЛИС}}], \tag{12}$$

где $P_{ГВ}$ – производительность гипотетического вычислителя;

$P_{ВБ\_ПЛИС}$ – производительность одного вычислительного блока.

В свою очередь, количество графических плат N_{GPU} определим как

$$N_{GPU} = \left[\frac{\left(P_{ГВ} - \left[\frac{P_{ГВ}}{P_{ВБ\_ПЛИС}}\right] \cdot P_{ВБ\_ПЛИС}\right)}{P_{GPU}}\right], \tag{13}$$

где $\left[\frac{P_{ГВ}}{P_{ВБ\_ПЛИС}}\right] \cdot P_{ВБ\_ПЛИС}$ – производительность выбранного числа вычислительных блоков на ПЛИС;

P_{GPU} – производительность графической платы.

Далее определяем необходимое количество универсальных процессоров N_{CPU} аналогичным образом

$$N_{CPU} = \left[\frac{P_{ГВ} - N_{ВБ\_ПЛИС} \cdot P_{ВБ\_ПЛИС} - N_{GPU} \cdot P_{GPU}}{P_{CPU}}\right] + 1. \tag{14}$$

Если требуемая для выбранных параметров N и n сложность $C_{МВК}(P_{\Delta}\{S_{N,n} \geq c\})$ и соответствующая производительность $P_{ГВ}$ меньше производительности одного ВБ на ПЛИС, то, согласно (12), число вычислительных блоков $N_{ВБ\_ПЛИС}$ равно нулю и их можно не использовать, так как требуемую производительность можно получить за счет других, более дешевых технологий.

Заключение и выводы. В статье проанализирована применимость существующих вычислительных технологий для расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик методом второй кратности с учетом требований реальных задач к времени решения. В качестве точных приближений рассмотрены Δ–точные распределения, отличающиеся от точных распределений не более чем на заранее заданную сколь угодно малую величину Δ. Расчет точных приближений выполнялся методом второй кратности, основанным на решении системы линейных уравнений со следующими свойствами: полиномиальной сложностью и возможностью распараллеливания метода на фрагменты по данным. Рассчитанные с помощью метода второй кратности параметры распределения для наибольших значений параметров выборок для реальных задач характеризуются высокой вычислительной трудоемкостью, требующей выполнения от $4{,}55 \cdot 10^{25}$ до $1{,}60 \cdot 10^{52}$ операций.

Для расчета распределений методом второй кратности проанализированы возможности основных современных вычислительных технологий: кластерных технологий на базе универсальных процессоров фон-неймановской архитектуры, графических ускорителей и параллельно-конвейерных технологий на базе ПЛИС.

Сравнение возможности применения современных вычислительных технологий для решения задачи вычисления точных приближений распределений для выборок с мощностью алфавита не более 256 и объемом до 1280 знаков показало, что ни одна из них не позволяет решить поставленную задачу в заданное время при условии изолированного использования. Поэтому для рассмотренных вычислительных технологий на текущем уровне развития техники возможным решением является создание гибридного специализированного вычислителя, способного решить задачу с заданными параметрами. Также перспективным направлением дальнейших исследований является анализ расчетных и технологических возможностей перспективных вычислительных технологий на основе квантовых и фотонных компьютеров для расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик в заданное время.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мельников А.К.* Сравнение эффективности обработки текстов при применении в статистических критериях точных и предельных приближений базовых распределений вероятностей значений тестовых статистик // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2018. – Т. 25. – Вып. 4. –С. 375-378. – ISSN 0869-8325.
2. *Мельников А.К.* Сложность расчета точных распределений вероятности симметричных аддитивно разделяемых статистик и область применения предельных распределений // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 126-130. – ISSN 1818-0442.
3. *Мельников А.К.* Применение точных и предельных приближений распределений вероятностей значений статистик при решении задачи обработке текстов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 8 (202). – С. 114-135.
4. *Крамер Г.* Математические методы статистики: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
5. *Мельников А.К., Ронжин А.Ф.* Обобщенный статистический метод анализа текстов, основанный на расчете распределений вероятности значений статистик // Информатика и её применения. – 2016. – Т. 10. – Вып. 4. – С. 91-97. – ISSN 1992-2264.
6. *Мельников А.К.* Алгоритмическая сложность расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик методом решения уравнения первой кратности типов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 7 (217). – С. 52-67.
7. *Мельников А.К.* Методика расчета распределений вероятностей значений статистик, близких к их точным распределениям // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2017. – Т. 24. – Вып. 5. – С. 320-323.
8. *Мельников А.К.* Алгоритмическая сложность расчета точных приближений распределений вероятностей значений статистик // Суперкомпьютерные технологии: сборник трудов молодых ученых / под ред. академика РАН Каляева И.А. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 66-70. – ISBN 978-9275-3612-2.
9. *Фишер Р.А.* Статистические методы для исследователей: пер. с англ. – М.: Госстатиздат., 1958. – 73 с.
10. *Стивенс Род*. Алгоритмы. Теория и практика применения. – М.: Эксмо, 2019. – 544 с. – ISBN 978-5-699-81729-0.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664398. Расчет распределений вероятностей значений статистик максимально приближенных к их точному распределению. Правообладатель и автор Мельников А.К. Заявка № 2018662120. Дата поступления 01 ноября 2018 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 ноября 2018 г.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664143. Расчет числа решений системы линейных уравнений второй кратности типов. Правообладатель Колодзей А.В. Автор: Колодзей А.В. и Мельников А.К. Заявка № 2020662473. Дата поступления 19 октября 2020 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 9 ноября 2020 г.
13. Список TOP500. https://www.top500.org (дата обращения: 18.11.2021).
14. *Антонов А.С., Афанасьев И.В., Воеводин Вл.В.* Высокопроизводительные вычислительные платформы: текущий статус и тенденции развития // Вычислительные методы и программирование. – 2021. – Т.. 22. – С. 135-177. – DOI: 10.26089/NumMet.v22r210.
15. Видеокарта GeForce RTX 3090 NVIDIA. https://3dnews.ru/1021405/obzor-videokarti-nvidia-geforce-rtx-3090 (дата обращения: 18.11.2021).
16. Графическая карта NVIDIA Quadro RTX 6000. https://3dnews.ru/1027931/nvidia-obyavila-o-dostupnosti-sverhmoshchnoy-videokartirtx-a6000-s-48-gbayt-gddr6-i-tsenoy-5500 (дата обращения: 18.11.2021).
17. *Левин И.И., Федоров А.М., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К Гузик В.Ф., Каляев И.А.* Реконфигурируемые вычислительные системы / под общей ред. И.А. Каляева. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 472 с. – ISBN 978-5-9275-1918-7.
18. *Levin Ilya I. et al.* Reconfigurable computer systems: from the first FPGAs towards liquid cooling systems // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2016. – Vol. 3 (1). – P. 22-40. – DOI: 10.14529/jsfi160102.

19. *Левин И.И., Федоров А.М., Доронченко Ю.И., Раскладкин М.К.* Перспективные высокопроизводительные реконфигурируемые вычислители с иммерсионным охлаждением // Суперкомпьютерные технологии: Сб. трудов молодых ученых. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2020. – С. 29-34. – ISBN 978-5-9275-3612-2.
20. *Trimberger S.M.* Three Ages of FPGAs: A Retrospective on the First Thirty Years of FPGA Technology // in Proceedings of the IEEE. – March 2015. – Vol. 103, No. 3. – P. 318-331. – DOI: 10.1109/JPROC.2015.2392104.
21. *Nane R. et al.* A Survey and Evaluation of FPGA High-Level Synthesis Tools // in IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – Oct. 2016. – Vol. 35, No. 10. – P. 1591-1604.
22. *Nane R., Sima V.-M., Olivier B., Meeuws R., Yankova Y., Bertels K.* DWARV 2.0: A CoSy-based C-to-VHDL Hardware Compiler // In FPL. – 2012. – P. 619-622.
23. *Pilato C. and Ferrandi F.* Bambu: A Modular Framework for the High Level Synthesis of Memory-intensive Applications // In FPL. – 2013. – P. 1-4.
24. *Canis A., Choi J., Aldham M., Zhang V., Kammoona A., Anderson J.H., Brown S., Czajkowski T.* LegUp: High-Level Synthesis for FPGA-based Processor // Accelerator Systems. In ACM FPGA. – 2011. – P. 33-36.
25. Make Slow Software Run Fast with Vivado HLS. – https://www.xilinx.com/publications/xcellonline/run-fast-with-Vivado-HLS.pdf, last accessed 2021/03/10 (дата обращения: 18.11.2021).
26. Vitis Unified Software Platform Documentation. Application Acceleration Development. – https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2019_2/ug1393-vitis-application-acceleration.pdf, last accessed 2021/03/10 (дата обращения: 18.11.2021).
27. *Ilya Levin, Alexey Dordopulo, Vyacheslav Gudkov, Andrey Gulenok, Alexander Bovkun, Georgyi Yevstafiyev, Kirill Alekseev*. Software development tools for fpga-based reconfigurable systems programming // In: communications in computer and information science. – 2019. – Vol. 1129, Chapter parallel computing technologies. – P. 1-16.

REFERENCES

1. *Mel'nikov A.K.* Sravnenie effektivnosti obrabotki tekstov pri primenenii v statisticheskikh kriteriyakh tochnykh i predel'nykh priblizheniy bazovykh raspredeleniy veroyatnostey znacheniy testovykh statistik [Comparison of the effectiveness of text processing when using exact and marginal approximations of basic probability distributions of test statistics values in statistical criteria], *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2018, Vol. 25, Issue 4, pp. 375-378. ISSN 0869-8325.
2. *Mel'nikov A.K.* Slozhnost' rascheta tochnykh raspredeleniy veroyatnosti simmetrichnykh additivno razdelyaemykh statistik i oblast' primeneniya predel'nykh raspredeleniy [The complexity of calculating the exact probability distributions of symmetric additively separable statistics and the scope of marginal distributions], *Doklady TUSUR* [Reports of TUSUR], 2017, Vol. 20, No. 4, pp. 126-130. ISSN 1818-0442.
3. *Mel'nikov A.K.* Primenenie tochnykh i predel'nykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik pri reshenii zadachi obrabotke tekstov [Application of exact and marginal approximations of probability distributions of statistical values in solving the problem of text processing], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 8 (202), pp. 114-135.
4. *Kramer G.* Matematicheskie metody statistiki [Mathematical methods of statistics: trans. from English]. Moscow: Mir, 1975, 648 p.
5. *Mel'nikov A.K., Ronzhin A.F.* Obobshchennyy statisticheskiy metod analiza tekstov, osnovannyy na raschete raspredeleniy veroyatnosti znacheniy statistik [Generalized statistical method of text analysis based on the calculation of probability distributions of statistical values], *Informatika i ee primeneniya* [Computer science and its applications], 2016, Vol. 10, Issue 4, pp. 91-97. ISSN 1992-2264.
6. *Mel'nikov A.K.* Algoritmicheskaya slozhnost' rascheta tochnykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik metodom resheniya uravneniya pervoy kratnosti tipov [Algorithmic complexity of calculating exact approximations of probability distributions of statistical values by solving the equation of the first multiplicity of types], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 7 (217), pp. 52-67.

7. *Mel'nikov A.K.* Metodika rascheta raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik, blizkikh k ikh tochnym raspredeleniyam [Methodology for calculating probability distributions of statistical values close to their exact distributions], *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review of Applied and Industrial Mathematics], 2017, Vol. 24, Issue 5, pp. 320-323.
8. *Mel'nikov A.K.* Algoritmicheskaya slozhnost' rascheta tochnykh priblizheniy raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik [Algorithmic complexity of calculating exact approximations of probability distributions of statistical values], *Superkomp'yuternye tekhnologii: sbornik trudov molodykh uchenykh* [Supercomputer technologies: a collection of works of young scientists], ed. by Academician of the Russian Academy of Sciences Kalyaeva I.A. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 66-70. ISBN 978-9275-3612-2.
9. *Fisher R.A.* Statisticheskie metody dlya issledovateley [Statistical methods for researchers: trans. from engl.]. Moscow: Gosstatizdat., 1958, 73 p.
10. *Stivens Rod.* Algoritmy. Teoriya i praktika primeneniya [Algorithms. Theory and practice of application]. Moscow: Eksmo, 2019, 544 p. ISBN 978-5-699-81729-0.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018664398. Raschet raspredeleniy veroyatnostey znacheniy statistik maksimal'no priblizhennykh k ikh tochnomu raspredeleniyu. Pravoobladatel' i avtor Mel'nikov A.K. Zayavka № 2018662120. Data postupleniya 01 noyabrya 2018 g. Data gosudarstvennoy registratsii v Reestre programm dlya EVM 16 noyabrya 2018 g. [Certificate of state registration of the computer program No. 2018664398. Calculation of probability distributions of statistical values as close as possible to their exact distribution. Copyright holder and author Melnikov A.K. Application No. 2018662120. Date of receipt 01 November 2018 Date of state registration in the Register of computer programs November 16, 2018].
12. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020664143. Raschet chisla resheniy sistemy lineynykh uravneniy vtoroy kratnosti tipov. Pravoobladatel' Kolodzey A.V. Avtor: Kolodzey A.V. i Mel'nikov A.K. Zayavka № 2020662473. Data postupleniya 19 oktyabrya 2020 g. Data gosudarstvennoy registratsii v Reestre pro-gramm dlya EVM 9 noyabrya 2020 g. [Certificate of state registration of the computer program No. 2020664143. Calculation of the number of solutions of a system of linear equations of the second multiplicity of types. Copyright holder Kolodzey A.V. Author: Kolodzey A.V. and Melnikov A.K. Application No. 2020662473. Date of receipt October 19, 2020 The date of state registration in the Register of computer programs is November 9, 2020].
13. Spisok TOP500 [TOP500 list]. Available at: https://www.top500.org (accessed 18 November 2021).
14. *Antonov A.S., Afanas'ev I.V., Voevodin Vl.V.* Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye platformy: tekushchiy status i tendentsii razvitiya [High-performance computing platforms: current status and development trends], *Vychislitel'nye metody i programmirovanie* [Computational methods and programming], 2021, Vol. 22, pp. 135-177. DOI: 10.26089/NumMet.v22r210.
15. Videokarta GeForce RTX 3090 NVIDIA [NVIDIA GeForce RTX 3090 graphics card]. Available at: https://3dnews.ru/1021405/obzor-videokarti-nvidia-geforce-rtx-3090 (accessed 18 November 2021).
16. Graficheskaya karta NVIDIA Quadro RTX 6000 [NVIDIA Quadro RTX 6000 Graphics Card]. Available at: https://3dnews.ru/1027931/nvidia-obyavila-o-dostupnosti-sverhmoshchnoy-videokartirtx-a6000-s-48-gbayt-gddr6-i-tsenoy-5500 (accessed 18 November 2021).
17. *Levin I.I., Fedorov A.M., Doronchenko Yu.I., Raskladkin M.K Guzik V.F., Kalyaev I.A.* Rekonfiguriruemye vychislitel'nye sistemy [Reconfigurable computing systems], under the general ed. of I.A. Kalyaeva. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 472 p. ISBN 978-5-9275-1918-7.
18. *Levin Ilya I. et al.* Reconfigurable computer systems: from the first FPGAs towards liquid cooling systems, *Supercomputing Frontiers and Innovations,* 2016, Vol. 3 (1), pp. 22-40. DOI: 10.14529/jsfi160102.
19. *Levin I.I., Fedorov A.M., Doronchenko Yu.I., Raskladkin M.K.* Perspektivnye vysokoproizvoditel'nye rekonfiguriruemye vychisliteli s immersionnym okhlazhdeniem [Promising high-performance reconfigurable computers with immersion cooling], *Superkomp'yuternye tekhnologii: Sb. trudov molodykh uchenykh* [Supercomputer technologies: Collection of works of young scientists]. Rostov-on-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2020, pp. 29-34. ISBN 978-5-9275-3612-2.
20. *Trimberger S.M.* Three Ages of FPGAs: A Retrospective on the First Thirty Years of FPGA Technology, in *Proceedings of the IEEE,* March 2015, Vol. 103, No. 3, pp. 318-331. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2392104.

21. *Nane R. et al*. A Survey and Evaluation of FPGA High-Level Synthesis Tools, *in IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,* Oct. 2016, Vol. 35, No. 10, pp. 1591-1604.
22. *Nane R., Sima V.-M., Olivier B., Meeuws R., Yankova Y., Bertels K.* DWARV 2.0: A CoSy-based C-to-VHDL Hardware Compiler, *In FPL*, 2012, pp. 619-622.
23. *Pilato C. and Ferrandi F.* Bambu: A Modular Framework for the High Level Synthesis of Memory-intensive Applications, *In FPL*, 2013, pp. 1-4.
24. *Canis A., Choi J., Aldham M., Zhang V., Kammoona A., Anderson J.H., Brown S., Czajkowski T.* LegUp: High-Level Synthesis for FPGA-based Processor, *Accelerator Systems. In ACM FPGA*, 2011, pp. 33-36.
25. Make Slow Software Run Fast with Vivado HLS. Available at: https://www.xilinx.com/ publications/xcellonline/run-fast-with-Vivado-HLS.pdf, last accessed 2021/03/10 (accessed 18 November 2021).
26. Vitis Unified Software Platform Documentation. Application Acceleration Development. Available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2019_2/ug1393-vitis-application-acceleration.pdf, last accessed 2021/03/10 (accessed 18 November 2021).
27. *Ilya Levin, Alexey Dordopulo, Vyacheslav Gudkov, Andrey Gulenok, Alexander Bovkun, Georgyi Yevstafiyev, Kirill Alekseev*. Software development tools for fpga-based reconfigurable systems programming, *In: communications in computer and information science*, 2019, Vol. 1129, Chapter parallel computing technologies, pp. 1-16.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Мельников Андрей Кимович – АО «Вычислительные решения»; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; Москва, Россия; г.н.с.; к.т.н.; доцент ВАК.

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; зав. кафедрой ИМС; д.т.н.; профессор.

Дордопуло Алексей Игоревич – НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров; e-mail: dordopulo@superevm.ru; г. Таганрог, Россия; начальник отдела; к.т.н.

Писаренко Иван Вадимович – e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; научный сотрудник.

Melnikov Andrey Kimovich – JSC "Computing Solutions"; e-mail: anta-mak@umail.ru; ak@comp-sol.ru; Moscow, Russia; chief researcher, cand. of eng. sc.; associate professor of the Higher Attestation Commission.

Levin Il'ya Izrailevich – Southern Federal University; iilevin@sfedu.ru; Taganrog, Russia; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Dordopulo Alexey Igorevich – Supercomputers and Neurocomputers Research Cente; e-mail: dordopulo@superevm.ru; Taganrog, Russia; head of department; cand. of eng. sc.

Pisarenko Ivan Vadimovich – ivan123tgn@yandex.ru; research associate.

УДК 537.874 DOI 10.18522/2311-3103-2021-7-19-31

К.А. Бойков

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Преимуществом перспективного метода пассивной радиосенсорной технической диагностики (ПРТД) над существующими на сегодняшний день способами определения технического состояния (виброметрия, тепловой контроль, JTAG-тестирование, оптический контроль) являются: отсутствие инерции, отсутствие затрат процессорного времени, отсутствие гальванического контакта с объектом исследования. В современной научной