

**ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-  
КАРЛО НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ САПР «СИМИКА»**

**Александров Антон Владимирович**

Инженер II категории, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Бенеш Павел Борисович**

Главный специалист, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Малышев Александр Анатольевич**

Начальник научно-исследовательского отдела, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Отставнова Валерия Алексеевна**

Инженер II категории, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», 127055, г. Москва, ул. Суцеская 22

**Аннотация.** Использование метода Монте-Карло при схемотехническом моделировании электрических схем требует использования мощных вычислительных систем. На основе отечественной САПР была создана система математического моделирования, которая позволяет эффективно распараллеливать процесс вычислений по методу Монте-Карло. В настоящей работе выполнены анализ результатов моделирования и оценка возможности проведения математического моделирования электрической принципиальной схемы на вычислительной сети, состоящей из 6 рабочих станций с общим числом процессорных ядер 168.

**Ключевые слова:** моделирование, Монте-Карло, SPICE-параметры.

**Цитирование:** Александров А.В., Бенеш П.Б., Малышев А.А., Отставнова В.А. Опыт проведения математического моделирования специализированных электрических схем по методу Монте-Карло на основе отечественной САПР «СИМИКА» // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 3 (11). С. 90–95. DOI:10.25729/2413-0133-2018-3-10

**Введение.** Для выполнения схемотехнического проектирования в настоящее время используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Одними из ключевых инструментов в таких САПР являются программные модули математического моделирования. Использование моделирования работы схем позволяет существенно ускорить процесс разработки электронных изделий, находить и исправлять ошибки при проектировании электрических схем до их физического изготовления, и таким образом, повысить качество проектирования.

Единственной отечественной САПР, отвечающей современному уровню развития математического, алгоритмического и программного обеспечения, является САПР «Симика» [3, 4] (Москва, Зеленоград), в состав которой входит программный модуль для проведения схемотехнического моделирования.

В данной работе приведены результаты анализа процессов распараллеливания при математическом моделировании электрической схемы по методу Монте-Карло в САПР «Симика».

**Схемотехническое моделирование при анализе электрической схемы по методу Монте-Карло.** Схемотехническое моделирование по методу Монте-Карло часто используется, когда необходимо проанализировать поведение электрической схемы при разбросе тех или иных параметров.

Например, как показывает практика, для каждого элемента типа «транзистор» от 2 до 6 SPICE параметров могут иметь разброс номинальных значений после воздействия ионизирующих излучений.

Так, в МОП-транзисторе необходимо учитывать [1, 7]:

- сдвиг порогового напряжения МОП-транзистора за счет эффекта накопления дырок в окисле при воздействии стационарного ионизирующего излучения;
- деградацию подвижности носителей за счет роста количества поверхностных состояний на границе кремний – окисел.

Из [5] известно, что изменения параметров транзистора зависят от режима его работы. Поскольку в различные моменты времени при воздействии ионизирующих излучений каждый отдельный транзистор может иметь различные значения напряжений или токов на электродах, то и изменения SPICE параметров будут носить индивидуальный характер для каждого элемента. Наиболее полно учесть этот разброс можно, используя при схемотехническом моделировании метод Монте-Карло [8].

Использование обычных одноядерных процессоров для анализа схемы по методу Монте-Карло приводит к многократным последовательным запускам программы, когда одно и то же задание с различными вариантами наборов SPICE параметров запускается для расчета. Так, для моделирования электрических схем, содержащих примерно 100 элементов типа «транзистор», может потребоваться примерно 100 таких запусков. В случае, если время выполнения одного задания составляет 15 минут, то полное время выполнения всех заданий составит 1500 минут – это больше суток. В результате проведение такого математического моделирования становится нецелесообразным, следовательно, актуальность использования параллельных вычислений для сокращения полного времени моделирования не вызывает сомнений.

Отечественная САПР «Симика» [3, 4] позволяет распараллеливать процессы расчета электрических схем при проведении моделирования по методу Монте-Карло и многопараметрического анализа в вычислительной сети.

В процессе анализа авторами было выполнено моделирование электрической схемы импульсного вторичного источника питания, которая содержит 365 элементов и включает в себя: 231 транзистор, 1 трансформатор, 16 диодов, 89 резисторов, 28 конденсаторов.

Расчет по методу Монте-Карло проводился в вычислительной сети, состоящий из 6 компьютеров (HP Z840 Xeon E5-2680v4 2.4 GHz 35 Mb cache 14 cores), объединенных в сеть высокоскоростными интерфейсами (Intel X540-T2 10Gb/s, N4032 DELL). Общее количество ядер вычислительной сети составляет 168.

Процесс распараллеливания вычислений по методу Монте-Карло [8] в такой вычислительной сети показан (условно) на рис. 1.



**Рис. 1.** Распараллеливание вычислений при схемотехническом моделировании по методу Монте-Карло.

Серыми стрелками показаны этапы подготовки файлов заданий, сбор и обработка результатов моделирования. Черные линии – это процессы моделирования, выполняемые параллельно. Полное время моделирования может быть определено из выражения

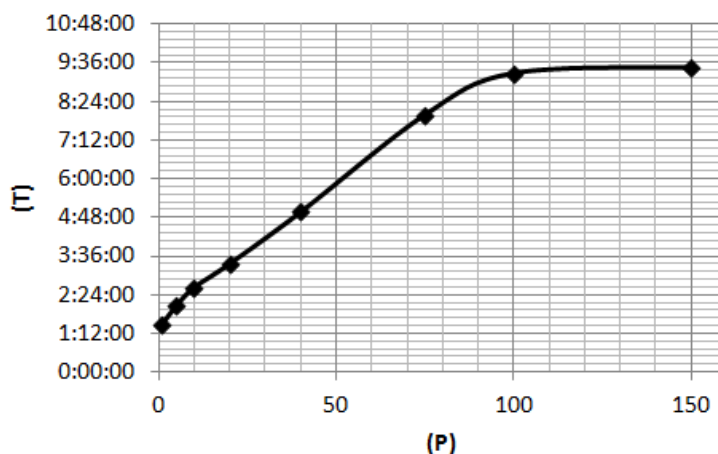
$$t = \max t_1, t_2, t_3 \dots, t_n + t_s \tag{1}$$

где  $t_s$  – это время, которое затрачивает система на подготовку и завершение параллельных вычислений (серые стрелки),

$t_1, t_2, t_3 \dots, t_n$  – продолжительность вычислений, выполняемых параллельно. Значения времен  $t_1, t_2, t_3 \dots, t_n$ , как правило, отличаются, поскольку при изменении значений SPICE параметров количество численных итераций на каждом шаге интегрирования меняется в связи с изменением количества рассчитанных точек, а, следовательно, и общее затрачиваемое время на выполнение одного расчета может быть различным.

Результаты моделирования электрической схемы импульсного вторичного источника питания с различным количеством SPICE параметров от 1 до 150 показаны на рис. 2.

Количество одновременно запущенных процессов (P)	Время моделирования (T)
1	1:29:23
5	2:04:02
10	2:37:12
20	3:21:41
40	4:58:03
75	7:59:05
100	9:16:04
150	9:27:04



**Рис. 2.** Результаты распараллеливания схемотехнического моделирования по методу Монте-Карло при количестве ядер процессора 168

Анализ расчета проводился следующим образом [2]: последовательно увеличивалось количество заданий на моделирование (значения по оси X) и измерялось полное время моделирования.

По результатам анализа установлено, что при увеличении количества одновременно рассчитываемых задач время расчета растет нелинейно.

При этом наблюдаемое на графике увеличение полного времени моделирования, в зависимости от количества параллельно запускаемых задач, обусловлено законом Амдала [7]. Согласно этому закону, ускорение программы с помощью параллельных вычислений на нескольких процессорах ограничено размером не распараллеливаемой части программы:

$$A = \frac{1}{S + \frac{1-S}{n}}, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент для не распараллеливаемой части,

$n$  – количество ядер процессора,

$A$  – коэффициент ускорения параллельного алгоритма, который вычисляется по формуле:

$$A = \frac{T_1 * n}{T_n}, \quad (3)$$

где  $T_n$  – время моделирования задач на  $n$  вычислительных ядрах,

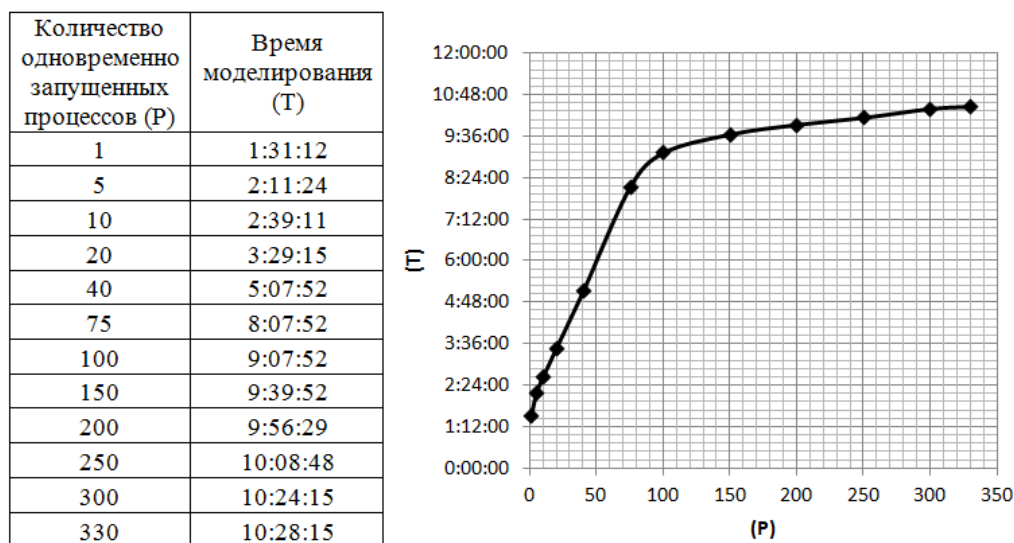
$T_1$  – время моделирования одной задачи.

В соответствии с формулой 3, в нашем случае ускорение вычислений составляет  $A=23,55$ .

В соответствии с формулой 2, время, которое затрачивается на подготовку данных для запуска на моделирование и последующую обработку полученных результатов ( $S$ ), составляет менее 3,5% от общего времени выполнения задания.

Остается открытым вопрос наличия точки перегиба на графике при количестве заданий 100. Для интерпретации этой особенности требуется проведение дополнительных исследований, результаты которых будут рассмотрены в последующих статьях.

Для дальнейших исследований отдельный интерес вызывает использование режима “hyper-threading”, или многопоточности. В этом режиме на каждом вычислительном ядре возможно запустить одновременно 2 задачи, что обеспечивает возможность увеличения общего количества задач при сокращении времени их выполнения. Результаты моделирования импульсного вторичного источника питания с использованием функции многопоточности представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Результаты распараллеливания схемотехнического моделирования по методу Монте-Карло с использованием функции многопоточности при количестве ядер процессора 336

**Заключение.** Использование многопроцессорных и многоядерных вычислительных систем для задач моделирования электрических принципиальных схем эффективно только при использовании специализированной САПР, которая обеспечивает распараллеливание процесса вычислений.

Алгоритмы, используемые в программе схемотехнического моделирования SymSpice входящие в САПР «Симика», позволяют существенно повысить производительность моделирования схемы по методу Монте-Карло.

Таким образом, использование распараллеливания вычислений в представленной вычислительной компьютерной сети более чем в 20 раз сокращает время моделирования, что позволяет перейти на новый качественный уровень при проектировании электрических схем. Сокращение времени моделирования позволяет разработчику оперативно менять параметры схемы, анализировать результаты этих изменений за приемлемое время, проводить детальную отработку электрической схемы.

Для дальнейшего совершенствования математического, алгоритмического и программного обеспечения для схемотехнического моделирования с целью повышения эффективности использования многопроцессорных и суперкомпьютерных технологий требуются проведение дополнительных комплексных исследований при количестве заданий более 100, а также исследования работы САПР в режиме многопоточности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты КМОП ИС. М. Радио и Связь. 1994. 164 с.
2. Романов В.Н. Теория измерений. Методы обработки результатов измерений. СПб. СЗТУ. 2006. 127 с.
3. САПР Симика: SymProbe User guide product version 2.xx
4. САПР Симика: SymSpice User guide product version 2.xx
5. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М. Радио и связь. 2004. 320 с.
6. Popov G., Mastorakis N., Mladenov V. Calculation of the Acceleration of Parallel Programs as a Function of the Number of Threads // Proceedings of the 14th WSEAS international conference on Computers (Corfu, Greece, 23-25 July 2010). Vol. II. Pp. 411-414
7. Roychowdhury J.S., Melville R.C. Homotopy Techniques for Obtaining a DC Solution of Large-Scale MOS Circuits // Proceedings of the Design Automation Conference (DAC). Las Vegas, Nevada. 1996. Pp. 286–291. doi:10.1109/DAC.1996.77
8. Virtuoso Spectre Circuit Simulator Reference. Product Version 15.1. October 2015. Cadence Design Systems, Inc. 2015.

**THE EXPERIENCE IN MATHEMATICAL SIMULATING THE SPECIALIZED  
ELECTRICAL CIRCUITS BY MONTE-CARLO ANALYSIS  
IN THE RUSSIAN CAD «SYMICA»**

**Anton V. Aleksandrov**

Engineer, category II, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Pavel B. Benesh**

Head specialist, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Aleksander A. Malyshev**

Head of a department, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Valeriya A. Otstavnova**

Engineer, category II, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

VSUE VNIIA6 127055, Moscow, Sucheyskaya st. 22

**Abstract.** The simulation of electrical circuits by Monte-Carlo analysis requires the powerful computing systems. Based on the Russian CAD, there was created the simulating system, which allows effectively parallelizing the simulation process by the Monte-Carlo analysis. In present work we show the results of analysis and we take appraisal of capabilities the simulating electrical circuits on the computing system that is consist six workstations with number processors core - 168.

**Keywords:** simulating, Monte-Carlo analysis, SPICE parameters.

**References**

1. Nikiforov A.U., Telets V.A., Chumakov A.I. Radiatsionnyye efekty KMOP IS [Radiative effects in CMOS IS]. Moscow. Radio i Svyaz' = Radio and connections. 1994. 164 p. (in Russian)
2. Romanov V.N. Teoriya izmereniy. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy [The theory of measurements. Methods for processing measurement results]. St. Petersburg. SZTU. 2006. 127 p. (in Russian)
3. SAPR Simika: SymProbe User guide product version 2.xx [CAD Simika: SymProbe User guide product version 2.xx] (in Russian)
4. SAPR Simika: SymSpice User guide product version 2.xx [CAD Simika: SymSpice User guide product version 2.xx ] (in Russian)
5. Chumakov A.I. Deystviye kosmicheskoy radiatsii na integral'nyye skhemy [Space radiation effect on integrated circuits]. Moscow. Radio i Svyaz' = Radio and connections. 2004. 320 p. (in Russian)
6. Popov G., Mastorakis N., Mladenov V. Calculation of the Acceleration of Parallel Programs as a Function of the Number of Threads // Proceedings of the 14th WSEAS international conference on Computers (Corfu, Greece, 23-25 July 2010). Vol. II. Pp. 411-414
7. Roychowdhury J.S., Melville R.C. Homotopy Techniques for Obtaining a DC Solution of Large-Scale MOS Circuits // Proceedings of the Design Automation Conference (DAC). Las Vegas. Nevada.1996. Pp. 286–291. doi:10.1109/DAC.1996.77
8. Virtuoso Spectre Circuit Simulator Reference. Product Version 15.1. October 2015. Cadence Design Systems, Inc. 2015.