

Характеризация аналоговых схем на основе облачных технологий

А.А. Лялинский

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, г. Москва

iprm@iprm.ru

Аннотация — Рассматривается характеристика аналоговых схем в реализованной на основе облачных вычислений системе проектирования АРС. Дано описание набора имеющихся в системе процедур, позволяющих существенно сократить время проектирования аналоговой схемы за счет уменьшения времени на подготовку ее моделирования, а также повысить надежность выпускаемого проекта за счет проведения расчетов во всей предполагаемой области его работоспособности.

Ключевые слова — облачные технологии, система схемотехнического проектирования, информационно-поисковая система, характеристика аналоговых схем, оптимизация схем, веб-доступ, веб-сайт.

I. ВВЕДЕНИЕ

Под характеристикой схем понимается процесс автоматического расчета их характеристик в достаточно детализированном пространстве воздействующих на схему параметров, к которым относятся: температура окружающей среды, напряжение питания, величина нагрузки на выходе схемы и параметры входного сигнала. Полученные в результате этого процесса данные позволяют построить макромодель характеризуемой схемы, используя которую можно в дальнейшем проводить расчеты на одном из уровней моделирования, более быстром, чем классическое схемотехническое моделирование на уровне дискретных компонентов.

Характеризация обычно представляет собой расчет сотен и тысяч вариантов воздействий на схему и требует достаточно больших затрат времени и компьютерных ресурсов. Тем не менее она получила достаточно большое распространение, в особенности при создании библиотек макромоделей цифровых ячеек [1]. Причина тому – стандартный характер логических сигналов и, как следствие – унифицированные блоки обработки входной и выходной информации ячейки. Это позволяет строить достаточно точные и быстродействующие макромодели цифровых ячеек [2, 3, 9-11], имеющие однотипную структуру модели – стандартные блоки входа-выхода и между ними блок формирования логики работы схемы.

В отличие от цифровых схем характеристика аналоговых схем менее распространена по причине

отсутствия для них общепринятой типизации входных и выходных сигналов, что порождено большим разнообразием вариантов построения входных и выходных блоков аналоговых схем. В работе [4] частично затронута эта тема, описания каких-либо систем для характеристики аналоговых схем найти не удалось.

Представляется возможным расширить понятие «характеризация схемы», понимая под ним расчет не только вариантов воздействия окружающей среды, но и исследование поведения схемы при различных вариациях параметров составляющих её компонентов (понятно, что интерес представляют только вариации тех компонентов, которые существенным образом влияют на важнейшие характеристики схемы). Такое расширение позволит нам оценить сохранение работоспособности схемы при всех отклонениях от номинальных условий, неважно, вызваны они изменением окружающей среды или уходом параметров компонентов от первоначальных значений (например, вследствие старения или нагрева).

Предлагаемая к рассмотрению система позволяет провести характеристику именно в расширенном варианте, оценивая как внешние воздействия, так и вариации составляющих ее компонентов. Далее в части II дана общая оценка системы, в части III рассмотрен состав вычисляемых показателей схемы, в части IV – описание имеющихся в системе процедур характеристики, в части V – система визуализации полученных результатов, в части VI – особенности построения системы.

II. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ АНАЛОГОВЫХ СХЕМ

Из четырех упомянутых выше параметров, по которым ведется характеристика цифровых схем (температура окружающей среды, напряжение питания, величина нагрузки, параметры входного сигнала), в АРС оставлены только два – температура и напряжение питания. «Величина нагрузки» и «параметры входного сигнала» не рассматриваются из-за невозможности их типизации в разумных пределах для аналоговых устройств.

В качестве стартового типажа выбран операционный усилитель как наиболее «обкатанное» и,

вероятно, чаще всего используемое в разработке аналоговой аппаратуры устройство.

Как уже упоминалось выше в системе реализованы два варианта характеристики – «классическая», под которой понимается построение гиперповерхности для каждого указанного пользователем показателя схемы на пространстве воздействующих на схему параметров – температуры и напряжения питания, и *расширенная*, под которой понимается нахождение зависимостей показателей схемы от параметров составляющих ее элементов. Далее в статье мы будем использовать следующие названия: для классической -

«Характеризация по внешним воздействиям» и для расширенной - «Характеризация по компонентам схемы». Рассмотрим вкратце их входные интерфейсы в APC.

A. Характеризация по внешним воздействиям

Пользователь для температуры и напряжения питания указывает пределы изменения и количество точек (рис. 1). Из рисунка видно, что вместо двухмерной можно заказать характеристику по одному параметру поставив галочку в соответствующем поле. Для температуры есть специальное поле указания необходимости анализа при комнатной температуре.

Рис.1. Задание параметров при характеристике по внешним воздействиям

B. Характеризация по компонентам схемы

В данном виде характеристике в качестве варьируемых допускается указание следующих компонент схемы (рис. 2):

- ширина и длина MOS-транзистора,
- номинал RCL-элемента,
- номинал независимого источника тока или напряжения (не являющегося основным источником питания),

- коэффициент передачи линейно-управляемых источников тока и напряжения,
- глобальные параметры, описанные в операторе нетлиста «.PARAM».

Такой набор типов варьируемых параметров позволяет исследовать зависимости практически от любых элементов схемы.

Транзисторы					
список	элементы	ширина, мкм	кол-во точек	шаг между точками	связность списка
новый		от: 10 до: 20	2/3	<input checked="" type="radio"/> линейно <input type="radio"/> логарифмически	<input type="checkbox"/> изменять все элементы одновременно
неизменяемые	M4 M1 M5 M2 M3 M0				
Пассивные двухполюсники					
список	элементы	номинал	кол-во точек	шаг между точками	связность списка
новый		от: до:	2/3	<input checked="" type="radio"/> линейно <input type="radio"/> логарифмически	<input type="checkbox"/> изменять все элементы одновременно
неизменяемые	c0 r0				
Независимые источники					
список	элементы	номинал	кол-во точек	шаг между точками	связность списка
новый		от: до:	2/3	<input checked="" type="radio"/> линейно <input type="radio"/> логарифмически	<input type="checkbox"/> изменять все элементы одновременно
неизменяемые	I1 I0 I2 I7 V4 V2 V6 V3 V5 V0 V1				
Управляемые источники					
список	элементы	номинал	кол-во точек	шаг между точками	связность списка
новый		от: до:	2/3	<input checked="" type="radio"/> линейно <input type="radio"/> логарифмически	<input type="checkbox"/> изменять все элементы одновременно
неизменяемые	F0 F1 E0				
Глобальные параметры					
список	элементы	номинал	кол-во точек	шаг между точками	связность списка
новый		от: до:	2/3	<input checked="" type="radio"/> линейно <input type="radio"/> логарифмически	<input type="checkbox"/> изменять все элементы одновременно
неизменяемые	ivar iv				

Рис.2. Задание параметров при характеристике по компонентам схемы

III. ВЫЧИСЛЯЕМЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Если набор варьируемых параметров практически не зависит от типа схемы, то набор вычисляемых показателей, наоборот, сильно к этому привязан. Важнейшей чертой, определяющей может ли данный показатель быть включенным в список показателей – это возможность его автоматического вычисления по результатам моделирования. Для операционного усилителя (ОУ) выбраны следующие показатели, вычисляемые по результатам выполнения частотного анализа и анализа переходных процессов (см. также рис. 3):

- малосигнальные характеристики:
 - коэффициент усиления,
 - частота среза,
 - частота единичного усиления,
 - запас устойчивости по фазе,
 - коэффициент ослабления помех по питанию,
 - коэффициент ослабления синфазного сигнала.
- Параметры большого (изменяемого во времени) сигнала:
 - скорость нарастания выходного напряжения.
- Параметры статического режима:
 - ток потребления.

Вычисляемые показатели схемы

Выберите показатели схемы (см. разделы «Малосигнальные характеристики» и «Параметры большого сигнала»), которые будут вычисляться в процессе характеризации схемы:

Малосигнальные характеристики	Параметры большого сигнала
<input checked="" type="checkbox"/> коэффициент усиления ("gain") <input checked="" type="checkbox"/> частота среза ("gbw") <input checked="" type="checkbox"/> частота единичного усиления ("ft") <input checked="" type="checkbox"/> запас устойчивости по фазе ("phm") <input type="checkbox"/> коэффициент ослабления помех по питанию ("psrr") <input type="checkbox"/> коэффициент ослабления синфазного сигнала ("cmrr")	<input type="checkbox"/> скорость нарастания выходного напряжения ("slewrate") <input type="checkbox"/> ток потребления в статическом режиме ("isup")
Выберите АС директиву с подходящими параметрами: .ac dec 10 1.0 1.0e9 .ac dec 10 1.0 1.0e10 np=10 start=1.0 Hz end=1.0e9 Hz	
Выберите параметры АС-измерительной схемы: R1=1.e9 C1=1 Cload=1 R1=1000000000 C1=1 Cload=2	

Рис.3. Задание списка вычисляемых показателей

Пользователю предоставляется список всех доступных для использования в данной схеме элементов, из которого он выбирает нужные ему.

Все показатели вычисляются автоматически, пользователь может в некоторых пределах влиять на схему измерения показателя.

Для вычисления заказанных пользователем выходных параметров к основной схеме автоматически добавляется измерительный «обвес» из «навесных» элементов, состоящий из необходимых источников сигнала и компонентов, позволяющий перевести основную схему в нужный режим работы и подготовить элементы, на которых будут проводиться измерения.

На настоящий момент в системе имеется одна схема для параметров большого сигнала (рис. 4) и три типа тестовых схем для измерения малосигнальных характеристик (рис. 5). Ток потребления вычисляется в статическом режиме.

Все тестовые схемы создаются «на лету» автоматически. Пользователь не может изменить структуру тестовой схемы, но может изменять параметры «навесных» элементов.

Параметры команды временного анализа

шаг анализа, с

конечное время анализа, с

.tr 1.0e-9 1.0e-6

TRAN measures

Параметры компонентов измерительных схем

sweep=10 front=1 width=2.0e6 Cload=1
 sweep=10 front=1 width=2000000 Cload=1000

sweep: % of Vdd
 front: ns
 width: ns
 Cload: pF

Рис. 4. Тестовая схема для вычисления скорости нарастания сигнала

Параметры команды частотного анализа

`.ac dec 10 1.0 1.0e9`
`.ac dec 10 1.0 1.0e10`

количество точек на декаду: начальная частота, Гц: конечная частота, Гц:

gain, bw, ft, phm

Параметры компонентов измерительных схем

R1=1.e9 C1=1 Cload=1
R1=1000000000 C1=1 Cload=2

R1: Ohm
C1: pF
Cload: pF

CMRR

PSRR

Рис. 5. Тестовые схемы для вычисления малосигнальных характеристик

IV. ВИДЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ

Выше уже упоминалось, что в системе имеются несколько видов характеристики, которые можно разделить на две группы (рис. 6):

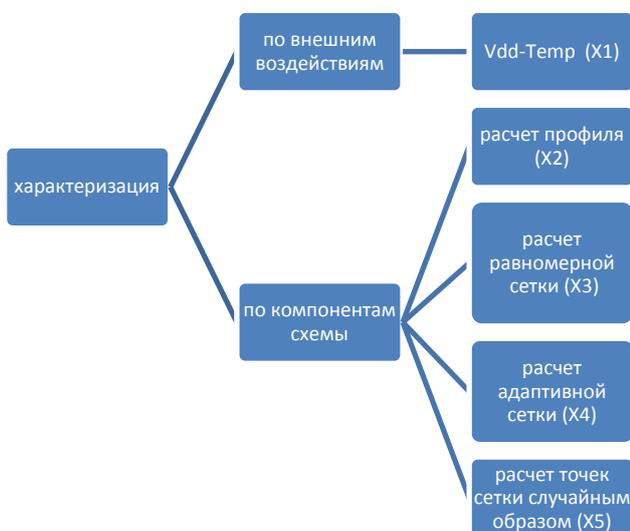


Рис. 6. Виды характеристики в APC

- X1: расчет показателей схемы в «угловых» и центральной точке V-T пространства («V» - это Vdd, напряжение питания; T - температура анализа).
- X2: расчет «профилей» (зависимостей выходных показателей от одного изменяемого параметра).
- X3: расчет показателей схемы на сетке изменяемых параметров. Шаг сетки - равномерный или логарифмический. Количество параметров неограниченно.
- X4: расчет показателей схемы на адаптивной сетке, узлы которой подбираются исходя из заданной точности вычислений.
- X5: расчет показателей схемы в узлах сетки, выбираемых случайным образом.

Такой набор вариантов построения сетки обусловлен поиском компромисса между длительностью процесса характеристики и точностью построения гиперпространства на сетке. В том случае, если предполагается получение сетки с небольшим количеством точек (мало варьируемых переменных и

мало точек на каждой из них), то удобнее воспользоваться расчетом на равномерной сетке. В противном случае можно пытаться получить требуемую оценку на адаптивной сетке или сетке, узлы которой выбираются случайным образом. Так как каждый варьируемый параметр всегда принудительно имеет дискретизирован (минимальный шаг сетки на нем больше нуля), то понятно, что в предельном случае эти две сетки также становятся равномерными.

Далее вкратце рассмотрим перечисленные выше процедуры выбора сеток.

Система выбора точек для процедуры X1 показана на рис. 7. Это простая прямоугольная сетка с

равномерным (или почти равномерным в случае температуры) шагом.

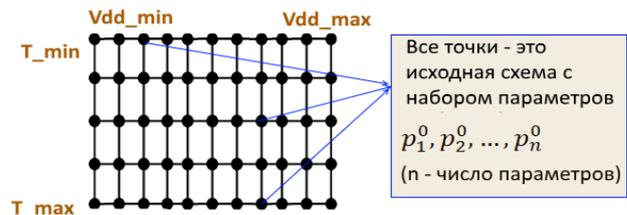


Рис. 7. Выбор точек при характеристике по внешним воздействиям

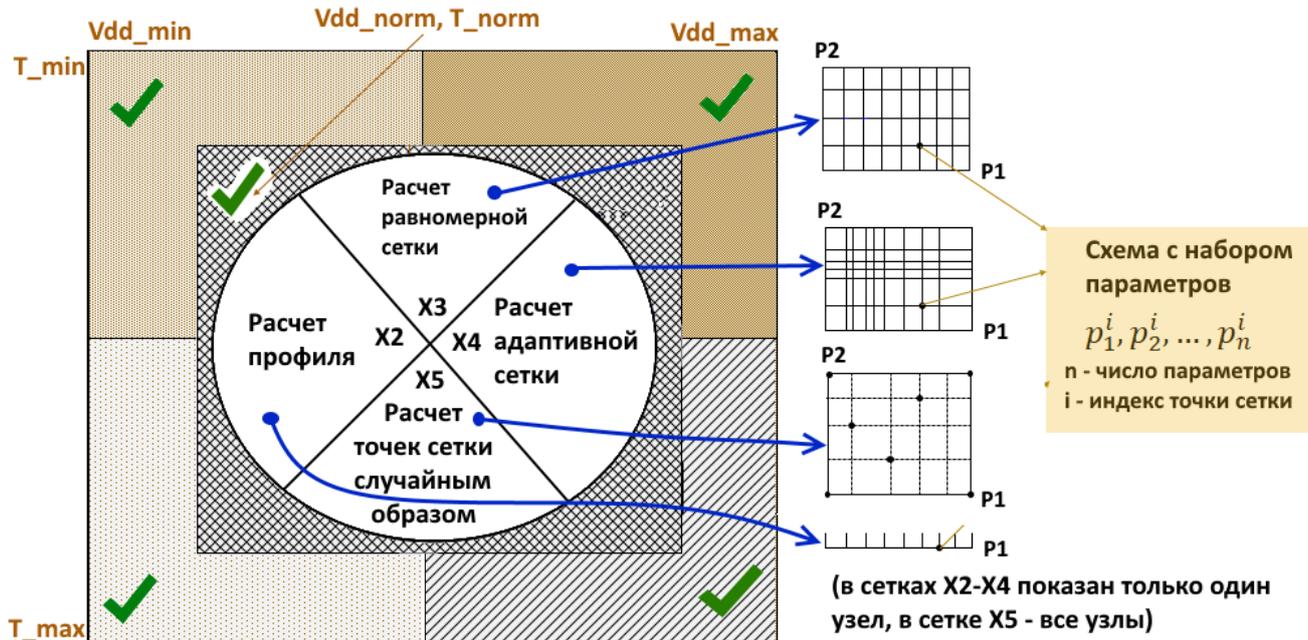


Рис. 8. Соотношение процедур и выбор точек при характеристике по компонентам схемы

Соотношение между собой алгоритмов выбора задачи и система выбора точек для процедур X2-X5 лучше всего может быть представлено в виде трехслойного объекта (рис. 8). Внешний слой (с зелеными галочками) – это возможность задания от 1 до 5 точек в Vdd-Temp пространстве (по умолчанию используется только центральная точка). Средний слой (четыре сектора в круге) – это выбор типа процесса характеристики: для n-переменных построение равномерной, адаптивной или случайной сетки или построение профиля по одной переменной. Внутренний слой – это расчеты во всех узлах выбранной сетки при заданных Vdd и температуре.

Для равномерной сетки и профиля пользователь указывает число точек по каждой переменной и характер изменения шага – линейный или логарифмический. Для адаптивной узлы сетки выбираются автоматически, исходя из заданной точности. Для сетки со случайным выбором точек указывается максимальное время работы алгоритма.

V. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результатом работы процедур характеристики является набор точек, каждая из которых представляет из себя вектор измененных параметров схемы и соответствующей ему вектор показателей схемы в данной точке. Пользователю полученные результаты представляются в виде таблиц (рис. 9), одно- (рис. 10) и двухмерных графиков (рис. 11).

N	M1_w	M2_w	gain, дБ	phm, град	isup, мА
1	20000	20000	20.1415	85.442	0.00229817
2	20000	25000	23.825	80.5358	0.00240819
3	20000	30000	53.4393	50.1043	0.00249935
4	20000	35000	38.6059	64.4679	0.00250252
5	20000	40000	37.2038	65.097	0.00250369
6	25000	20000	20.1508	85.0819	0.00229846
7	25000	25000	23.8567	80.0887	0.00240862
8	25000	30000	75.6107	45.0713	0.00249993
9	25000	35000	38.6102	65.4938	0.00250253
10	25000	40000	37.2107	66.1732	0.00250371
11	30000	20000	20.1578	84.7867	0.00229868

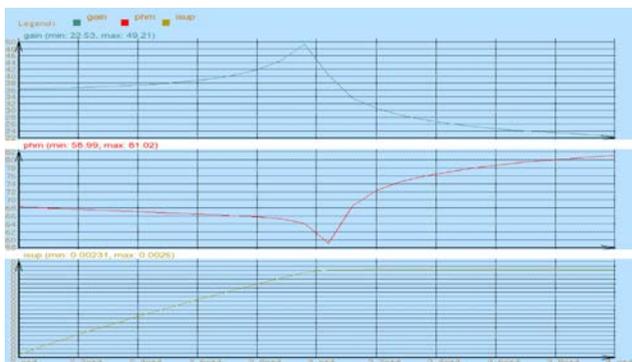


Рис. 9. Представление результатов в виде таблицы

Рис. 10. Представление результатов в виде графика

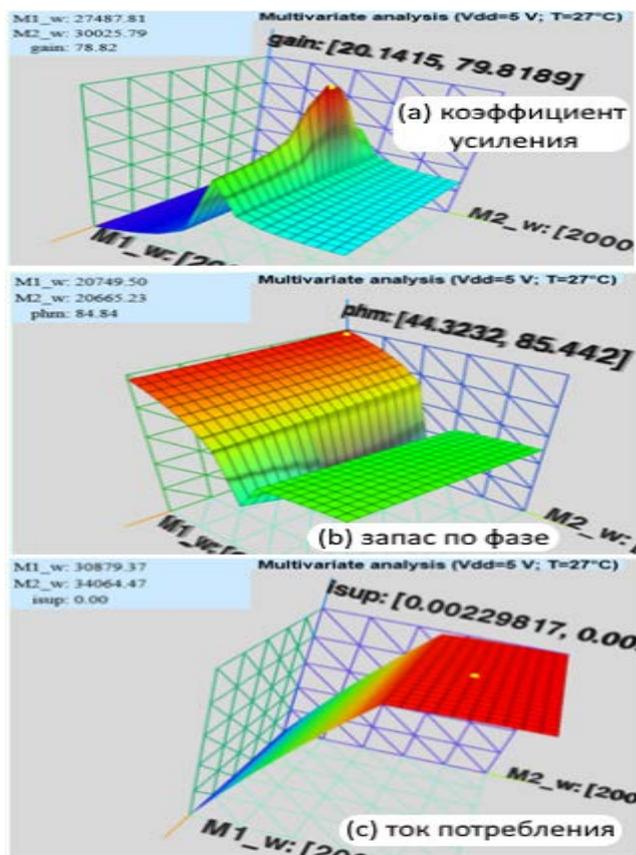


Рис. 11. Представление результатов в виде 3D-графика (желтая точка на поверхности – точка измерения, результаты измерения в левом верхнем углу)

VI. ОБЛАЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Важнейшей особенностью рассматриваемой системы является то, что она реализована на основе облачных технологий [5, 6-8].

Подавляющее большинство систем схемотехнического моделирования (а ядром данной системы является именно программа схемотехнического моделирования) имеют один из двух вариантов доступа: либо это классический вариант вызова исполнительного exe-модуля системы, либо вызывается командная Windows- или Linux-оболочка, транслирующая команды вызова собственного меню в соответствующие директивы exe-модуля. В любом случае такая система доступна либо на локальном компьютере, либо внутри корпоративной сети.

Система APC реализована таким образом, что доступ к ней осуществляется из любой точки сети Интернет. Имеется входной интерфейс в виде обычного веб-сайта. Результаты работы также показываются на веб-страницах. Давая команду на расчет какой-либо процедуры характеристики пользователь запускает процесс расчета сотен и тысяч вариантов одной и той же схемы на специализированном вычислителе. Преимущества такого подхода очевидны – во-первых, пользователю не требуется устанавливать в своей локальной сети программу схемотехнического моделирования; во-вторых, с него снимается рутинная работа по подготовке скриптов для проведения характеристики имеющейся у него схемы.

VII. ВЫВОДЫ

Использование для анализа схем Spice-подобных программ схемотехнического моделирования в «чистом» виде с ручной подготовкой исходных данных является довольно трудоемкой процедурой. Известные оболочки в распространенных системах проектирования (например, Virtuoso в Cadence [12]) представляют из себя надстройки, облегчающие процесс подготовки исходных данных (например, с помощью графического ввода) и просмотра результатов в графическом виде.

Рассматриваемая в данной работе система, в отличие от упомянутых выше оболочек, готовит задание не для одного расчета схемы, а для целого набора точек, позволяющих оценить работоспособность схемы по множеству параметров. Кроме того, ее реализация на основе облачных технологий обеспечивает простой и удобный для большинства современных пользователей вызов системы, доступной из любой точки сети Интернет.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Библиотека стандартных ячеек компании Synopsis: https://www.synopsys.com/dw/ipdir.php?ds=dwc_standard_cell (проверено: 08.02.2018).

- [2] А.Л. Стемпковский, С.В. Гаврилов, А.Л. Глебов. Методы логического и логико-временного анализа цифровых КМОП СБИС // Российская академия наук, Институт проблем проектирования в микроэлектронике, под общ. ред. А. Л. Стемпковского. Москва, 2007. 224 с.
- [3] Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Егоров Ю.Б. Методы ускоренной характеристики библиотек элементов СБИС с контролем заданной точности. Известия ВУЗов. Электроника. 2010. № 3. С. 51-59.
- [4] John Wright. Standard Cell Libraries for use in Mixed Signal Circuits. 2000. URL: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1224818 (проверено: 08.02.2018).
- [5] Определение облачных вычислений в NIST. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final> (проверено 13.11.17).
- [6] Лялинский А.А. Особенности построения прикладных программ с веб-доступом. Информатика, №1(37), январь-март 2013, с.76-83. Минск. ОИПИ НАН Беларуси. 2013.
- [7] Лялинский А.А. Автоматизированное формирование тестов при характеристике цифровых ячеек с использованием веб-доступа. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем, 2012. С. 95-100.
- [8] Лялинский А.А. Генерация больших наборов логических функций для систем автоматизации проектирования цифровых интегральных схем. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2016, №1. С. 9-15.
- [9] Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Пирютина Г.А. Метод анализа быстродействия вентиля с учетом одновременного переключения входов // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2012. С. 119-124.
- [10] CCS модель задержки. URL: <http://www.pari-path.com/blog/characterization-blog/comparing-nldm-and-ccs-delay-models> (проверено 14.03.18).
- [11] ECSM модель задержки. URL: https://projects.si2.org/events_dir/2006/oaconfspring2006/cadenceecsm.pdf. (проверено 14.03.18).
- [12] https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/custom-ic-analog-rf-design/circuit-design/virtuoso-ade-product-suite.html (проверено 15.03.18).

Characterization of Analog Circuits Based on Cloud Computing

A.A. Lyalinsky

Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, Moscow

ippm@ippm.ru

Abstract — A system of analog circuit characterization is considered. The system is based on cloud computing. The paper presents a description of a set of procedures which significantly reduce time of analog circuit design due to the reduced time for preparation of its simulation and increasing the reliability of the project due to performing estimation of circuit in its robustness area.

Keywords — cloud computing, circuit simulation system, information system, analog circuit characterization, circuit optimization, web access, website.

REFERENCES

- [1] Synopsis standard cells library: https://www.synopsys.com/dw/ipdir.php?ds=dwc_standard_cell (last accessed: 08.02.2018).
- [2] A.L. Stempkovskij, S.V. Gavrilov, A.L. Glebov. Metody logicheskogo i logiko-vremennogo analiza cifrovyyh KMOP SBIS // Rossijskaya akademiya nauk, Institut problem proektirovaniya v mikroelektronike, pod obshch. red. A. L. Stempkovskogo. Moskva, 2007. 224 s.
- [3] Gavrilov S.V., Gudkova O.N., Egorov YU.B. Metody uskorennoj harakterizacii bibliotek ehlementov SBIS s kontrol'em zadannoj tochnosti. Izvestiya VUZov. EHlektronika. 2010. № 3. S. 51-59.
- [4] John Wright. Standard Cell Libraries for use in Mixed Signal Circuits. 2000. URL: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1224818 (last accessed: 08.02.2018).
- [5] Opredelenie oblachnyh vychislenij v NIST. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-145/final> (last accessed 13.11.17).
- [6] Lyalinskij A.A. Osobennosti postroeniya prikladnyh programm s veb-dostupom. Informatika, №1(37), January-March 2013, s.76-83. Minsk. OIPI NAN Belarus. 2013.
- [7] Lyalinskij A.A. Avtomatizirovanoe formirovanie testov pri harakterizacii cifrovyyh yacheek s ispol'zovaniem veb-dostupa. Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoelektronnyh sistem. 2012. S. 95-100.
- [8] Lyalinsky A.A. Web-based automatic generation of input patterns at characterization of digital cells // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2012. P. 95-100.
- [9] Gavrilov S.V., Gudkova O.N., Pirutina G.A. The Gate Delay Analysis Method Accounting for Simultaneous Input Switching // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development. 2012. P. 119-124.
- [10] CCS model' zaderzhki. URL: <http://www.pari-path.com/blog/characterization-blog/comparing-nldm-and-ccs-delay-models> (last accessed 14.03.18).
- [11] ECSM model' zaderzhki. URL: https://projects.si2.org/events_dir/2006/oaconfspring2006/cadenceecsm.pdf. (last accessed 14.03.18).
- [12] https://www.cadence.com/content/cadence-www/global/en_US/home/tools/custom-ic-analog-rf-design/circuit-design/virtuoso-ade-product-suite.html (last accessed 15.03.18).