

Методика автоматизации проектирования источника опорного напряжения, определяемого шириной запрещенной зоны кремния

В.Г. Иванов, В.В. Лосев

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

Bandgap Reference Source Design

V.G. Ivanov, V.V. Losev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

Предложена формализованная методика автоматизированного проектирования схемы источника опорного напряжения, определяемого шириной запрещенной зоны. Отличительной особенностью методики является автоматизация процесса синтеза схемотехнических представлений по заданным параметрам источника, что существенно сокращает сроки проектирования. На основе разработанной методики по технологии КНИ 180 нм спроектирована схема источника опорного напряжения. Полученное схемотехническое решение имеет следующие требуемые характеристики: подавление помехи по питанию на частоте 1 кГц и 1 МГц в худшем случае –60 дБ и –44 дБ соответственно, максимальный потребляемый ток 25 мкА, температурный коэффициент 24 ppm/°C в области температур от –70 до 150 °C, отношение изменения выходного напряжения к изменению напряжения питания 354 мкВ/В в диапазоне напряжения питания 2,4–7 В.

Ключевые слова: источник опорного напряжения; подавление помехи по питанию; температурный коэффициент.

A formalized method of automated bandgap reference source design has been proposed. The distinctive feature of the method is the automation of the synthesis process of circuit engineering presentation, which considerably reduces the design time. Based on the developed methods in the SOI 180 nm technology the circuit has been designed. It has been shown that the obtained circuit engineering solution has the required characteristics: the power supply rejection ratio at 1 kHz in the worst case is –60 dB, at 1 MHz –44 dB, the maximum consumed current is 25 uA, the temperature coefficient is 24 ppm/°C in the temperature range from –70 to 150 °C, the line regulation is 354 uV/V in the supply voltage range from 2.4 to 7 V.

Keywords: bandgap voltage reference; power supply rejection ratio; temperature coefficient.

Введение. Источник опорного напряжения (ИОН) – важная часть аналоговой микросхемы, например аналого-цифрового преобразователя. ИОН должен обеспечивать напряжение, почти не зависящее от температуры и напряжения питания. Разработка ИОН требует больших временных затрат, так как приходится учитывать множество характеристик одновременно. Несмотря на то что средства компьютерного моделирования позволяют вычислять характеристики схем в короткие сроки и с учетом точных моделей, синтез аналоговых блоков остается актуальной задачей [1, 2]. В случае, когда требуется, чтобы все компоненты схемы были выполнены на одном кристалле, необходима методика ускоренной разработки аналоговых блоков.

Цель настоящей работы – разработка методики расчета параметров ИОН для ускоренного проектирования средствами САПР.

Общий подход к проектированию аналоговых интегральных микросхем. Проектирование аналогового устройства можно представить как задачу, в которой исходными данными являются классический вариант схемы ИОН (рис.1,а) [3–6], технологическая библиотека, на базе которой проектируется схема, и техническое задание, в котором прописаны требования к параметрам устройства, например зависимость выходного напряжения от температуры (рис.1,б). В результате проектирования устройства должно быть найдено соотношение параметров схемы, удовлетворяющее требованиям технического задания.

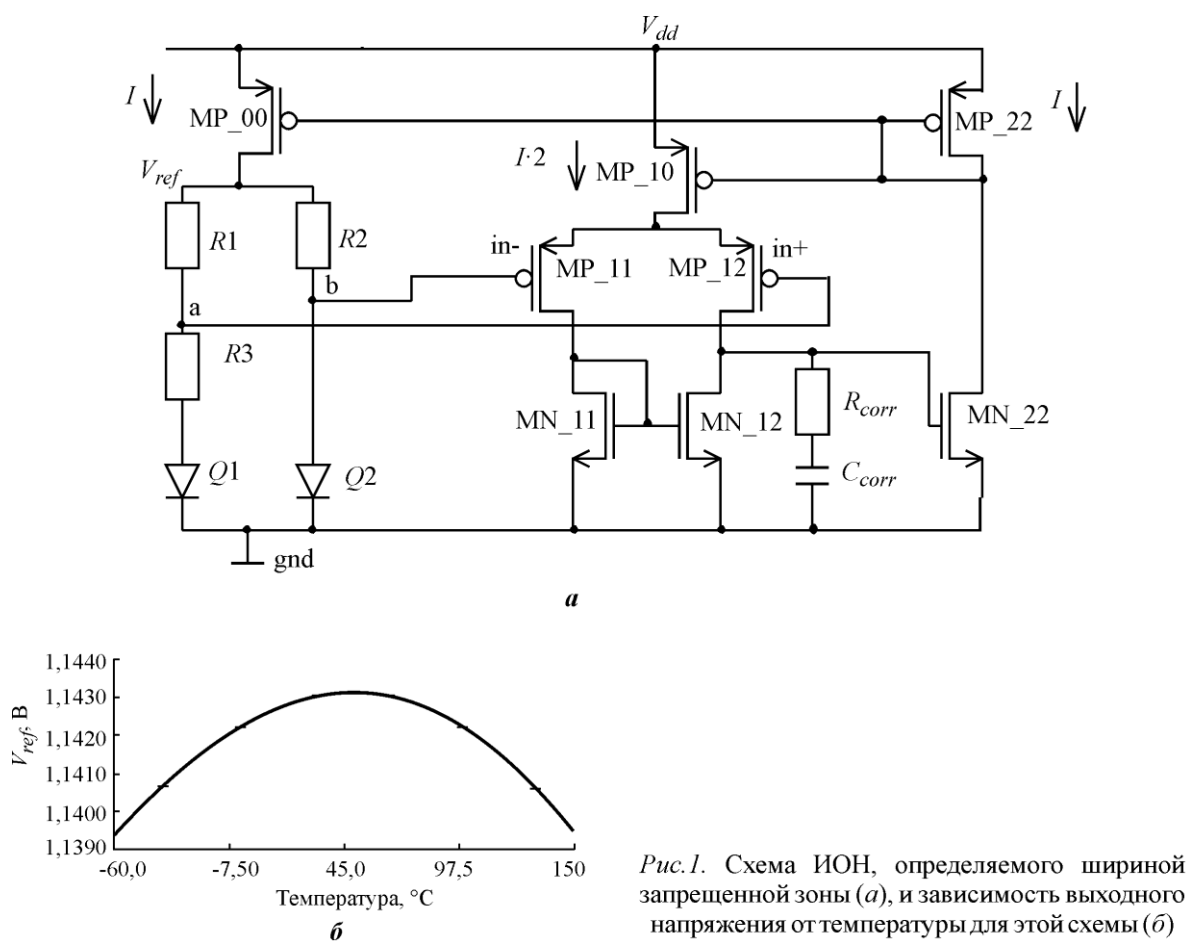


Рис.1. Схема ИОН, определяемого шириной запрещенной зоны (а), и зависимость выходного напряжения от температуры для этой схемы (б)

В ходе решения задачи проектирования аналогового устройства выполняются следующие этапы:

- проведение оценочных расчетов параметров элементов с использованием точных моделей в программе;
- коррекция параметров элементов для получения полностью работоспособной схемы;
- проверка соответствия параметров схемы техническому заданию и доработка схемного решения в случае несоответствия техническому заданию или коррекция его.

Сформулируем требования к техническим параметрам ИОН:

- рабочий диапазон напряжения питания 3–7 В;
- размах выходного напряжения не должен превышать 10 мВ в области температур от –70 до 150 °С;
- максимальный потребляемый ток 20 мкА.

Для получения минимального размаха выходного напряжения в рассматриваемом диапазоне температур его зависимость должна иметь форму «купола».

Методики проектирования ИОН. Суть предлагаемой методики состоит в подробной формализации этапов и процесса проектирования ИОН с целью их реализации в виде программного кода (скриптов), который будет являться частью библиотечного элемента ИОН. Рассмотрим этапы проектирования схемы на основе классического варианта.

Для проведения оценочных расчетов параметров элементов с использованием точных моделей в программе необходимо установить начальные значения параметров компонентов и сделать предварительный расчет. Порядок действий следующий:

- оценка выходного напряжения схемы и задание его (приблизительно 1,22 В);
- установка длин каналов транзисторов;
- определение потребляемого тока в активном режиме;
- распределение тока по ветвям токового зеркала;
- задание потенциалов на стоках транзисторов токового зеркала таким образом, чтобы транзисторы были в надпороговой области для лучшего их согласования [5].

На рис.2 приведена исходная классическая схема ИОН с дополнительными идеальными источниками напряжения, подключенными к стокам токозадающих транзисторов токовых зеркал и выходу схемы.

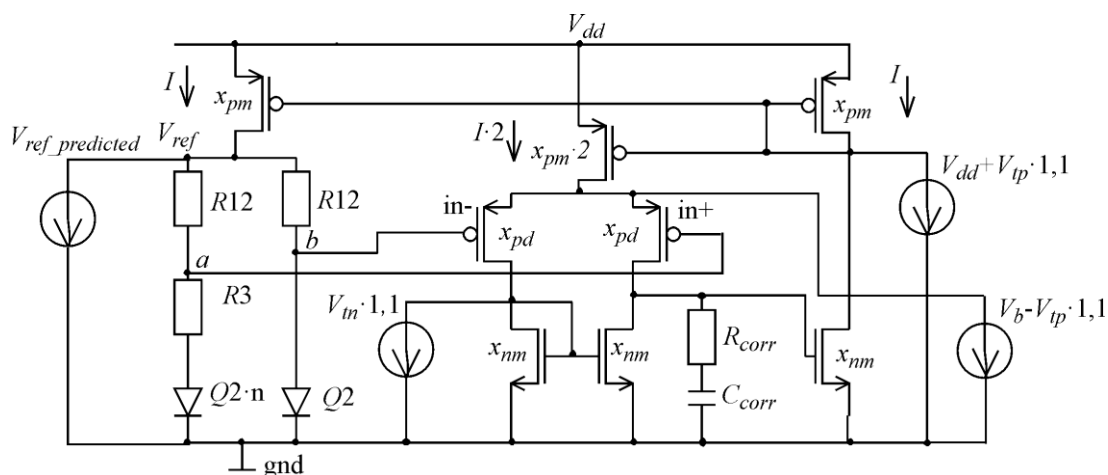


Рис.2. Схема ИОН с дополнительными источниками напряжения и обозначенными номиналами элементов (V_{dd} – напряжение питания схемы; $I_{sum} = 4I$ – суммарный ток, потребляемый схемой; V_m – пороговое напряжение n -канального транзистора; V_{tp} – пороговое напряжение p -канального транзистора; x_{nm} , x_{pm} – коэффициенты, определяющие ширину транзисторов n - и p -канальных токовых зеркал соответственно; x_{pd} – ширина p -канальных транзисторов дифференциальной пары; V_b – напряжение на диоде $Q2$; R_{corr} , C_{corr} – соответственно корректирующий резистор и конденсатор)

Допустим, что токи в ветвях распределяются так, как показано на рис.2. Тогда для получения требуемого тока через ветви токового зеркала требуется подстройка геометрических размеров токозадающих транзисторов. Известно, что токовые зеркала имеют лучшую согласованность при работе в надпороговом режиме [5]. Примем потенциалы на стоках равными $V_s + V_t \cdot 1,1$, следовательно напряжения сток-исток для n - и p -канальных транзисторов составляют: $V_{dsn} = 0 + V_m \cdot 1,1$, $V_{dsp} = V_{dd} + V_{tp} \cdot 1,1$. Для расчета геометрии токозадающих транзисторов выберем минимальный шаг для n -канального транзистора W_{n_min} , для p - канального – W_{p_min} : $W_{nm} = x_{nm}W_{n_min}$, $W_{pm} = x_{pm}W_{p_min}$.

Первый расчет проводится при минимальной выбранной ширине транзистора $W = 1 \cdot W_{nm_min}$. Если в результате расчета ток, протекающий через рассматриваемую ветвь, меньше, чем требуется, то, считая, что I_d зависит от W линейно, определяем $x_{nm} = I/i_{nm}$, $x_{pm} = I/i_{pm}$. После того как ширина транзисторов токовых зеркал выбрана такой, что получен нужный ток, подбирается ширина транзисторов дифференциальной пары. Когда напряжение на стоках транзисторов дифференциальной пары задано, нужно подобрать напряжение на истоках. Рассматриваем случай, при котором напряжение между стоком и истоком минимально, но при этом транзистор открыт. Таким образом, напряжение на истоке должно быть равно сумме напряжения на диоде, подаваемого на затвор транзистора дифференциальной пары, и модуля порогового напряжения p -канального транзистора с небольшим запасом: $V_{sdp} = V_b + |V_{tp} \cdot 1,1| = V_b - V_{tp} \cdot 1,1$. Ширина p -канальных транзисторов дифференциальной пары выбирается так, что $X_{pd} = x_{pd}W_{pd}$.

Через резисторы $R1$ и $R2$ (см. рис.1,а) должны течь равные токи. Примем $R1 = R2 = R12$, тогда значение $R12$ (см. рис.2) можно вычислить по формуле

$$R12 = \frac{V_{ref_predicted} - V_b}{I/2},$$

где $V_{ref_predicted}$ – ожидаемое значение выходного напряжения схемы, которое обычно составляет 1,12–1,22 В; I – ток, распределяемый между резисторами $R1$ и $R2$.

Следующий шаг – подстройка номинала резистора $R3$ так, чтобы выходное напряжение имело зависимость от температуры в виде «купола» (рис.1,б). Оценить номинал резистора $R3$ можно, используя выражение

$$R3 = \frac{\phi_T \ln(n)}{I/2},$$

где ϕ_T – температурный потенциал; $n = Q1/Q2$ – отношение площадей диодов.

Коррекция параметров элементов для получения полностью работоспособной схемы осуществляется подбором номинала резистора $R3$ без опорных потенциалов, т.е. подстройкой зависимости выходного напряжения от температуры, а также частотной коррекцией для получения запаса по фазе не менее 45° .

Для повышения устойчивости дифференциальной пары используется корректирующая цепь. Номиналы компонентов корректирующей цепи следует подбирать таким образом, чтобы минимальное значение сдвига фазы в диапазоне от 1 Гц до частоты единичного усиления было больше 45° . В данном случае частотная коррекция осуществляется подбором номиналов R – C -цепи между затвором n -канального транзистора MN22 и шиной земли так, чтобы запас устойчивости по фазе был больше 45° во всем температурном диапазоне и диапазоне напряжения питания. Алгоритм подбора номиналов R – C -цепи представлен на рис.3.

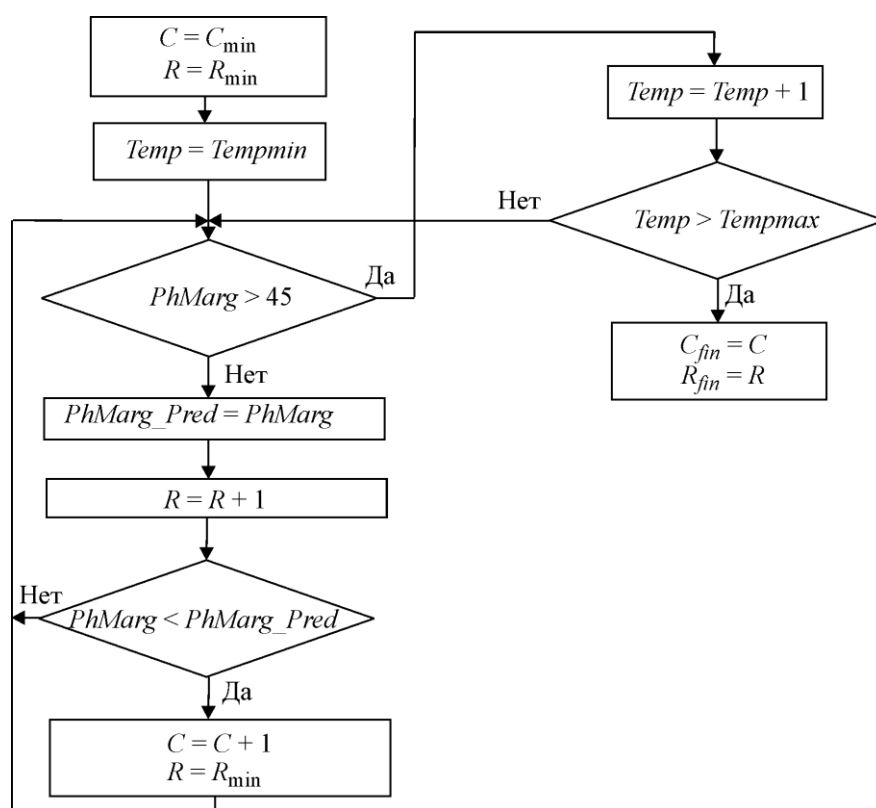


Рис.3. Блок-схема подбора номиналов корректирующей R–C-цепи

Если подавление помехи по питанию на высоких частотах меньше, чем требуется, то для получения нужных значений необходимо:

- уменьшить длину затворов (при этом ухудшится подавление помехи по питанию на низких частотах);
- уменьшить ширину транзисторов дифференциальной пары (при этом ухудшится подавление помехи по питанию на низких частотах);
- увеличить потребляемый ток (при этом требуется коррекция технического задания);
- уменьшить емкость конденсатора корректирующей цепи (при этом снизится запас по фазе, т.е. ухудшится устойчивость).

Коррекцию зависимости выходного напряжения от температуры предлагается осуществлять не в основной части ИОН, а в отдельной цепи (рис.4).

Таким образом, основной ИОН используется как источник опорного тока, пропорционального температуре, при этом основная схема ИОН не будет содержать дополнительных элементов. Недостатком такого способа коррекции следует считать повышенное энергопотребление.

Для расширения диапазона частот, на которых подавляется помеха по питанию, нужно уменьшить общую паразитную составляющую схемы. Транзисторы n -канального зеркала и p -канальной дифференциальной пары должны иметь достаточно большие длины каналов для минимизации короткоканальных эффектов, что улучшает линейность. К токовому зеркалу, построенному на p -канальных транзисторах, предъявляются менее жесткие требования по коэффициенту отражения тока, поэтому длина каналов транзисторов p -канального токового зеркала должна иметь меньшие значения для минимизации паразитной емкости.

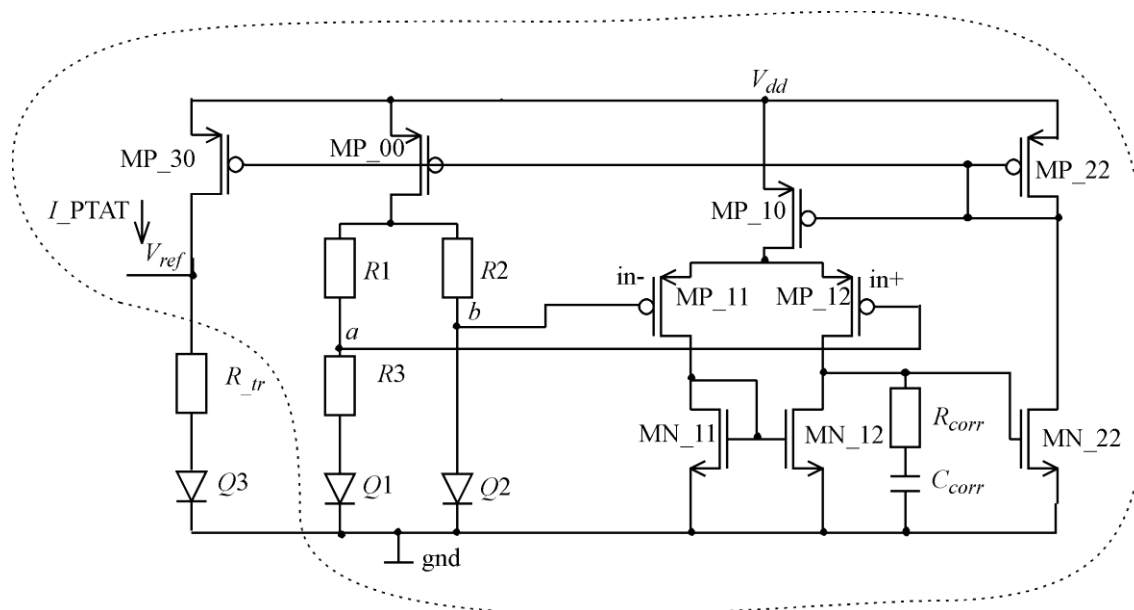


Рис. 4. Модифицированный вариант классической схемы ИОН, определяемого шириной запрещенной зоны (обведен генератор тока, меняющегося пропорционально температуре)

На примере классической схемы ИОН разработан прототип модуля автоматизации расчета, имеющий входные и выходные данные (таблица). Модуль реализован в виде программы, написанной на языке SKILL и являющейся составной частью библиотечно-го элемента ИОН и предназначенной для работы в САПР Cadence.

Входные и выходные данные разработанного модуля автоматизации

Входные данные	Выходные данные
Список соединений классической схемы. Условия тестирования схемы: - диапазон напряжения питания; - диапазон температур. Модели элементов. Значения параметров схемы: - длина затворов транзисторов; - соотношение диодов в диодно-резистивной цепи. Варьируемые параметры: - потребляемый ток; - длина канала транзисторов <i>p</i> -канального токового зеркала	Параметры элементов схемы: - значения ширины подстраиваемых транзисторов; - номиналы резисторов резистивно-диодной цепи; - номиналы резистора и конденсатора корректирующей цепочки. Характеристики спроектированной схемы: - разница между минимальным и максимальным выходным напряжением в рассматриваемом диапазоне температур при номинальном напряжении питания; - запас устойчивости, коэффициенты подавления помехи по питанию на частоте 1 кГц и 1 МГц при минимальной, номинальной и максимальной температуре при номинальном напряжении питания

Результаты моделирования. Приведем результаты, полученные при моделировании схемы с экстрагированными паразитными параметрами при напряжении питания от 2,4 до 7 В в области температур от -70 до 150 °С:

Характеристики схемы

Худшее значение

Размах выходного напряжения	6 мВ
Коэффициент подавления помехи по питанию на низких частоте 1 кГц.....	-60 дБ
Коэффициент подавления помехи по питанию на частоте 1 МГц.....	-44 дБ

Температурный коэффициент выходного напряжения ИОН в области температур от -70 до 150 °С рассчитывается по формуле [4]:

$$TCU_{оп5} = \frac{U_{опmax} - U_{опmin}}{U_{оп}(27^\circ C) \cdot (T_2 - T_1)} \cdot 10^6 = \frac{1,1245 - 1,1184}{1,1245 \cdot (150 - (-70))} \cdot 10^6 = 24 \text{ ppm/}^\circ\text{C}.$$

Отношение изменения выходного напряжения к изменению напряжения питания в диапазоне $2,4-7$ В рассчитывается по формуле [4]

$$K_{U1} = \frac{U_{опmax} - U_{опmin}}{V_{ddmax} - V_{ddmin}} = \frac{1629}{2,4 - 7} = 354 \text{ мкВ/В}.$$

Заключение. Разработанная методика автоматизации проектирования ИОН реализована в виде библиотечных элементов – скриптов для САПР Cadence. Использование методики может сократить время, затрачиваемое разработчиком средней квалификации на принятие решений.

Дальнейшее развитие работы предполагается в направлении создания библиотечной технологически ориентированной подсистемы схемотехнического синтеза аналоговых блоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 16-29-09588/16).

Литература

1. **Рябченков С.С.** Методика проектирования прецизионных источников опорного напряжения // Изв. вузов. Электроника. – 2004. – №3. – С. 36–40.
2. **Liu Bo, Gielen G., Fernández F.V.** Automated design of analog and high-frequency circuits : a computational intelligence approach. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – 235 p.
3. **Макаров А.Б., Кочкин И.П.** Технологическая миграция источников опорного напряжения на основе ширины запрещенной зоны кремния // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010: сб. тр. / Под общ. ред. академика А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2010. – С. 547–552.
4. **Shopan din Ahmad Hafiz, Md. Shafiullah, Shamsul Azam Chowdhury** Design of a Simple CMOS Bandgap Reference // International Journal of Electrical & Computer Sciences. – 2010. – October. – P. 6–9.
5. **Rincon-Mora A.** Voltage References From Diodes to Precision High-Ordered Bandgap Circuits. – IEEE Press, 2002. – 184 p.
6. **Эннс В.И., Кобзев Ю.М.** Проектирование аналоговых КМОП-микросхем. Краткий справочник разработчика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 456 с.

Статья поступила
27 мая 2016 г.

Иванов Вадим Геннадьевич – аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ, Москва, Россия. *Область научных интересов:* проектирование источников опорного напряжения, автоматизация проектирования аналоговых микросхем. **E-mail: fadmc@mail.ru**

Лосев Владимир Вячеславович – доктор технических наук, профессор кафедры ИЭМС МИЭТ, Москва, Россия. *Область научных интересов:* проектирование систем на кристалле, проектирование и моделирование аналоговых блоков, топологическое проектирование и моделирование.