

Методики верификации скорости нарастания выходного напряжения макромодели операционного усилителя

Иванников А.Д.¹, Кожевников А.М.², Тумковский С.Р.²

¹*Institute for Design Problems in Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

adi@ippm.ru, a.romanov@hse.ru, STumkovskiy@hse.ru

Аннотация: Рассмотрено три методики верификации скорости нарастания выходного напряжения макромодели операционного усилителя (ОУ, Op amp). Рассмотренные методики проиллюстрированы на примере *SPICE*-макромоделей ОУ *LMH6642* компании *Texas Instruments* и *OP37* компании *Analog Devices*.

Ключевые слова: операционный усилитель (operational amplifier), макромодель (macro models), *LTSpice*, схемотехническое моделирование (circuit simulation), верификация (verification), скорость нарастания выходного напряжения (Slew Rate).

Введение

Схемотехническое моделирование играет большое значение, поскольку позволяет существенно сократить время разработки, а, следовательно, уменьшить время выхода изделия на рынок.

Стандартом для создания систем схемотехнического моделирования де-факто стала программа *SPICE* [Quarles и др., 1972], разработанная в *Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley*. К системам, основанным на ядре *SPICE* относятся: *HSPICE* (фирма *MetaSoftware*), *ORCAD* (*Cadence Design Systems, Inc.*), *IS_SPICE* (*Intusoft*), *MicroCap* (*Spectrum Software*), *Altium Designer* (*Altium*), *Dr. Spice* и *ViewSpice* (*Deutsch Research*) и *LTSpice* (*Linear Technology*). Широкое использование программного обеспечения для схемотехнического моделирования создало растущий спрос на модели электрических компонентов, которые должны, с одной стороны, адекватно описывать характеристики компонента, а, с другой, не привносить в моделирование слишком большую детализацию, которая может привести к проблемам сходимости. Отвечая на эту потребность ведущие фирмы, производители электрических компонентов стали обеспечивать выпускаемые приборы моделями с публикацией их в сети Интернет.

Одним из востребованных электрических компонентов (devices) в аналоговой схемотехнике является операционный усилитель.

Основным преимуществом операционных усилителей в аналоговой схемотехнике является то, что добавление небольшого количества

внешних компонентов, позволяет создать большое разнообразие схем функциональных узлов, применяемых в различных приборах и устройствах, включая измерительные приборы.

Еще несколько лет назад, *SPICE*-макромодели ОУ плохо коррелировали с реальностью. Понимая это в 1995 году в рамках альянса компаний *Electronic Industry Alliance (EIA)* был создан совет по макромоделям (*Compact Model Council*), в который вошли компании: *AMD, Analog Devices, Avanti, BTA Technology, Cadence Design System, Conexant System, Hewlett Packard, Hitachi, Motorola, IBM, Intel, Lucent Technology, NEC, Philips System, Texas Instruments* и др. Задачей совета является стандартизация и решение проблем качества моделей [Зимин, 2009].

В настоящее время, *SPICE* - макромодели ОУ, в большинстве случаев, адекватно описывают реальные приборы. Однако, невозможно гарантировать, что ОУ соответствует заявленным для него характеристикам, поэтому проверка каждой макромодели ОУ перед ее использованием, является актуальной задачей и осложняется необходимостью выбора набора методик верификации каждого параметра.

Рассмотрим этот процесс на примере одного из основных параметров, определяющих динамические свойства ОУ - скорости нарастания выходного напряжения (*Slew Rate*).

Цель и задачи

Целью настоящей работы является верификация скорости нарастания выходного напряжения (*Slew Rate*) операционных усилителей (*Op amps*) на основе методик, основанных на различных тестовых схемах.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

- на основе анализа литературных данных произведен отбор методик для верификации скорости нарастания выходного напряжения,
- по отобранным методикам проведена верификация скорости нарастания выходного напряжения макромоделями ОУ *LM6642* и ОУ *OP37*.

Теоретическая часть

В теории для определения скорости нарастания выходного напряжения *SR* в качестве входного воздействия используется входной сигнал в виде ступеньки (рис. 1).

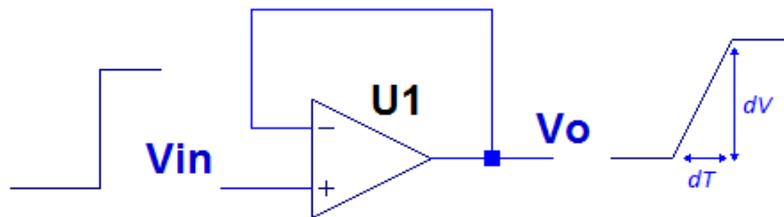


Рис. 1. Теоретическая интерпретация скорости нарастания выходного напряжения

А сама скорость нарастания выходного напряжения определяется как производная выходного напряжения по времени.

$$SR = \frac{dV_o}{dt},$$

V_o - выходное напряжение ОУ.

Наименьшая скорость нарастания выходного напряжения получается при единичном усилении, поэтому это значение и приводят в справочных данных.

При воздействии синусоидального сигнала на входе ОУ имеем:

$$V_o(t) = V_0 \sin(2\pi ft).$$

Скорость нарастания выходного напряжения имеет вид:

$$SR = \frac{dV_o}{dt} = 2\pi f V_0 \cos(2\pi ft).$$

С конечным значением скорости нарастания связано также уменьшение амплитуды выходного напряжения усилителя с ростом частоты входного сигнала (рис. 2).

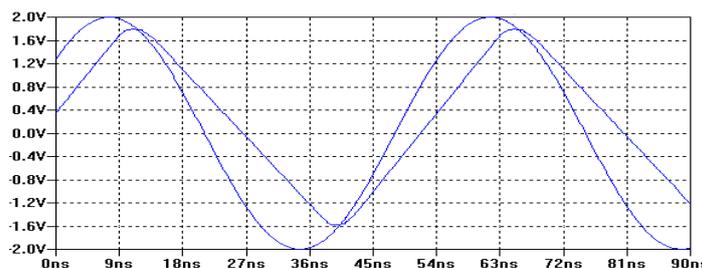


Рис. 2. Влияние скорости нарастания выходного напряжения на амплитуду и форму выходного напряжения

Экспериментальная часть

Как показывает практика, разные авторы и производители ОУ применяют различные методики определения указанного параметра [Лозицкий С., 2006].

Компания *Texas Instruments* предлагает методику, основанную на моделировании тестовой схемы, представленной на рис. За [Texas Instruments, 2013]. На вход схемы подается сигнал в виде серии

импульсов, а с выхода (в точке **out**) снимается производная выходного напряжения по времени, равная, как было показано выше, значению скорости нарастания выходного напряжения.

Авторы портала *eCircuit Center* [eCircuit Center, 2015] предлагают методику, основанную на схеме, представленной на рис. 3б. На вход схемы подается сигнал – ступенька, а с выхода (в точке **out**) снимается выходное напряжение (рис. 4б), а скорость нарастания выходного напряжения рассчитывается как отношение приращения выходного напряжения ко времени. Этот подход соответствует методу измерения скорости нарастания выходного напряжения, установленному ГОСТ 23089.10-83.

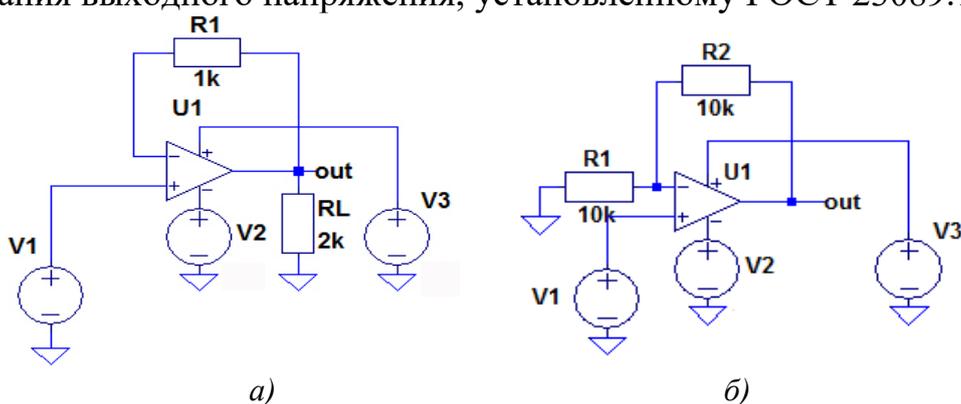


Рис. 3. Схемы для расчета скорости нарастания выходного напряжения

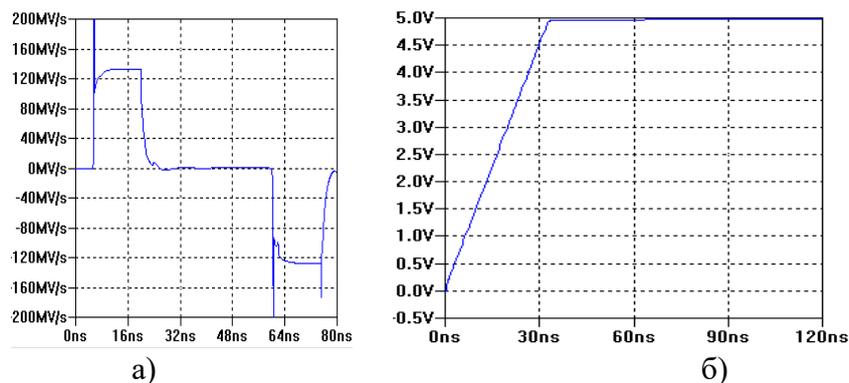


Рис. 4. Скорость нарастания выходного напряжения: а) по схеме рис. 3а, б) по схеме рис. 3б

Из графика (рис. 4а) видно, что $SR=130\text{В/мкс}$, а из графика (рис. 4б) видно, что выходное напряжение за 30нс нарастает до 4.5В, что соответствует $SR=150\text{В/мкс}$.

Еще одна методика определения скорости нарастания выходного напряжения заключается в следующем. На вход тестовой схемы (рис. 5а) подают синусоидальный сигнал увеличивая частоту до тех пор, пока выходное напряжение не станет треугольной формы.

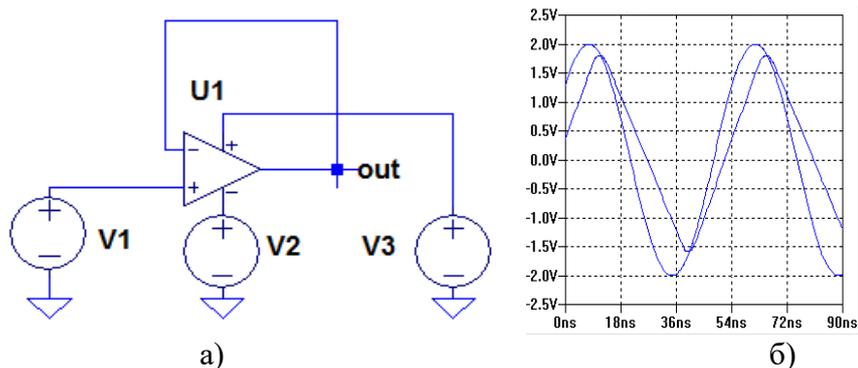


Рис. 5. а) тестовая схема, б) результаты моделирования

Скорость нарастания выходного напряжения определяется как приращение выходного напряжения за соответствующее время. Из рис. 5б - $SR=134\text{В/мкс}$.

Во всех трех случаях получены значения близкие к 130В/мкс , что соответствует техническим условиям (Datasheet) моделируемого операционного усилителя *LMH6642*.

По предложенным методикам проведем верификацию скорости нарастания выходного напряжения макромодели ОУ *OP37* компании *Analog Devices*.

На рис. 6 представлены результаты моделирования тестовых схем (рис. 3а, 3б и 5а).

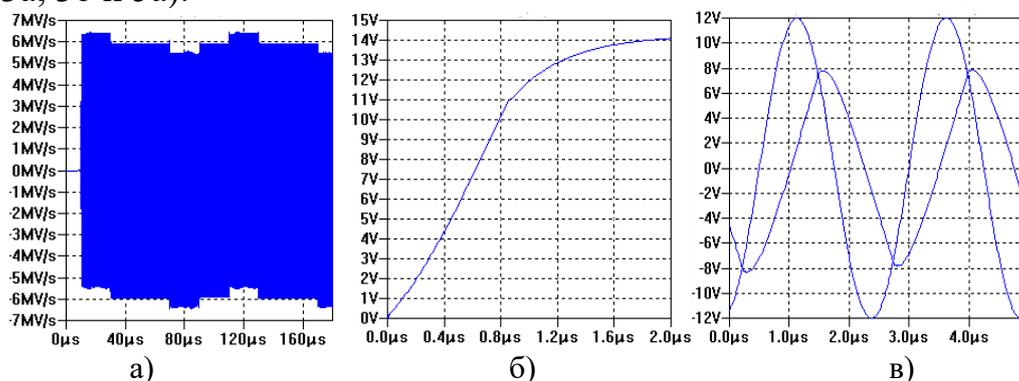


Рис. 6. Результаты моделирования ОУ *OP37*

Из результатов, представленных на рисунках 6б и 6в можно однозначно определить скорость нарастания выходного напряжения, которая в первом случае равна 11В/мкс , а, во-втором, - 15В/мкс , что соответствует приведенному в технических условиях (datasheet) диапазону: $11\text{В/мкс} - 17\text{В/мкс}$.

Результаты моделирования, представленные на рис. 6а, объясняются наличием высокочастотных синусоидальных колебаний небольшой амплитуды, наложенных на импульсное выходное напряжение (рис. 7б).

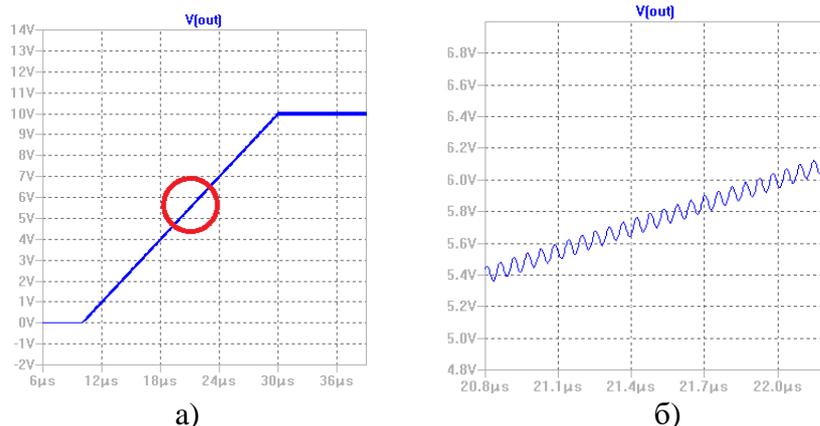


Рис. 7. Результаты моделирования тестовой схемы рис. 3а

Их наличие существенно меняет картину производной выходного напряжения ОУ по времени и, соответственно, не позволяет определить скорость нарастания выходного напряжения.

Заключение

В заключении отметим, что методика, предложенная компанией *Texas Instruments* для верификации скорости нарастания выходного напряжения, не дает гарантированного результата, поэтому для верификации этого параметра полезно иметь несколько тестовых схем.

Затраты времени и сил на проверку макромоделей и документирование результатов верификации являются однократными, а полученные результаты, многократно используются в повседневной деятельности.

Список литературы

1. [Quarles и др., 1972] *Spice 3 User Manual* by T. Quarles, A.R. Newton, D.O. Pederson, A. Sangiovanni-Vincentelli Department of Electrical Engineering and Computer Sciences University of California Berkeley, Ca., 94720.
2. [eCircuit Center] *eCircuit Center* // URL: <http://www.ecircuitcenter.com/>, (Дата обращения 09.01.2015).
3. [Linear Technology] URL: <http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>, (Дата обращения 09.01.2015 г.)
4. [Зимин, 2009] Зимин Ю. Уровни представления интегральных операционных усилителей при схемотехническом моделировании// Компоненты и технологии. 2009. № 10
5. [Texas Instruments, 2013] *Texas Instruments. Application Report. AN-1516 Pspice Universal Test Circuits. SNOA475D–November 2006–Revised April 2013*
6. [Лозицкий С., 2006] Лозицкий С. Схемы, методики и сценарии тестирования SPICE совместимых макромоделей операционных усилителей. Современная электроника. 2006. № 4.