

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Описаны методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей (ОУ).

Материалы и методы. На предварительном этапе пользователем создается база исходных данных, включающая минимально допустимые значения измеряемых частотных и временных параметров, с которыми сравниваются результаты измерений параметров ОУ. По результатам этого сравнения принимается решение о соответствии ОУ требованиям технических условий. С учетом исходных данных и измеренных параметров создается макромодель ОУ.

Результаты. Определены основные этапы методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ. Составлен перечень исходных данных и измеряемых параметров ОУ, необходимых для составления паспорта и расчета макромодели ОУ. Получены расчетные соотношения, позволяющие выразить параметры элементов макромодели непосредственно через статические и динамические параметры ОУ.

Выводы. Разработана методика автоматизированной обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ, все процедуры которой выполняются в программной среде LabVIEW National Instruments. Тестирование разработанной программной реализации предложенной методики показало ее работоспособность и эффективность.

Ключевые слова: операционный усилитель, частотные и временные параметры, измерение, методика, макромодель

M. Yu. Parshukov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

PROCESSING THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF FREQUENCY AND TIME PARAMETERS OF OPERATIONAL AMPLIFIERS

Abstract.

Background. The article describes a method of processing the results of measurements of frequency and time parameters of operational amplifiers (op amp).

Materials and method. A user creates a database of initial data, including the minimum allowable values of the measured frequency and time parameters with which the op amp parameters measurement results are compared at the preliminary stage. Upon the results of this comparison a decision is taken about the compliance to requirements of technical specifications. An op amp macromodel is created taking into account the initial data and the measured parameters.

Results. The main stages of the method of processing the results of measurements of frequency and time parameters of op amp were defined. The list of initial data and measured parameters of op amp necessary to produce datasheet and calcu-

¹ Работа поддержана Грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 16-38-00233).

lation of macromodel op amp was compiled. Calculated ratios allowing to express the parameters of the macromodel elements directly through static and dynamic parameters of op amp were obtained.

Conclusions. The method of automated processing of the results of measurements of frequency and time parameters of op amp was developed. All procedures of the method were performed in the LabVIEW National Instruments software environment. Testing of the developed software implementation of the proposed method showed its efficiency and operability.

Key words: operational amplifier, frequency and time parameters measurement, method, macromodel.

Введение

При построении электронных схем для преобразования широкополосных, в том числе импульсных, сигналов широко применяются интегральные операционные усилители (ОУ). Для оценки динамических характеристик схем необходимо иметь информацию об основных частотных и временных параметрах ОУ. Предлагается методика обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ с применением разработанного авторами многофункционального аппаратно-программного комплекса (АПК) для измерения динамических параметров ОУ [1].

Методика позволяет:

- проводить математическую обработку результатов измерений;
- сопоставлять результаты измерений с требованиями технических условий, предварительно занесенными в базу исходных данных, и на основании этого принимать решение о соответствии или несоответствии исследованного экземпляра ОУ требованиям технических условий, а также выдавать сообщение о принадлежности данного ОУ к той или иной группе рассортировки по измеренным значениям параметров;
- создавать паспорт исследованного ОУ;
- создавать текстовое описание макромодели исследованного экземпляра ОУ в формате, принятом в Spice-совместимых программах схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.).

1. Основные этапы методики обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ

Методика предусматривает следующие этапы:

1. Пользователем предварительно создается база исходных данных, содержащая:
 - наименование микросхемы и название фирмы-производителя;
 - конструктивные данные ОУ: тип корпуса и расположение выводов;
 - номинальные значения напряжения питания положительной V_{pwrp} и отрицательной V_{pwrm} полярности (здесь и далее используются наименования параметров, употребляемые в Spice-совместимых программах схемотехнического моделирования);
 - статические параметры ОУ, не измеряемые разработанным АПК:
 - типовое значение входного тока смещения I_b ;
 - типовые значения максимальных выходных напряжений положительной V_{outp} и отрицательной V_{outm} полярности;

- типовое значение потребляемой мощности в статическом режиме Pd ;
- типовое значение коэффициента усиления $Avdc$;
- типовое значение коэффициента ослабления синфазного сигнала $CMRR$;
- типовые значения выходных сопротивлений ОУ на низких R_{odc} и высоких R_{oac} частотах; если известно только полное сопротивление R_o , то принимается: $R_{odc} = 2R_o/3$, $R_{oac} = R_o/3$ [2];

- типовое значение максимального тока короткого замыкания I_{os} .

Указанные статические параметры ОУ, не измеряемые рассматриваемым АПК для измерения динамических параметров, могут быть найдены в технической литературе, на сайтах фирм-производителей микросхем либо определены с помощью других средств измерений, например с помощью АПК для измерения статических параметров ОУ [3].

2. В базу данных заносятся значения таких параметров макромоделей ОУ, которые не могут быть рассчитаны по заданным параметрам ОУ, а находятся из технической документации или из файлов текстовых описаний Spice-моделей ОУ данного типа. Значения этих параметров зависят от особенностей технологического процесса производства микросхем и поэтому различны у разных фирм-производителей. К числу таких параметров относится емкость внутренней частотной коррекции C_c , а также значения коэффициентов полинома, описывающего выходной ток нелинейного источника тока FB , управляемого током.

3. В базу данных заносятся минимально допустимые значения измеряемых частотных и временных параметров.

4. После выполнения измерений из аппаратной части АПК в программу обработки результатов передаются полученные значения частотных и временных параметров ОУ:

- максимальные скорости нарастания $v_{U_{\text{вых max } \phi}}$ и спада $v_{U_{\text{вых max } \text{сп}}}$ выходного напряжения ОУ; при передаче в программу составления макромоделей ОУ этим параметрам присваиваются употребляемые в Spice-совместимых программах схмотехнического моделирования наименования: SRp и SRm ;

- частота единичного усиления f_1 ; при составлении макромоделей ОУ этому параметру присваивается наименование f_{0dB} ;

- запас устойчивости по фазе на частоте единичного усиления ϕ_0 ; при составлении макромоделей ОУ этому параметру присваивается наименование Phi .

Принимается также измеренное значение напряжения смещения U_{os} , которое указывается в паспорте ОУ.

5. По результатам сравнения измеренных и минимально допустимых значений динамических параметров ОУ программой принимается решение о соответствии (или несоответствии) исследуемого экземпляра ОУ требованиям технических условий, а в случае соответствия – также о принадлежности данного ОУ к той или иной группе рассортировки по измеренным значениям частотных и временных параметров.

6. Программой создается файл паспорта ОУ со списком типовых (или измеренных другими средствами) статических параметров и измеренных рассматриваемым АПК частотных и временных параметров.

7. Список статических и динамических параметров ОУ передается в программу оперативного автоматизированного создания макромодели исследуемого экземпляра ОУ в соответствии с разработанной авторами методикой. Отличительной особенностью предлагаемой версии методики является то, что получены расчетные соотношения не только для ОУ с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде (как это было в предыдущих версиях методики [4–6]), но и для ОУ с биполярными транзисторами.

2. Методика расчета макромодели ОУ с учетом результатов измерений динамических параметров ОУ

Предлагаемая методика позволяет рассчитать параметры элементов макромодели ОУ, построенных по топологии Бойла [7] в уточненной редакции [8]. В предлагаемой методике используются соотношения, позволяющие выразить параметры элементов макромодели непосредственно через статические и динамические параметры ОУ, без многоступенчатых подстановок для определения параметров одних элементов макромодели через параметры других элементов. Ниже приведены расчетные соотношения для макромодели ОУ с биполярными транзисторами во входном дифференциальном каскаде. Топология макромодели ОУ с *n-p-n*-транзисторами показана на рис. 1:

1. Емкость $C1$, позволяющая воспроизвести двухполюсный характер амплитудно-частотной характеристики ОУ:

$$C1 = \frac{Cc}{2} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \cdot (90 - \text{Phi})}{180} \right), \quad (1)$$

где Phi – измеренное значение запаса устойчивости ОУ по фазе.

2. Емкость $C2$ внутренней частотной коррекции, $C2 = Cc$.

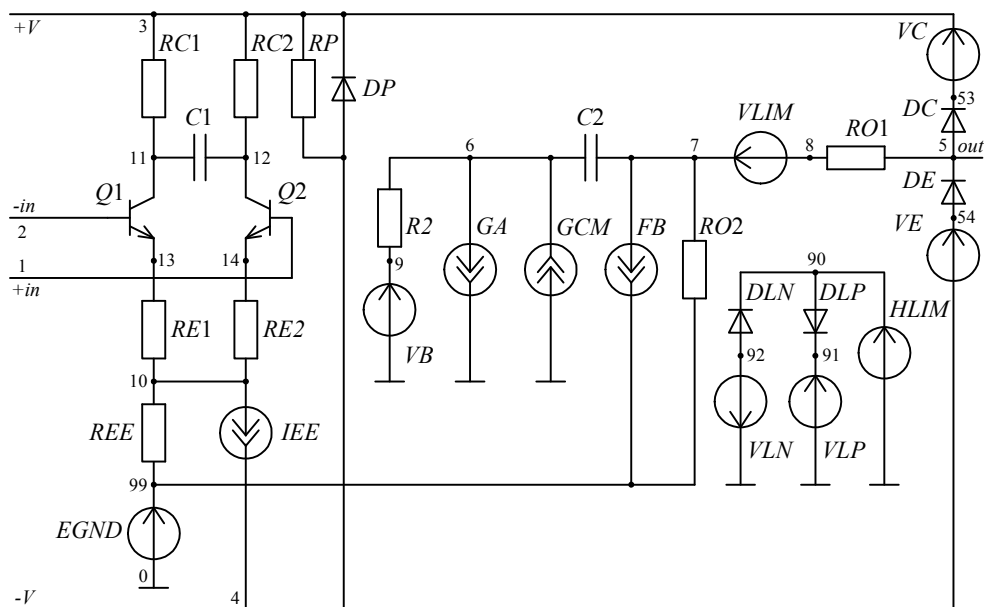


Рис. 1. Топология макромодели ОУ с биполярными *n-p-n*-транзисторами во входном дифференциальном каскаде

3. Диоды DC , DE , DLP , DLN и DP представляются моделью dx , имеющей параметры, принятые по умолчанию для полупроводникового диода в программе PSpice, с единственным отличием: значение тока насыщения при температуре 27°C принимается равным $I_s = 8 \cdot 10^{-16}$ А.

4. Выходное напряжение V_{EGND} нелинейного источника напряжения $EGND$, управляемого напряжением:

$$V_{EGND} = egnd1 \cdot V_{pwrp} + egnd2 \cdot V_{pwrm}, \quad (2)$$

где $egnd1$, $egnd2$ – коэффициенты передачи; $egnd1 = egnd2 = 0,5$; V_{pwrp} и V_{pwrm} – номинальные значения напряжений питания положительной и отрицательной полярности, взятые из базы исходных данных.

5. Выходной ток I_{FB} нелинейного источника тока FB , управляемого током:

$$I_{FB} = fb0 + fb1 \cdot I_{VB} - fb2 \cdot I_{VC} + fb3 \cdot I_{VE} + fb4 \cdot I_{VLP} - fb5 \cdot I_{VLN}, \quad (3)$$

где $fb0 = 0$; $fb1$, $fb2$, $fb3$, $fb4$, $fb5$ – коэффициенты полинома, имеющие физический смысл коэффициентов передачи источника тока, управляемого токами I_{VB} , I_{VC} , I_{VE} , I_{VLP} , I_{VLN} , протекающими через источники напряжений VB , VC , VE , VLP и VLN . Эти токи рассчитываются программой схемотехнического моделирования (Pspice, OrCAD, Multisim и т.п.) при использовании макромодели ОУ во время исследования электронных схем.

Значения коэффициентов $fb2$, $fb3$, $fb4$, $fb5$ берутся из базы исходных данных. Значение коэффициента $fb1$ рассчитывается по формуле

$$fb1 = \frac{Avdc}{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc \cdot (R_{odc} - R_{oac})}, \quad (4)$$

где $Avdc$ – типовое значение коэффициента усиления из базы данных; f_{0dB} – измеренное значение частоты единичного усиления ОУ; $R_2 = 100 \cdot 10^3$ Ом – сопротивление, одинаковое для моделей всех ОУ; R_{odc} и R_{oac} – взятые из базы исходных данных типовые значения выходных сопротивлений ОУ на низких и высоких частотах.

6. Выходной ток I_{GA} линейного источника тока GA , управляемого напряжением:

$$I_{GA} = ga \cdot (V(11) - V(12)), \quad (5)$$

где ga , 1/Ом, – коэффициент передачи источника тока GA , управляемого напряжением,

$$ga = 2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc; \quad (6)$$

$V(11)$, $V(12)$ – напряжения в узлах 11 и 12 макромодели, рассчитываемые программой во время моделирования.

7. Выходной ток I_{GCM} линейного источника тока GCM , управляемого напряжением

$$I_{GCM} = g_{cm} \cdot (V(10) - V(99)), \quad (7)$$

где g_{cm} , 1/Ом, – коэффициент передачи источника тока GCM , управляемого напряжением,

$$g_{cm} = \frac{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc}{CMRR}, \quad (8)$$

здесь $CMRR$ – типовое значение коэффициента ослабления синфазного сигнала; $V(10), V(99)$ – напряжения в узлах 10 и 99 макромодели, рассчитываемые программой во время моделирования.

8. Выходной ток I_{ee} независимого источника постоянного тока IEE :

$$I_{ee} = 2Ib + Cc \cdot SRp, \quad (9)$$

где Ib – типовое значение входного тока смещения ОУ из базы данных; SRp – измеренное значение максимальной скорости нарастания выходного напряжения ОУ.

Если измеренные значения скоростей нарастания SRp и спада SRm различны, то при создании макромоделей в рассматриваемой методике принимается условие равенства этих скоростей меньшей из них, т.е. за SRp принимается меньшее из значений скоростей. В случае необходимости адекватного воспроизведения асимметрии скоростей нарастания и спада выходного напряжения ОУ следует использовать модифицированную макромодель ОУ, предложенную в [9].

9. Выходное напряжение V_{HLIM} линейного источника напряжения $HLIM$, управляемого током:

$$V_{HLIM} = hlim \cdot I_{VLIM}, \quad (10)$$

где $hlim = 10^3$ Ом – коэффициент передачи, одинаковый для моделей всех ОУ; I_{VLIM} – ток, протекающий через источник напряжения $VLIM$ и рассчитываемый программой во время моделирования.

10. Транзисторы $Q1$ и $Q2$ представляются моделью qx , имеющей параметры, принятые по умолчанию для биполярного транзистора в программе PSpice, со следующими отличиями:

– значение тока насыщения при температуре 27 °С принимается равным $I_s = 8 \cdot 10^{-16}$ А ;

– коэффициент усиления тока Bf рассчитывается по формуле

$$Bf = \frac{Cc \cdot SRp}{2 Ib}. \quad (11)$$

11. Сопротивление $R2 = 100 \cdot 10^3$ Ом – одинаковое для всех моделей ОУ;

12. Сопротивления $Rc1, Rc2$ резисторов $RC1$ и $RC2$:

$$Rc1 = Rc2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{0dB} \cdot Cc}. \quad (12)$$

13. Сопротивления $Re1$, $Re2$ резисторов $RE1$ и $RE2$:

$$Re1 = Re2 = \frac{2Cc \cdot SRp \cdot Ib}{2Cc \cdot SRp \cdot Ib + 4Ib^2} \cdot \left(\frac{1}{2\pi f_{0dB} \cdot Cc} - \frac{2k \cdot T}{Cc \cdot SRp \cdot q} \right), \quad (13)$$

где $k = 1,38065 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; $q = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

14. Сопротивление $Re e$ резистора REE :

$$Re e = \frac{U_A}{2Ib + Cc \cdot SRp}. \quad (14)$$

где $U_A = 200$ В – напряжение Эрли.

15. Сопротивления $Ro1$, $Ro2$ резисторов $RO1$ и $RO2$:

$$Ro1 = Roac; Ro2 = Rodc - Roac. \quad (15)$$

16. Сопротивление Rp резистора RP :

$$Rp = \frac{(Vpwrp - Vpwrp)^2}{Pd - Vpwrp \cdot SRp \cdot Cc - Vpwrp \cdot (2Ib + Cc \cdot SRp)}, \quad (16)$$

где Pd – типовое значение потребляемой мощности, взятое из базы данных.

17. Выходные напряжения независимых источников постоянного напряжения VB и V_{LIM} равны нулю: $Vb = 0$, $V_{lim} = 0$.

Эти источники напряжения выступают в качестве «датчиков токов», протекающих через них. Токи I_{VB} и $I_{V_{LIM}}$, которые протекают через эти источники, выступают в качестве управляющих токов для управляемого источника тока FB и управляемого источника напряжения $HLIM$.

18. Выходные напряжения Vc, Ve независимых источников постоянного напряжения VC и VE :

$$Vc = Vpwrp - Voutp; Ve = -(Vpwrp - Voutm). \quad (17)$$

19. Выходные напряжения Vlp, Vln независимых источников постоянного напряжения VLP и VLN :

$$Vlp = Vln = Ios \cdot h \lim. \quad (18)$$

В качестве примера рассмотрим расчет макромодели ОУ $\mu A741$ [10].

Исходные данные, помещенные в базу данных:

$$Vpwrp = 15 \text{ В}; Vpwrp = -15 \text{ В}; Ib = 100 \cdot 10^{-9} \text{ А}; Voutp = 15 \text{ В};$$

$$Voutm = -15 \text{ В}; Pd = 0,05 \text{ Вт}; Avdc = 200 \cdot 10^3; CMRR = 100 \cdot 10^3;$$

$$Rodc = 75 \text{ Ом}; Roac = 50 \text{ Ом}; Ios = 20 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$Cc = 30 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}; fb2 = -40 \cdot 10^6; fb3 = 40 \cdot 10^6;$$

$$fb4 = 40 \cdot 10^6; fb5 = -40 \cdot 10^6; T = 300 \text{ К}.$$

Измеренные динамические параметры:

$$SRp = 0,5 \cdot 10^6 \text{ В/с}; f_{0dB} = 1 \cdot 10^6 \text{ Гц}; \text{Phi} = 60^\circ.$$

Параметры макромодели:

$$C1 = 8,66 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$C2 = 30 \cdot 10^{-12} \text{ Ф};$$

$$I_s = 8 \cdot 10^{-16} \text{ А};$$

$$egnd1 = egnd2 = 0,5;$$

$$fb0 = 0; fb1 = 42,44 \cdot 10^6; fb2 = -40 \cdot 10^6; fb3 = 40 \cdot 10^6;$$

$$fb4 = 40 \cdot 10^6; fb5 = -40 \cdot 10^6;$$

$$ga = 188,5 \cdot 10^{-6}, 1/\text{Ом};$$

$$gcm = 1,885 \cdot 10^{-9}, 1/\text{Ом};$$

$$iee = 15,2 \cdot 10^{-6}, \text{ А};$$

$$hlim = 10^3 \text{ Ом};$$

$$Bf = 75;$$

$$R2 = 100 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Rc1 = Rc2 = 5,305 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Re1 = Re2 = 1,834 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Ree = 13,16 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Ro1 = 50 \text{ Ом};$$

$$Ro2 = 25 \text{ Ом};$$

$$Rp = 18,0 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$Vb = 0;$$

$$Vc = 2 \text{ В};$$

$$Ve = 2 \text{ В};$$

$$Vlim = 0;$$

$$Vlp = Vln = 20 \text{ В}.$$

Параметры макромодели ОУ uA741, полученные в результате расчета по данной методике, отличаются от параметров макромодели, полученной с помощью программы Parts пакета PSpice, не более чем на 1 %. При этом использование предложенной методики позволяет автоматизировать создание макромодели. Для составления полного текстового описания макромодели ОУ по результатам расчета параметров ее элементов создан бланк-файл, где курсивом обозначены вставляемые программой исходные данные, измеренные параметры, а также параметры макромодели, рассчитанные в соответствии с предложенной методикой.

Бланк-файл «Spice-модель ОУ с биполярными транзисторами во входном каскаде»:


```
* Spice-модель ОУ name Экземпляр # Дата
*Исходные данные: Vpwrp =; Vpwrn =; Ib =; Voutp =; Voutn =; Pd =; Avdc =;
CMRR =; Rodc =; Roac =; Ios =; Cc =; fb2 =; fb3 =; fb4 =; fb5 =; T =
*Измеренные параметры: SRp =; f0dB =; Phi =
*
* connections: non-inverting input
*                | inverting input
*                | | positive power supply
*                | | | negative power supply
*                | | | | output
*                | | | | |
.subckt name # 1 2 3 4 5
*
c1 11 12 C1
c2 6 7 C2
dc 5 53 dx
de 54 5 dx
dlp 90 91 dx
dln 92 90 dx
dp 4 3 dx
egnd 99 0 poly(2) (3,0) (4,0) 0 egnd1 egnd2
fb 7 99 poly(5) vb vc ve vlp vln fb0 fb1 fb2 fb3 fb4 fb5
ga 6 0 11 12 ga
gcm 0 6 10 99 gcm
iee 10 4 dc iee
hlim 90 0 vlim hlim=1K
q1 11 2 13 qx
q2 12 1 14 qx
r2 6 9 R2=100K
rc1 3 11 Rc1
rc2 3 12 Rc2
re1 13 10 Re1
re2 14 10 Re2
ree 10 99 Ree
ro1 8 5 Ro1
ro2 7 99 Ro2
rp 3 4 Rp
vb 9 0 dc 0
vc 3 53 dc Vc
ve 54 4 dc Ve
vlim 7 8 dc 0
vlp 91 0 dc Vlp
vln 0 92 dc Vln
.model dx D(Is=8.00E-16)
.model qx NPN(Is=8.00E-16 Bf)
.ends
```

Полученное текстовое описание макромодели ОУ с биполярными транзисторами во входном дифференциальном каскаде может использоваться для моделирования электронных схем с применением любых Spice-совместимых программ схемотехнического моделирования. Данная методика применима

также для ОУ с *p-n-p*-транзисторами во входном дифференциальном каскаде; отличается только топология макромоделей. Аналогичным образом составлена методика для ОУ с полевыми транзисторами во входном дифференциальном каскаде.

Заключение

Разработана методика автоматизированной обработки результатов измерений частотных и временных параметров ОУ, все процедуры которой выполняются в программной среде LabVIEW National Instruments. Для этого разработаны необходимые программы и виртуальные приборы [11]. Тестирование разработанной программной реализации предложенной методики показало ее работоспособность и эффективность.

Список литературы

1. Измерители динамических параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 100–102.
2. OrCAD PSPICE A/D. User's Guide. Reference Manual. OrCAD, Inc., 1998. – URL: <http://users.ntua.gr/manias/PSPICE-4.pdf>.
3. Сапунов, Е. В. Автоматизированное измерение статических параметров операционных усилителей / Е. В. Сапунов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения – 2014». – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 126, 127.
4. Методика обработки результатов измерений параметров операционного усилителя / А. В. Светлов, С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров, М. Ю. Паршуков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 128–140.
5. Сапунов, Е. В. Обработка результатов измерений параметров операционных усилителей / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments NIDays-2014 : сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 19-20 ноября 2014 г. – М. : ДМК Пресс, 2014. – С. 369–371.
6. Sapunov, E. V. Processing the results of measurements of operational amplifier parameters / E. V. Sapunov, A. V. Svetlov // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. – Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
7. Boyle, G. Macromodeling of integrated circuit operational amplifiers / G. Boyle, B. Cohn, D. Pederson, J. Solomon // IEEE journal of solid state circuits. – 1974. – Vol. SC-9. – № 6. – P. 353–364.
8. Mark, A. SPICE-Compatible Op Amp Macro-Models / Alexander Mark, Derek F. Bowers // Application Note AN-138, Analog Devices. – 1990, February. – P. 155–170.
9. Андреев, А. Н. Макромодель операционного усилителя для моделирования измерительных цепей с импульсными сигналами / А. Н. Андреев, В. А. Казаков, А. В. Светлов // Измерительная техника. – 1999. – № 9. – С. 26–29.
10. μ A741 General-Purpose Operational Amplifiers. – Texas Instruments, Inc., 2015. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>.
11. Программа расчета и составления макромоделей операционного усилителя в среде графического программирования LabVIEW / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2012 : сб. тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ДМК Пресс, 2012. – С. 447–449.

References

1. Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Sapunov E. V., Komarov V. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International symposium "Reliability and Quality"]. 2014, vol. 2, pp. 100–102.
2. *OrCAD PSPICE A/D. User's Guide. Reference Manual. OrCAD, Inc., 1998.* Available at: <http://users.ntua.gr/manias/PSPICE-4.pdf>.
3. Sapunov E. V. *Metody, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Shlyandinskie chteniya – 2014»* [Methods, means and technologies of measurement data acquisition and processing: proceedings of the International scientific and technical conference "Shlyandinskie readings 2014"]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, pp. 126, 127.
4. Svetlov A. V., Baydarov S. Yu., Komarov V. V., Parshukov M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 4, pp. 128–140.
5. Sapunov E. V., Svetlov A. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments NIDays-2014: sb. tr. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 19-20 noyabrya 2014 g.* [Engineering and scientific applications of National Instruments NIDays-2014: proceedings of XIII International scientific and practical conference, Moscow, 19-20 November 2014]. Moscow: DMK Press, 2014, pp. 369–371.
6. Sapunov E. V., Svetlov A. V. *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings. – Omsk State Technical University Omsk; Russian Federation.* DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147326.
7. Boyle G., Cohn B., Pederson D., Solomon J. *IEEE journal of solid state circuits.* 1974, vol. SC-9, no. 6, pp. 353–364.
8. Mark A., Bowers Derek F. *Application Note AN-138, Analog Devices.* 1990, February, pp. 155–170.
9. Andreev A. N., Kazakov V. A., Svetlov A. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment]. 1999, no. 9, pp. 26–29.
10. *µA741 General-Purpose Operational Amplifiers.* Texas Instruments, Inc., 2015. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf>.
11. Sapunov E. V., Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Komarov V. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments – 2012: sb. tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Engineering and scientific applications of National Instruments technologies-2012: proceedings of XI International scientific and practical conference]. Moscow: DMK Press, 2012, pp. 447–449.

Паршуков Максим Юрьевич

инженер, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu

Parshukov Maksim Yur'evich

Engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунев Евгений Владимирович

инженер, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu

Sapunov Evgeniy Vladimirovich

Engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлов Анатолий Вильевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и радиоэлектронных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu

Svetlov Anatoliy Vil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio engineering
and radio electronic systems, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Паршуков, М. Ю.

Обработка результатов измерений частотных и временных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 2 (38). – С. 112–123. DOI 10.21685/2072-3059-2016-2-10