

УДК 621.375

С.В. Крюков, И.В. Пахомов, С.С. Белич**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ
С ПАРАФАЗНЫМ ВЫХОДОМ ПРИ АСИММЕТРИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ПЕРЕДАЧИ ЦЕПЕЙ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ***

Рассматриваются параметры операционных усилителей (ОУ) с парафазным выходом при конечных значениях петлевых усиления и асимметрии коэффициентов передачи по цепям двухканальной отрицательной обратной связи. Приведена обобщенная функциональная схема ОУ с парафазным выходом. Получены аналитические выражения для основных параметров ОУ, описывающие их свойства в широком диапазоне петлевых усиления и соотношений резисторов обратной связи. Показано, что неидентичность петлевых усиления оказывает существенное влияние на передачу входного сигнала на выходы ОУ. Приведены формулы, позволяющие рассчитать коэффициент усиления по напряжению K_u операционного усилителя с двумя цепями отрицательной обратной связи при асимметрии петлевых усиления. Показано, что формулы пригодны для вычисления K_u на высоких частотах при замене значений петлевых усиления комплексными коэффициентами передачи.

Операционный усилитель; парафазный выход; коэффициент усиления.

S.V. Kryukov, I.V. Pahomov, S.S. Belich**BASIC PARAMETERS OF OPERATIONAL AMPLIFIERS
WITH PARAPHRASE OUTPUT AT ASYMMETRY TRANSFER
COEFFICIENT OF CIRCUITS OF NEGATIVE FEEDBACK**

Parameters of operational amplifiers (OA) with paraphrase output at finite value loop gain and asymmetry of transfer ratio on chain dual-link negative feedback are considered. The generalized functional diagram of operational amplifier with paraphrase output are shown. The analytical expressions for the main parameters of the OA, which describe their properties in a wide range of loop gain and feedback resistors are given. Non-identity of the loop gain has a significant impact on the transfer ratio of the input signal to the output of OA are shown. The formulas allowing to calculate the voltage gain K_u of the operational amplifier with two chains of negative feedback at loop gain asymmetry are given. The formula can be used to calculate the K_u at high frequency range by replacing the values of loop gains to complex transfer ratio are shown.

Fully differential operational amplifier; paraphrase output; gain.

Операционный усилитель с парафазным выходом (ОУП) относится к числу относительно новых и недостаточно изученных активных элементов, имеющих большие перспективы использования в устройствах автоматики и вычислительной техники (РС-фильтрах, драйверах дифференциальных линий связи, фазорасщепителях и т.п.). Применение дифференциального выхода в усилительных каскадах позволяет снизить влияние синфазных помех, уменьшить уровень второй гармоники в спектре выходного сигнала, в два раза увеличить максимальную амплитуду выходного напряжения, снизить эффект «пролезания» цифровых сигналов через подложку в аналого-цифровых микросхемах СВЧ-диапазона. Кроме этого, микросхемы с парафазным выходом обладают большей стойкостью к радиации.

Исследованиям данного функционального узла, который оказывается значительно сложнее по взаимосвязи параметров в сравнении с традиционными операционными усилителями, посвящены работы [1–4]. Однако в данных публикациях

* Статья подготовлена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ на НИР № 8.3383.2011 (ЮРГУЭС-02.12.ГЗ) «Теоретические основы проектирования нового поколения СФ-блоков систем связи, телекоммуникаций и технической диагностики на основе радиационно-стойких технологий (SiGe, АБМК_1_3/4 и др.)», выполняемой в 2012–2014 гг.

не учитываются конечные значения петлевых усилений (T_1 , T_2) по цепям обратной связи, а также их неидентичность и частотная зависимость. В настоящей статье рассматриваются параметры ОУ при произвольных значениях усиления по цепям обратной связи и их асимметрии.

Обобщенная функциональная схема ОУ с парафазным выходом рис. 1 включает дифференциальный преобразователь S_{1-2} напряжения, токовые выходы которого соединены с буферными каскадами БУ1 и БУ2, осуществляющими преобразование токов $i_{\Sigma 1}$, $i_{\Sigma 2}$ в соответствующие выходные противофазные напряжения ОУП ($u_{\text{ВЫХ.1}}$, $u_{\text{ВЫХ.2}}$). На резисторах R1, R2 и R3, R4 реализуются четырехполюсники отрицательных обратных связей. На входы Вх.1 и Вх.2 подаются напряжения от источников сигналов.

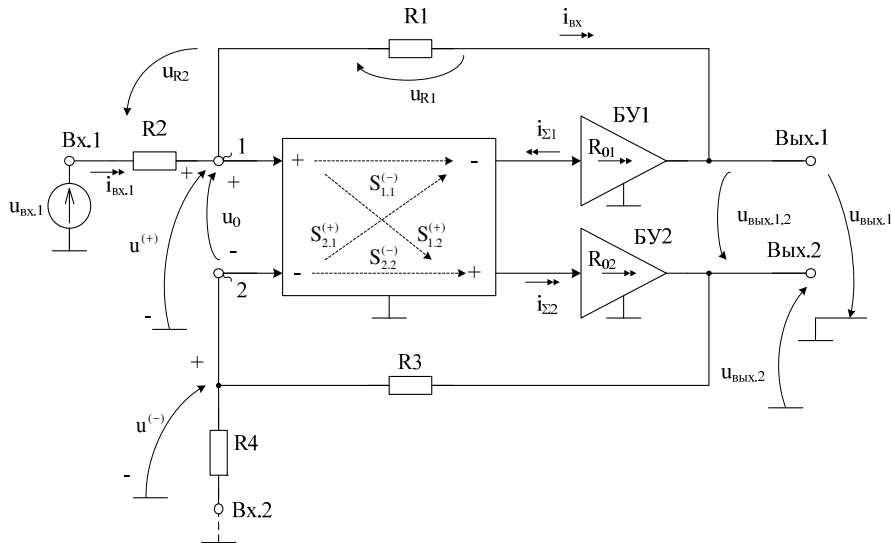


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема ОУ с парафазным выходом

Определим основные параметры ОУ рис. 1 – коэффициенты передачи по напряжению со входа (Вх.1) на потенциальные выходы Вых.1, Вых.2 с учетом конечных значений петлевых усилений:

$$K_{y1} = \frac{u_{\text{ВЫХ.1}}}{u_{\text{ВХ.1}}}, \quad (1)$$

$$K_{y2} = \frac{u_{\text{ВЫХ.2}}}{u_{\text{ВХ.2}}}. \quad (2)$$

Для входного тока $i_{\text{ВХ.1}}$ можно записать уравнение

$$i_{\text{ВХ.1}} = (1 + K_{y1}) \frac{u_{\text{ВХ.1}}}{R_1 + R_2}. \quad (3)$$

Напряжение на первом выходе ОУ

$$u_{\text{ВЫХ.1}} = u_0 [S_{1,1} + S_{2,1}] R_{01}, \quad (4)$$

где $S_{1,1}$, $S_{2,1}$ – параметры крутизны преобразования напряжения ошибки u_0 в соответствующий выходной ток $i_{\Sigma 1}$ каскада S_{1-2} ; R_{01} – сопротивление передачи (преобразования) тока $i_{\Sigma 1}$ в выходное напряжение $u_{\text{ВЫХ.1}}$; $u_0 = u^{(+)} - u^{(-)}$ – напряжение ошибки u_0 , причем

$$u_0 = u_{\text{вх}} \frac{1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} (1 + K_{y1})}{1 + \frac{R_4}{R_4 + R_3} (S_{2.2} + S_{1.2}) R_{02}}, \quad (5)$$

где $S_{2.2}$, $S_{1.2}$ – параметры крутизны преобразования u_0 в выходной ток $i_{\Sigma 2}$ каскада S_{1-2} .

После преобразований из (1)–(5) можно получить, что передача входного сигнала $u_{\text{вх.1}}$ на выход Вых.1

$$K_{y1} = \frac{R_1 / R_2}{1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1}{T_1} + \frac{T_2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{T_1 \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)}, \quad (6)$$

где

$$T_1 = [S_{1.1} + S_{2.1}] R_{01},$$

$$T_2 = [S_{2.2} + S_{1.2}] R_{02}.$$

Параметры T_1 и T_2 характеризуют эквивалентное усиление по напряжению каскадов S_{1-2} и БУ1, БУ2 и могут принимать большие значения ($T_1 \gg 1$, $T_2 \gg 1$).

Из уравнения (6) следует, что неидентичность усилений $T_1 \neq T_2$ оказывает существенное влияние на передачу входного сигнала на первый выход ОУ. Если положить, что $T_1 = T_2 \rightarrow \infty$, то из (6) можно получить

$$K_{y1} = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_4}{R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_4 + R_3}}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет рассчитать K_{y1} операционного усилителя с двумя цепями отрицательной обратной связи (рис. 1). В частном случае, при $R_2 = R_4$, $R_1 + R_2 = R_4 + R_3$, из (7) находим

$$K_{y1} = 0,5 \frac{R_1}{R_2}. \quad (8)$$

Однако асимметрия усилений $T_1 \neq T_2$ (даже при их достаточно больших величинах) существенно сказывается на численных значениях K_{y1} :

$$K_{y1} \Big|_{\substack{T_2 \gg 1 \\ T_1 \gg 1 \\ T_2 \neq T_1}} \approx \frac{\frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)}{\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)}}. \quad (9)$$

Аналогично можно определить коэффициент передачи входного напряжения $u_{\text{вх.1}}$ ко второму выходу Вых.2 операционного усилителя рис. 1:

$$K_{y2} = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{T_1}{T_2} + \frac{1}{T_2} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) + \frac{R_3}{R_4}} \quad (10)$$

Данный параметр ОУ рис. 1 также существенно зависит от асимметрии усилений $T_1 \neq T_2$ и их численных значений. Так, при $T_2 \gg 1$, $T_1 = T_2$

$$K_{y2} = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_3}{R_4}} \quad (11)$$

Если $R_2 = R_1 = R_3 = R_4$, то $K_{y2} = 0,5$.

На высоких частотах в формулах (6) и (10) необходимо считать T_1 и T_2 комплексными коэффициентами передачи, например, аппроксимируемыми функциями первого порядка

$$\dot{T}_1 = \frac{T_1}{1 + j\omega\tau_1}, \quad (12)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{T_2}{1 + j\omega\tau_2}, \quad (13)$$

где τ_1, τ_2 – постоянные времени соответствующих каналов усиления $S_{1,2}$, БУ1, БУ2.

Полученные аналитические выражения для основных параметров ОУ с парафазным выходом описывают их свойства в широком диапазоне петлевых усилений и сопротивлений резисторов обратной связи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопенко Н.Н., Манжула В.Г., Белич С.С. Схемотехника операционных усилителей и активных RC-фильтров с парафазным выходом – Circuitry of the operational amplifier and active RC filters with output paraphrase: монография. – Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2012. – 135 с.
2. Кэрки Д. Анализ схем на полностью дифференциальных усилителях: Пер. Д. Иоффе // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 70-73.
3. High Speed Differential ADC Driver Design Considerations by John Ardizzoni and Jonathan Pearson / http://www.analog.com/static/imported-files/google_landing/AN-1026-S.pdf.
4. Гуменюк А.С., Бочаров Ю.И. Проектирование дифференциальных КМОП усилителей для АЦП. // http://www.ipmce.ru/about/press/articles/proekt_diffkmp/.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчинский.

Крюков Сергей Владимирович – Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов Центра исследования проблем безопасности РАН и ЮРГУЭС; e-mail: vvks@list.ru; 346500, г. Шахты, Шевченко, 147; тел.: +79852337060; научный сотрудник.

Пахомов Илья Викторович – e-mail: pahom2191@mail.ru; тел: +79094134744; инженер-исследователь.

Белич Сергей Сергеевич – e-mail: whitess@list.ru; тел: +79064165525; инженер-исследователь.

Kryukov Sergey Vladimirovich – Laboratory of perspective technologies and processes of the Center of researches of problems of safety of Russian Academy of Science and SRSUES; e-mail: vvks@list.ru; 147, Shevchenko, Shakhty, 346500, Russia; phone: +79852337060; scientist.

Pahomov Ilya Viktorovich – e-mail: pahom2191@mail.ru; phone: +79094134744; research engineer.

Belich Sergey Sergeevich – e-mail: whitess@list.ru; phone: +79185056136; research engineer.

УДК 681.58: 621.372

А.Е. Титов, И.О. Шаповалов

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕЦИЗИОННЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ В ЗАДАЧАХ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Рассматриваются вопросы организации прецизионных аналоговых интерфейсов в экстремальной робототехнике. Данные интерфейсы применяются в системах группового управления роботами для обеспечения высокой точности преобразования и передачи данных от чувствительных элементов. Применение новых решений для организации интерфейсов между роботами и сенсорами обуславливается их функционированием при воздействии дестабилизирующих факторов. Приводятся математическое описание системы группового управления роботами, ее структурная схема, укрупненная схема формирования управляющих воздействий, структурные схемы СФ-блоков аналогового интерфейса и результаты их моделирования в среде PSpice.

Группа роботов; распределенная система; управление движением; аналоговый интерфейс; инструментальный усилитель; ограничитель спектра; сенсор.

A.E. Titov, I.O. Shapovalov

USING OF HIGH-PRECISION ANALOG INTERFACE IN EXTREME ROBOTIC TASKS

Aspects of high-precision analog interface organization in extreme robotics are considered in the paper. Such interfaces are used in group robot control systems for providing of high-precision sensor data conversion and transmitting. New solution application for organization of interfaces between robots and sensors is conditioned by functioning under impact of destabilizing factors. Mathematical description, structural scheme of group robot control system, simplified control action generation scheme, structural schemes of analog interface IP-blocks and modeling results in PSpice are given.

Robot group; distributed system; motion control; analog interface; instrumentation amplifier; spectrum limiter; sensor.

Введение. Эра робототехники началась во второй половине XX-го века, и с тех пор области применения роботов с каждым годом все более расширяются. Традиционно роботы применяются для выполнения различных производственных операций, что является предметом изучения промышленной робототехники, и для функционирования в экстремальных средах, в которых работа людей затруднена или невозможна. Промышленная робототехника к настоящему моменту решила практически все поставленные перед ней задачи. В экстремальной же робототехнике в настоящее время имеется множество нерешенных проблем. Это связано, в первую очередь, с тем, что экстремальные среды в большинстве случаев неформализованы и характеризуются большим количеством неопределенностей. Задача синтеза алгоритмов управления для роботов, работающих в экстремальных средах, таким образом, обладает большой степенью сложности.