

Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов

МОНИТОРИНГ ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ

D. V. Artamonov, A. V. Knyazkov, M. Yu. Parshukov, E. V. Sapunov, A. V. Svetlov

MONITORING OF FREQUENCY PARAMETERS OF OPERATIONAL AMPLIFIERS WHEN OPERATING IN NON-STATIONARY THERMAL MODES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Обоснована необходимость мониторинга частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах с целью прогнозирования времени установления рабочего режима операционных усилителей после включения питания и с целью создания их макромоделей для различных температур в пределах рабочего температурного диапазона. **Материалы и методы.** Исследование выполнено с применением разработанного измерителя частотных параметров операционных усилителей и стенда для определения градуировочных характеристик преобразователя отношения амплитуд и разности фаз сигналов. **Результаты.** Приведены структурная схема измерителя частотных параметров операционных усилителей, методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей, методика прогнозирования времени установления рабочего режима операционных усилителей после включения питания. **Выводы.** Подтверждена возможность применения разработанного измерителя частоты единичного усиления операционных усилителей для мониторинга их параметров при работе в нестационарных тепловых режимах.

A b s t r a c t. Background. The necessity of monitoring the frequency parameters of operational amplifiers when operating in non-stationary thermal modes is substantiated with the aim of predicting the time of setting the operation mode of operational amplifiers after power-up and with the purpose of creating their macromodels for different temperatures within the operating temperature range. **Materials and methods.** The research was carried out using the developed meter of frequency parameters of operational amplifiers and a system for determining the calibration characteristics of the converter of the ratio of the amplitudes and phase difference of the signals. **Results.** The structural diagrams of the meter of the frequency parameters of operational amplifiers, the technique of measuring the unity gain bandwidth of operational amplifiers, the method of predicting the settling time of operational amplifiers after power-up are given. **Conclusions.** The possibility of using the developed frequency meter of the unity gain bandwidth of operational amplifiers for monitoring their parameters when operating in non-stationary thermal modes has been confirmed.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотные параметры операционных усилителей, нестационарный тепловой режим, мониторинг, измеритель, методика.

К e y w o r d s: frequency parameters of operational amplifiers, non-stationary thermal mode, monitoring, measuring instrument, technique.

Введение

При проектировании изделий электронной техники и подборе электронных компонентов для их производства необходимо учитывать изменение параметров компонентов при работе в нестационарных тепловых режимах.

Во-первых, изменение теплового режима происходит в процессе саморазогрева электронных компонентов после подачи питающих напряжений. Обоснованный выбор компонентов для схем с малым временем установления рабочего режима (схем быстрой готовности) возможен при наличии объективной информации о времени, необходимом для установления рабочего температурного режима компонента, соответствующего его долгосрочной работе.

Во-вторых, необходимо учитывать изменение параметров компонентов при работе в широком температурном диапазоне. Для учета изменения температуры окружающей среды при моделировании работы электронных схем с использованием программ схемотехнического моделирования (PSpice, OrCAD, Multisim и др.) необходимо иметь набор моделей диодов, транзисторов, пассивных компонентов, а также макромоделей интегральных операционных усилителей (ОУ), составленных для различных температур в пределах всего температурного диапазона. Это, в свою очередь, предполагает измерение параметров компонентов, помещенных в камеру тепла и холода, причем общая продолжительность таких измерений определяется суммой продолжительностей процессов установления рабочего температурного режима компонента в каждой точке температурного диапазона. Средства измерений параметров компонентов при их климатических испытаниях должны при каждой температуре фиксировать факт установления показаний в пределах погрешности, задаваемой пользователем, регистрировать установившееся показание и после этого давать разрешение на установку нового значения температуры.

В данной статье в качестве примера рассматривается мониторинг частотных параметров ОУ в процессе их саморазогрева после включения питания.

Измеритель частотных параметров ОУ

Важнейшим частотным параметром ОУ является частота единичного усиления – параметр, который в обязательном порядке приводится в паспортах на интегральные микросхемы ОУ. Кроме частоты единичного усиления, важно контролировать запас устойчивости ОУ по фазе на этой частоте, что позволяет прогнозировать склонность электронных схем на ОУ к самовозбуждению. Для мониторинга частотных параметров ОУ при работе в нестационарных тепловых режимах необходимо разработать средства измерений частоты единичного усиления ОУ, обладающие повышенной разрешающей способностью и в то же время имеющие быстроедействие, достаточное для отслеживания изменения измеряемого параметра при изменении температуры.

Этим требованиям отвечает разработанный авторами измеритель частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе [1], структурная схема которого приведена на рис. 1. С целью повышения быстродействия осуществляется одновременное преобразование отношения амплитуд и разности фаз выходного и входного напряжений ОУ в постоянные напряжения с помощью двух широкополосных демодулирующих логарифмических усилителей, вычитающего устройства и фазового детектора перемножающего типа. Эти функции выполняются интегральной микросхемой AD8302 производства компании Analog Devices, Inc. [2].

Исследуемый ОУ включается в измерительную схему (ИС) с варьлируемыми коэффициентом усиления и конфигурацией (инвертирующий или неинвертирующий усилитель). Тестовые синусоидальные сигналы с варьлируемой частотой формируются программно управляемым DDS-генератором сигналов AD9850 [3]. Выходное и входное напряжения ОУ подаются на входы А и Б преобразователя отношения амплитуд и разности фаз в постоянные напряжения U_a , линейно зависящее от логарифма отношения амплитуд сигналов на выходе и входе ОУ, и U_ϕ , линейно зависящее от разности фаз этих сигналов.



Рис. 1. Структурная схема измерителя частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе

Напряжения U_a и U_ϕ оцифровываются с помощью аналого-цифровых преобразователей АЦП1 и АЦП2 типа MCP3424 [4] с программной установкой разрешения (12, 14, 16 и 18 разрядов) и передаются на персональный компьютер ПК. Отношение амплитуд K_a в децибелах и фактическая разность фаз ϕ в градусах вычисляются по измеренным выходным напряжениям U_a и U_ϕ в милливольтках с использованием предварительно полученных градуировочных характеристик преобразователя AD8302. В частности, для экземпляра AD8302, использованного при макетировании измерителя, с помощью специально построенного стенда получены следующие градуировочные характеристики:

$$K_a(U_a) = \frac{U_a - 934,036}{31,405}; \quad (1)$$

$$\phi(U_\phi) = \frac{1915,8 - U_\phi}{10,969}. \quad (2)$$

Программное обеспечение измерителя составлено в среде программирования National Instruments LabVIEW [5]. Для управления аппаратной частью используются контроллер последовательной передачи данных и дешифратор команд.

Предложены методика измерения частоты единичного усиления ОУ с повышенным разрешением и алгоритм функционирования описанного измерителя [6]. В процессе поиска частоты единичного усиления ОУ при итерационном сужении диапазона поиска до получения заданного разрешения по частоте измеряются текущие значения напряжения U_a на выходе детектора AD8302 и оцениваются полученные с помощью градуировочной характеристики значения коэффициента усиления ОУ K_a – отношения амплитуд выходного и входного напряжений ОУ в децибелах. Предложено в качестве критерия остановки процесса поиска использовать уменьшение полученного значения коэффициента усиления ОУ до $|K_a| < 0,02$ дБ.

Для повышения точности частота единичного усиления ОУ f_1 находится не как среднее значение между нижней и верхней частотами диапазона поиска, а вычисляется по интерполяционной формуле

$$f_1 = f_n + \frac{K_{a,n}(f_v - f_n)}{K_{a,v} - K_{a,n}}, \quad (3)$$

где f_1 [Гц] – полученная путем интерполяции частота, принимаемая за частоту единичного усиления ОУ; f_n и f_v [Гц] – нижняя и верхняя частоты диапазона поиска частоты единичного усиления; $K_{a,n}$ и $K_{a,v}$ [дБ] – коэффициенты усиления ОУ на частотах f_n и f_v .

Исследования на примерах ОУ общего применения TL072, NJM4580, 544УД2 показали, что процесс поиска частоты единичного усиления ОУ в среднем осуществляется за 15–17 шагов итерации и занимает 1–1,5 с (без учета затрат времени на установку микросхемы в контактирующее устройство, включение питания и инициализацию оборудования). Тем самым показано, что разработанный измеритель частоты единичного усиления и запаса устойчивости ОУ по фазе обладает быстродействием, вполне достаточным для мониторинга в условиях нестационарных тепловых режимов.

Методика прогнозирования времени установления рабочего режима ОУ после включения питания

После подачи питающих напряжений в процессе саморазогрева ОУ происходит изменение их параметров, причем наибольшее влияние на характеристики электронных схем оказывает изменение частоты единичного усиления ОУ. Для прогнозирования времени, необходимого для установления рабочего температурного режима ОУ, соответствующего долгосрочной работе, предложена методика, предусматривающая следующие этапы.

1. С использованием разработанного авторами быстродействующего измерителя осуществляется мониторинг частоты единичного усиления исследуемых экземпляров ОУ в течение 30 мин от момента включения с интервалом времени 1 мин. Измерения проводятся в нормальных климатических условиях, а при необходимости – при температурах окружающей среды, задаваемых при исследованиях с помощью камеры тепла и холода.

2. Строятся графики полученных зависимостей от времени измеренных значений частоты f_1 единичного усиления ОУ. Определяется установившееся значение $f_{1\text{уст.}}$, соответствующее температурному режиму долгосрочной работы исследуемого ОУ.

В качестве примеров на рис. 2 и 3 приведены такие графики для ОУ TL072 [7] и 544УД2Б [8]. Установившиеся значения частоты $f_{1\text{уст.}}$ соответственно равны 3,553 и 9,534 МГц.

3. Определяются относительные погрешности:

$$\delta f_1 = \frac{f_1 - f_{1\text{уст.}}}{f_{1\text{уст.}}} \cdot 100\% . \quad (4)$$

4. Строятся графики зависимостей относительных погрешностей δf_1 от времени в пределах погрешности, задаваемой пользователем (пример – на рис. 4). По полученным графикам можно определить время, необходимое для установления рабочего температурного режима ОУ, исходя из допускаемой дополнительной температурной погрешности для данного применения ОУ.

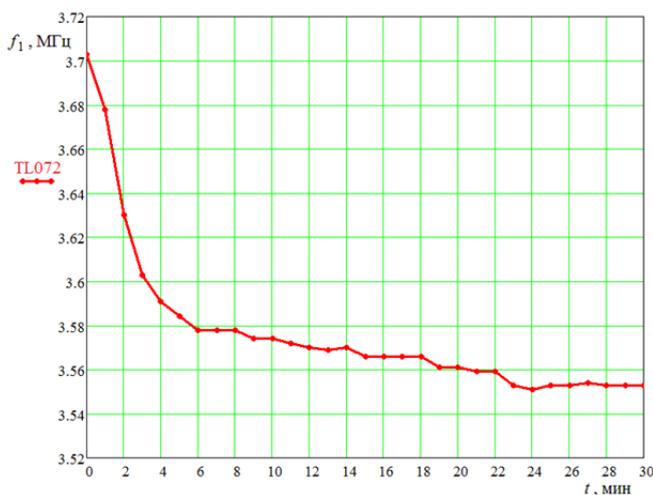


Рис. 2. График зависимости измеренных значений частоты единичного усиления ОУ TL072 от времени

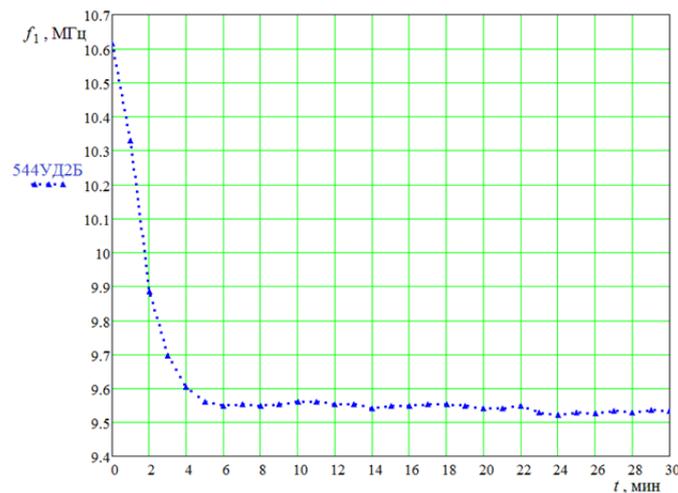


Рис. 3. График зависимости измеренных значений частоты единичного усиления ОУ 544УД2Б от времени

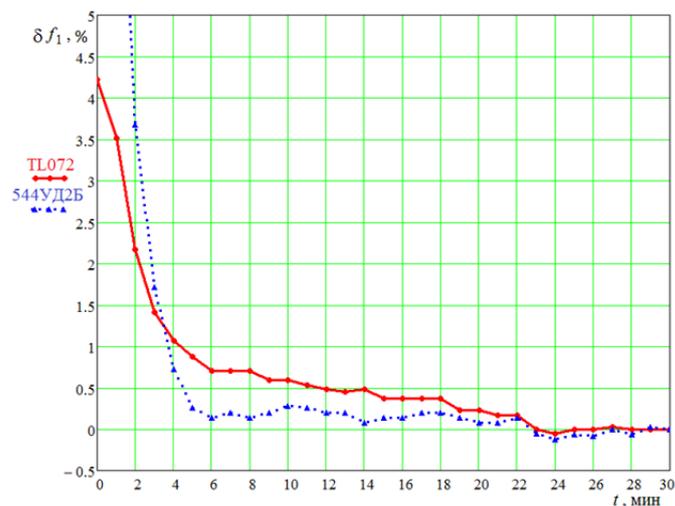


Рис. 4. Графики зависимостей относительной погрешности измерения частоты единичного усиления ОУ TL072 и 544УД2Б от времени

Из графика рис. 4 следует, что:

- минимальный прогрев в течение 2 мин сопровождается дополнительной погрешностью измерения около 2 % для ОУ TL072 и около 4 % для ОУ 544УД2Б; следовательно, при построении схем с быстрым установлением рабочего режима предпочтение следует отдать ОУ TL072;

- прогрев в течение 4–5 мин сопровождается приемлемой для большинства применений дополнительной погрешностью измерения около 1 %;

- прогрев в течение 20 мин позволяет проводить высокоточное измерение частоты единичного усиления ОУ при дополнительной погрешности 0,25 %.

Предложенная методика прогнозирования времени установления рабочего температурного режима ОУ после включения питания на основе мониторинга изменения частоты единичного усиления в процессе саморазогрева ОУ позволяет обоснованно выбирать ОУ для схем с малым временем установления рабочего режима (схем быстрой готовности).

Практическая реализация этой методики стала возможной благодаря высокому быстродействию разработанного измерителя частоты единичного усиления ОУ. При «ручной» перестройке генератора и осциллографическом измерении выходного напряжения ОУ в соответствии с рекомендациями ГОСТ [9] поминутный мониторинг реализовать было невозможно, поскольку на получение одного отсчета требовалось 3–5 мин.

Заключение

Подтверждена возможность применения разработанного измерителя частоты единичного усиления операционных усилителей для мониторинга их параметров при работе в нестационарных тепловых режимах.

Библиографический список

1. Измерение отношения амплитуд и разности фаз напряжений при определении частотных параметров операционных усилителей / А. С. Ишков, А. В. Князьков, Н. В. Родионова, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4 (40). – С. 83–93.
2. AD8302. LF–2.7 GHz RF/IF Gain and Phase Detector. – Analog Devices, Inc., 2002. – URL: <http://www.analog.com/media/cn/technicaldocumentation/-data-sheets/AD8302.pdf>.
3. AD9850 CMOS 125 MHz Complete DDS Synthesizer. – Analog Devices, Inc., 2004. – URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9850.pdf>.
4. MCP3422/3/4. 18-Bit, Multi-Channel $\Delta\Sigma$ Analog-to-Digital Converter with I²C™ Interface and On-Board Reference. – Microchip Technology Inc., 2009. – URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf>.
5. Тревис, Дж. LabVIEW для всех / Дж. Тревис, Дж. Кринг. – М. : ДМК Пресс, 2015. – 904 с.
6. Сапунов, Е. В. Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей с повышенным разрешением / Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016» (г. Пенза, 25–27 октября 2016 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 95–99.
7. TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers. – Texas Instruments, Inc., 2015. – URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl072.pdf>.
8. 544УД2А, 544УД2Б. Широкополосный быстродействующий операционный усилитель с полевыми транзисторами на входе. – ФГУП «НПП «Восток», 2012. – URL: <http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/544UD2.pdf>.
9. ГОСТ 23089.13-86. Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей.

Артамонов Дмитрий Владимирович

доктор технических наук,
первый проректор,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Artamonov Dmitry Vladimirovich

doctor of technical sciences,
first vice-rector,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Князьков Александр Владимирович

инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Knyazkov Aleksandr Vladimirovich

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

Паршуков Максим Юрьевич

кандидат технических наук, инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

Parshukov Maksim Yur'evich

candidate of technical sciences, engineer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

инженер,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rtech@pnzgu.ru

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.ru

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

Мониторинг частотных параметров операционных усилителей при работе в нестационарных тепловых режимах/ Д. В. Артамонов, А. В. Князьков, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, А. В. Светлов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 37–43. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-5.