

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЕДИНИЧНОГО УСИЛЕНИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена актуальная задача разработки методики автоматизированного измерения частоты единичного усиления операционных усилителей, использование которой будет способствовать организации массового входного контроля микросхем на предприятиях приборостроения.

Результаты. Предложена методика автоматизированного измерения частоты единичного усиления операционных усилителей, отличающаяся тем, что частота тестового сигнала, подаваемого на исследуемый операционный усилитель для оценки его коэффициента усиления, изменяется не плавно, а дискретно, начиная с минимально допустимого значения частоты единичного усиления, с последующим удвоением частоты, а затем итерационным сужением диапазона поиска частоты, при которой коэффициент усиления операционного усилителя становится меньше единицы при заданном разрешении по частоте. Отличительной особенностью рассмотренной методики является возможность выполнения всех ее этапов в автоматизированном режиме, для чего разработаны алгоритм управления процессом измерения и его программная реализация в среде LabVIEW.

Выводы. Выполняемые в соответствии с данной методикой операции контроля операционных усилителей отличаются высокой производительностью и могут быть рекомендованы для организации 100 % входного контроля микросхем на предприятиях приборостроения. Работоспособность и высокая эффективность разработанных методики, алгоритмов и программ подтверждаются их использованием при построении многофункционального аппаратно-программного комплекса для измерения параметров ОУ.

Ключевые слова: операционный усилитель, частота единичного усиления, измерение, методика, алгоритм.

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

METHOD OF MEASURING UNITY GAIN FREQUENCY OF OPERATIONAL AMPLIFIERS

Abstract.

Background. The authors considered a topical problem of developing methods of automatic measurement of the unity gain frequency of operational amplifiers, the use of which will contribute to the organization of chip mass incoming inspection at instrument engineering enterprises.

Results. The researchers suggest a method of automatic measurement of the unity gain frequency of operational amplifiers, distinguished by that the frequency of the test signal applied to an analyzed operational amplifier to evaluate its gain does not change smoothly, but discretely, starting from the minimum value of the unity gain frequency with subsequent doubling of the frequency, and then with iterative narrowing of the search range of the frequency at which the gain of the operational amplifier becomes less than one at a given frequency resolution. A distinctive feature of the considered method is the possibility of performing all its stages in the automatic mode. For

this purpose the authors developed an algorithm of measurement process control and its implementation in the environment of LabVIEW.

Conclusions. Performed in accordance with this method the operation control of the operational amplifiers offer high performance and can be recommended for the organization of 100% incoming inspection of chips at instrument engineering enterprises. Working capacity and high efficiency of the developed methods, algorithms and programs are confirmed by their use in construction of a multi-functional hardware and software complex for the OpAmp's parameters measurement.

Key words: operational amplifier, unity gain frequency, measurement, method, algorithm.

Введение

Частота единичного усиления f_1 операционных усилителей (ОУ) определяется как частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице. ГОСТ 23089.13–86 [1] рекомендует два метода измерения частоты единичного усиления ОУ, из которых более универсальным и применимым для ОУ с любыми формами амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) в области высоких частот является метод измерения этого параметра при плавном изменении частоты тестового сигнала [2]. Ввиду большой трудоемкости измерительных процедур с использованием перестраиваемого «вручную» генератора тестовых сигналов и осциллографа или милливольтметра становится актуальной задача разработки методики, аппаратных и программных средств автоматизированного поиска частоты, на которой коэффициент усиления ОУ по напряжению равен единице.

Для решения этой задачи разработана структура автоматизированного измерителя частоты единичного усиления ОУ [2], отличающаяся тем, что сравнение входного и выходного напряжений ОУ осуществляется с помощью дифференциального амплитудного детектора и компаратора напряжений, состояние которого учитывается при задании частоты программно управляемого генератора тестовых сигналов [3]. В данной статье рассматриваются предложенные авторами методика автоматизированного измерения частоты единичного усиления ОУ, алгоритм управления процессом измерения частоты единичного усиления и алгоритм входного контроля ОУ с разбраковкой микросхем на группы по значениям частоты единичного усиления.

1. Методика измерения частоты единичного усиления ОУ

Одним из главных требований к разрабатываемой методике и аппаратно-программным средствам измерения частоты единичного усиления ОУ является возможность автоматизации измерительного эксперимента и встраивания этих средств в состав многофункционального аппаратно-программного комплекса [4] для измерения статических и динамических параметров ОУ, установленных требованиями технических условий.

Этому требованию отвечает разработанная авторами методика автоматизированного измерения частоты единичного усиления ОУ, отличающаяся тем, что частота тестового сигнала, подаваемого на исследуемый ОУ для оценки его коэффициента усиления, изменяется не плавно, а дискретно, начиная с минимально допустимого значения частоты единичного усиления, с последующим удвоением частоты, а затем итерационным сужением диапазона поиска частоты, при которой коэффициент усиления ОУ становится

меньше единицы при заданном разрешении по частоте. Методика предусматривает следующие этапы.

1. Задается минимально допустимое значение частоты единичного усиления $f_{1\min}$ исходя из планируемого применения ОУ. Если у пользователя отсутствуют конкретные требования к ОУ, предлагается устанавливать минимально допустимое значение частоты единичного усиления, в 10 раз меньшее номинального паспортного значения этого параметра: $f_{1\min} = 0,1 f_{1\text{ном}}$.

2. Задается разрешение (разрешающая способность) Δf , с которым будет производиться измерение частоты единичного усиления f_1 . Остановка процесса измерения частоты единичного усиления ОУ при достижении заданного разрешения позволяет существенно сократить затраты времени на измерение. Предлагается устанавливать разрешение $\Delta f = 0,05 f_1$. При этом составляющая относительной погрешности измерения, обусловленная ограничением разрешения по частоте, не будет превышать $\pm 5\%$.

3. Проводится оценка коэффициента усиления ОУ при подаче на его вход тестового сигнала с частотой $f_{1\min}$. Входное и выходное напряжения ОУ подаются на дифференциальный амплитудный детектор, а затем на компаратор напряжений. Если на данной частоте коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ $K \geq 1$ и выходное напряжение ОУ имеет амплитуду, не меньшую амплитуды напряжения на его входе, то состояние компаратора не изменяется и знак его выходного напряжения $\text{sgn}(U_k) > 0$. В этом случае следует проводить оценку коэффициента усиления ОУ на более высоких частотах тестового сигнала. Если на частоте $f_{1\min}$ коэффициент усиления ОУ $K < 1$, принимается решение о несоответствии данного ОУ требованиям технических условий (ТУ).

4. Выбирается неравномерная шкала приращения частоты при поиске частоты единичного усиления, что позволяет сократить временные затраты при большом разбросе значений этого параметра в партии контролируемых ОУ. Предлагается частоту тестового сигнала последовательно удваивать до тех пор, пока вследствие спада амплитудно-частотной характеристики ОУ не начнет выполняться условие $K < 1$. Частота, на которой это происходит, принимается за верхнюю границу диапазона поиска. После этого начинается итерационный процесс уточнения искомого значения частоты единичного усиления с постепенным сужением диапазона поиска методом половинного деления до тех пор, пока не будет достигнуто заданное разрешение Δf по частоте при $K < 1$.

5. За частоту единичного усиления f_1 ОУ принимается средняя частота f_n диапазона поиска с нижней частотой f_{i-1} и верхней частотой f_i :

$$f_n = f_{i-1} + \frac{f_i - f_{i-1}}{2}, \quad (1)$$

при которой половина интервала между верхним f_i и нижним f_{i-1} значениями частот меньше заданного разрешения по частоте

$$\frac{f_i - f_{i-1}}{2} < \Delta f, \quad (2)$$

где Δf определяется по формуле

$$\Delta f = 0,05 f_n. \quad (3)$$

Отличительной особенностью рассмотренной методики измерения частоты единичного усиления является возможность выполнения всех ее этапов в автоматизированном режиме, для чего разработаны алгоритм управления процессом измерения и его программная реализация в среде LabVIEW [5].

2. Алгоритм управления процессом измерения частоты единичного усиления ОУ

На основе описанной методики разработан алгоритм управления процессом измерения частоты единичного усиления, блок-схема которого приведена на рис. 1. В соответствии с этим алгоритмом аппаратно-программным комплексом выполняются следующие действия:

1. Из базы данных, предварительно сформированной пользователем, программой выбирается установленное для указанного типа ОУ минимально допустимое значение частоты единичного усиления $f_{1\min}$.

2. Вводится нумерация шагов процесса поиска частоты единичного усиления ОУ. На первом шаге ($i = 1$) за начальное значение частоты тестового сигнала принимается значение $f_i = f_{1\min}$.

3. На интерфейс выводится директива на формирование тестового сигнала с частотой f_i , подачу его на вход ОУ и проверку состояния компаратора, сравнивающего входное и выходное напряжения ОУ.

4. Если на данной частоте коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ $K \geq 1$ и выходное напряжение ОУ имеет амплитуду, не меньшую амплитуды напряжения на его входе, то состояние компаратора не изменяется и знак его выходного напряжения $\text{sgn}(U_k) > 0$. В этом случае проводится оценка коэффициента усиления ОУ на удвоенной частоте тестового сигнала. Номер шага процесса поиска частоты увеличивается на единицу: $i = i + 1$, а частота $f_i = 2f_{i-1}$.

Процедура удвоения частоты тестового сигнала циклически повторяется до тех пор, пока вследствие спада амплитудно-частотной характеристики ОУ не начнет выполняться условие $K < 1$, т.е. пока коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ не станет меньше единицы, а выходное напряжение ОУ не станет меньше входного. При этом состояние компаратора изменяется и знак его выходного напряжения $\text{sgn}(U_k) < 0$. Частота, на которой это происходит, является верхней границей диапазона частот, в котором осуществляется поиск частоты единичного усиления ОУ.

Для продолжения нумерации шагов процесса поиска (уточнения) искомой частоты единичного усиления ОУ вводится номер $n = i + 1$.

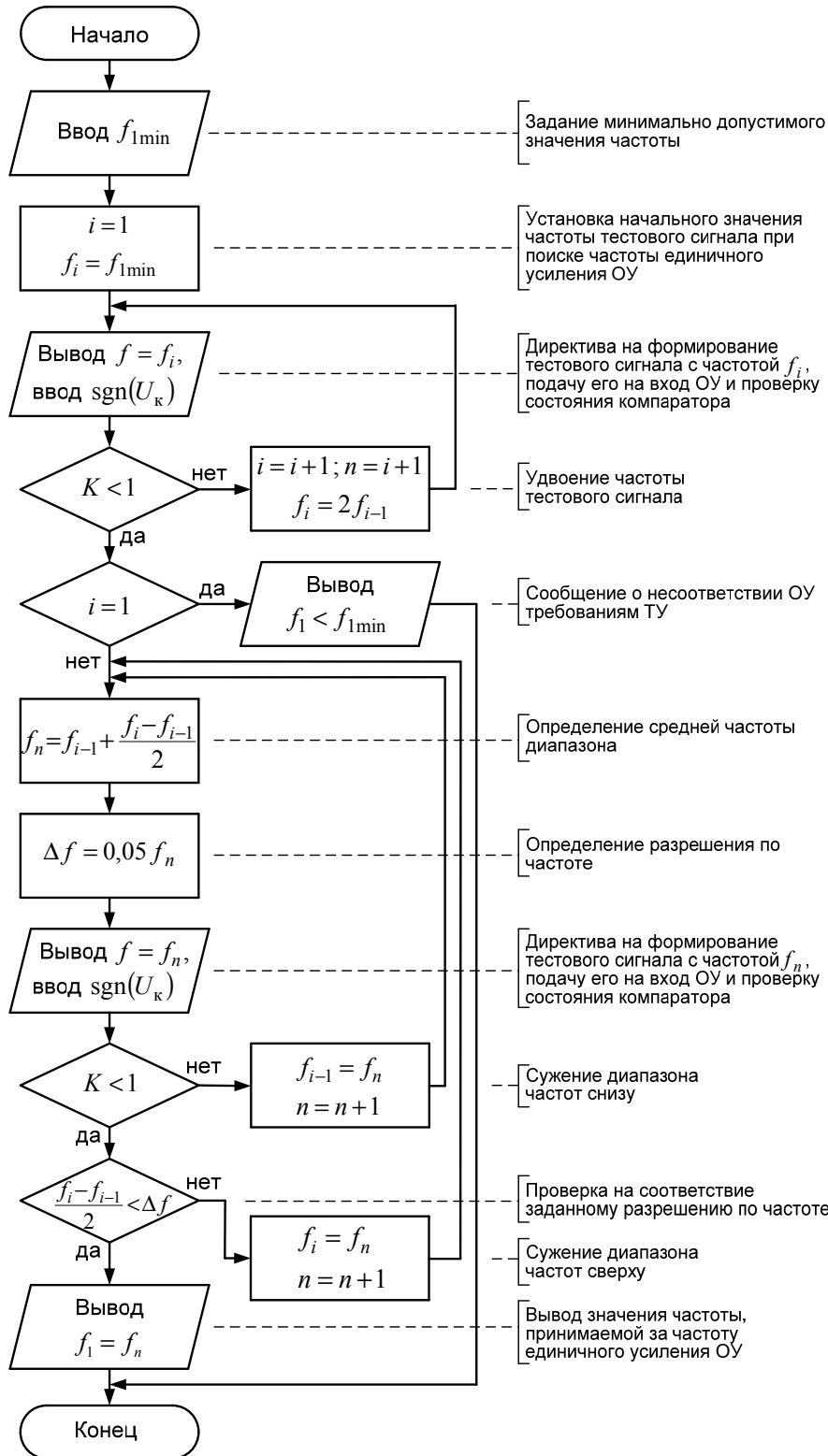


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления процессом измерения частоты единичного усиления ОУ

5. Если коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ оказывается меньшим единицы ($K < 1$) на самом первом шаге процесса поиска (при $i = 1$) на частоте $f_{1\min}$, то процесс поиска останавливается, выдается сообщение о несоответствии ОУ требованиям технических условий.

6. Уточнение значения частоты единичного усиления ОУ осуществляется методом половинного деления, для чего создан итерационный цикл определения среднего значения f_n диапазона частот с нижней граничной частотой f_{i-1} и верхней граничной частотой f_i при последовательном сужении этого диапазона сверху и снизу. Каждое следующее измерение выполняется на частоте f_n , значение которой вычисляется по формуле (1).

7. Определяется разрешение по частоте, задаваемое в соответствии с формулой (3).

8. На интерфейс выводится директива на формирование тестового сигнала с частотой f_n , подачу его на вход ОУ и проверку состояния компаратора, сравнивающего входное и выходное напряжения ОУ.

9. Если на частоте f_n коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ $K \geq 1$, необходимо перейти к измерениям на более высокой частоте, сузив снизу диапазон частот, в котором происходит поиск (уточнение) искомой частоты единичного усиления ОУ. Для этого за нижнее граничное значение диапазона частот принимается $f_{i-1} = f_n$, а верхнее граничное значение остается прежним, т.е. f_i . Номер шага процесса увеличивается на единицу, т.е. $n = n + 1$, и происходит возврат в начало цикла, т.е. по формуле (1) рассчитывается новое значение f_n частоты тестового сигнала и выполняются описанные выше процедуры данного цикла.

10. Если на частоте f_n коэффициент усиления измерительной схемы с ОУ $K < 1$, то осуществляется сравнение половины интервала между верхним f_i и нижним f_{i-1} значениями частот с заданным значением Δf разрешения по частоте. Если условие (2) не выполняется, т.е. фактическое разрешение по частоте больше заданного, то необходимо снизить частоту тестового сигнала, сузив диапазон частот сверху. Для этого за верхнее граничное значение диапазона частот принимается $f_i = f_n$, а нижнее граничное значение остается прежним, т.е. f_{i-1} . Номер шага процесса увеличивается на единицу, т.е. $n = n + 1$, и происходит возврат в начало цикла.

11. Рассмотренный итерационный цикл уточнения значения искомой частоты единичного усиления ОУ в соответствии с условием (2) останавливается при уменьшении половины интервала частот $\frac{f_i - f_{i-1}}{2}$ до заданного значения Δf разрешения по частоте. Последнее найденное значение f_n принимается за частоту единичного усиления ОУ f_1 .

Процесс поиска частоты единичного усиления ОУ проиллюстрируем следующим примером. Для ОУ КР544УД1Б паспортное номинальное значение частоты единичного усиления $f_{1\text{ном}} = 1$ МГц; минимальное значение

$f_{1\min} = 0,1$, $f_{1\text{ном}} = 0,1$ МГц. Для исследуемого экземпляра микросхемы ОУ фактическое значение частоты единичного усиления составило 2,55 МГц. Поиск искомого значения частоты единичного усиления исследуемого экземпляра микросхемы ОУ в соответствии с рассмотренным алгоритмом, отображен в табл. 1. В соответствии с алгоритмом частота тестового сигнала f_n определялась по следующим формулам:

$$f_2 = 2f_1; f_3 = 2f_2; f_4 = 2f_3; f_5 = 2f_4; f_6 = 2f_5;$$

$$f_7 = f_5 + \frac{f_6 - f_5}{2}; f_8 = f_7 + \frac{f_6 - f_7}{2}; f_9 = f_7 + \frac{f_8 - f_7}{2};$$

$$f_{10} = f_7 + \frac{f_9 - f_7}{2}; f_{11} = f_{10} + \frac{f_9 - f_{10}}{2}.$$

Таблица 1

Номер шага, n	f_{i-1} , МГц	f_i , МГц	f_n , МГц	Δf , МГц	K	$\frac{f_i - f_{i-1}}{2}$, МГц
1	0	0,1	0,1	–	>1	–
2	0,1	0,2	0,2	–	>1	–
3	0,2	0,4	0,4	–	>1	–
4	0,4	0,8	0,8	–	>1	–
5	0,8	1,6	1,6	–	>1	–
6	1,6	3,2	3,2	–	<1	–
7	1,6	3,2	2,4	0,12	>1	0,8
8	2,4	3,2	2,8	0,14	<1	0,4
9	2,4	2,8	2,6	0,13	<1	0,2
10	2,4	2,6	2,5	0,125	>1	0,1
11	2,5	2,6	2,55	0,1275	<1	0,05

Как видно из табл. 1, на 11-м шаге поиска при $K < 1$ фактическое разрешение по частоте $\frac{f_i - f_{i-1}}{2}$ становится меньшим заданного разрешения Δf . Поиск на этом останавливается, за частоту единичного усиления ОУ принимается значение $f_1 = 2,55$ МГц.

Процесс поиска частоты единичного усиления ОУ КР544УД1Б в рассмотренном примере иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 2 (в широком диапазоне частот) и рис. 3 (в узком диапазоне частот от 1 до 4 МГц).

3. Алгоритм входного контроля ОУ

При входном контроле ОУ на предприятиях приборостроения часто требуется выполнять рассортировку микросхем для конкретных применений на несколько групп с разными значениями частоты единичного усиления [6]. Если при этом не требуется проводить измерение частоты единичного усиления

ния, то входной контроль ОУ может выполняться с более высокой производительностью за счет меньшего числа выполняемых операций. Для этого предложен алгоритм входного контроля ОУ с разбраковкой микросхем на группы по значениям частоты единичного усиления. Блок-схема данного алгоритма приведена на рис. 4.

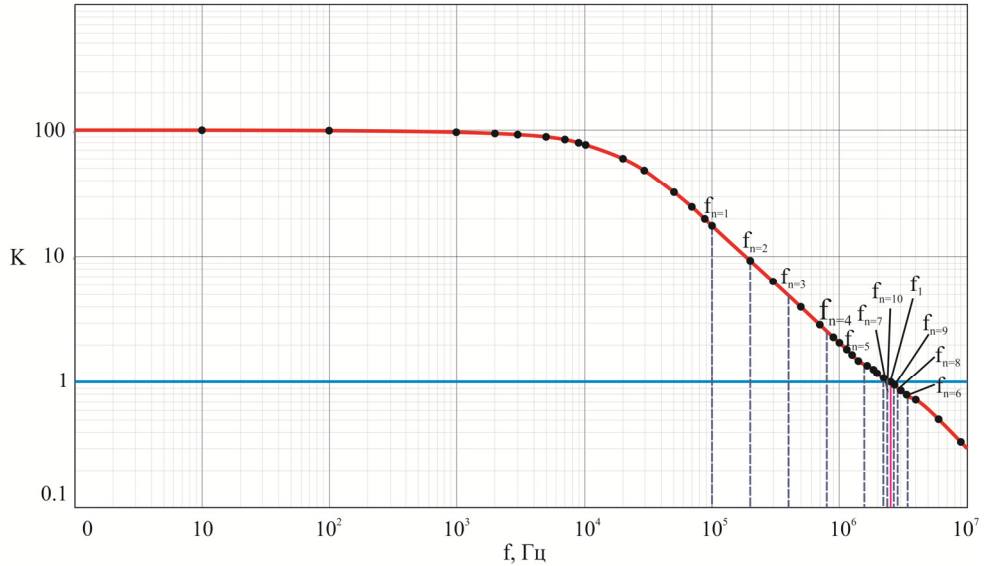


Рис. 2. График частотной характеристики, иллюстрирующий процесс поиска частоты единичного усиления ОУ

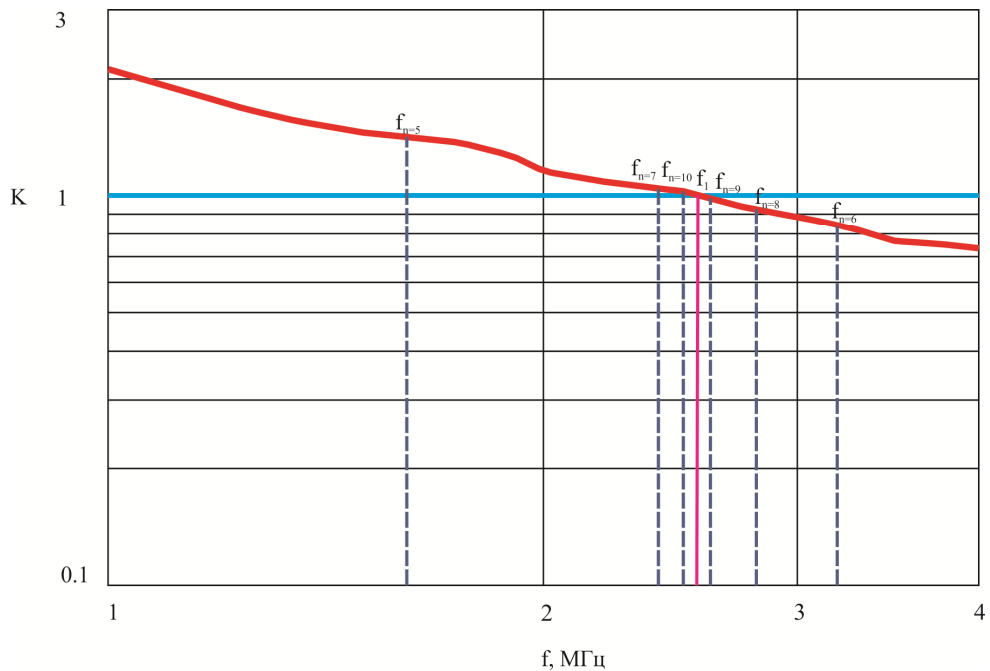


Рис. 3. График частотной характеристики в узком диапазоне частот

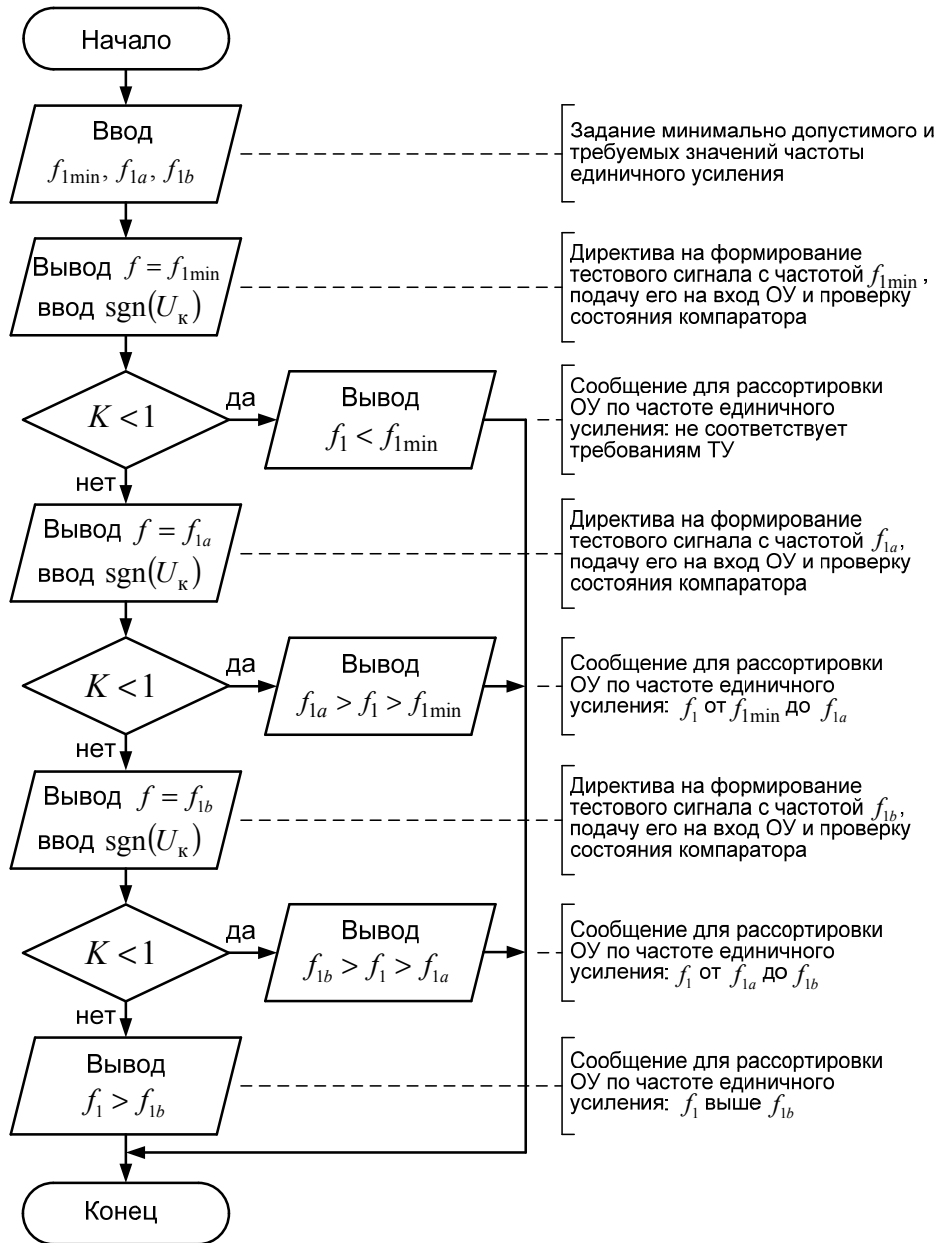


Рис. 4. Блок-схема алгоритма входного контроля ОУ по частоте единичного усиления

На подготовительном этапе задаются минимально допустимое значение частоты единичного усиления $f_{1\min}$, а также указанные пользователем требуемые значения частоты единичного усиления f_{1a} , f_{1b} и т.д. По директивам управляющей программы последовательно формируются и подаются на вход исследуемого ОУ тестовые синусоидальные сигналы с названными частотами. В результате выполненных контрольных операций программой выдается одно из сообщений:

- ОУ не соответствует требованиям ТУ;
- частота единичного усиления больше $f_{1\min}$, но меньше f_{1a} ;
- частота единичного усиления больше f_{1a} , но меньше f_{1b} ;
- частота единичного усиления больше f_{1b} .

Выполняемые в соответствии с данным алгоритмом операции контроля ОУ отличаются высокой производительностью и могут быть рекомендованы для организации 100 % входного контроля микросхем на предприятиях приборостроения.

Заключение

Работоспособность и высокая эффективность разработанных методики, алгоритмов и программ подтверждаются их использованием при построении многофункционального аппаратно-программного комплекса для измерения параметров ОУ [5].

Список литературы

1. ГОСТ 23089.13–86. Микросхемы интегральные. Методы измерения частоты среза и частоты единичного усиления операционных усилителей. – М., 1986.
2. Автоматизированное измерение частотных параметров операционных усилителей / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Инженерные и научные приложения на базе технологий National Instruments – 2013 : сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. – М. : ДМК Пресс, 2013. – С. 164–166.
3. Измерение динамических параметров операционных усилителей с применением цифровых формирователей сигналов / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, В. В. Комаров, Е. В. Сапунов // Надежность и качество – 2013 : труды Междунар. симпозиума : в 2-х т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 2. – С. 62–65.
4. **Паршуков, М. Ю.** Принципы построения аппаратно-программных комплексов для формирования и измерения параметров импульсных сигналов / М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов, И. В. Ханин, П. Мишра // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 102–112.
5. **Светлов, А. В.** Использование технологии виртуальных приборов при разработке аппаратно-программного комплекса для измерения параметров операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров // Надежность и качество – 2012 : тр. Междунар. симпозиума : в 2-х т. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 7–10.
6. **Байдаров, С. Ю.** Методика обработки результатов измерений параметров операционного усилителя / С. Ю. Байдаров, В. В. Комаров, М. Ю. Паршуков, А. В. Светлов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4 (20). – С. 128–140.

References

1. GOST 23089.13–86. *Mikroskhemy integral'nye. Metody izmereniya chastoty sreza i chastoty edinichnogo usileniya operatsionnykh usiliteley* [Integrated circuit chip. Methods of measurement of cutoff frequency and unity gain frequency of operational amplifiers]. Moscow, 1986.
2. Parshukov M. Yu., Svetlov A. V., Komarov V. V., Sapunov E. V. *Inzhenernye i nauchnye prilozheniya na baze tekhnologiy National Instruments – 2013: sb. tr. XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Engineering and scientific applications on the basis of National Instruments technologies – 2013: proceedings of XII International scientific and practical conference]. Moscow: DMK Press, 2013, pp. 164–166.

3. Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Komarov V. V., Sapunov E. V. *Nadezhnost' i kachestvo – 2013: trudy Mezhdunar. simpoziuma: v 2-kh t.* [Reliability and quality – 2013: proceedings of the International symposium in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2013, vol. 2, pp. 62–65.
4. Parshukov M. Yu., Svetlov A. V., Khanin I. V., Mishra P. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 3 (11), pp. 102–112.
5. Svetlov A. V., Parshukov M. Yu., Baydarov S. Yu., Komarov V. V. *Nadezhnost' i kachestvo – 2012: tr. Mezhdunar. o simpoziuma: v 2-kh t.* [Reliability and quality – 2012: proceedings of the International symposium in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, vol. 2, pp. 7–10.
6. Baydarov S. Yu., Komarov V. V., Parshukov M. Yu., Svetlov A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 4 (20), pp. 128–140.

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)

Паршуков Максим Юрьевич

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

E-mail: parshucow@bk.ru

Parshukov Maksim Yur'evich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Сапунов Евгений Владимирович

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

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Sapunov Evgeniy Vladimirovich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Комаров Всеволод Владимирович

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

E-mail: v.komarov09@rambler.ru

Komarov Vsevolod Vladimirovich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 621.317.3

Светлов, А. В.

Методика измерения частоты единичного усиления операционных усилителей / А. В. Светлов, М. Ю. Паршуков, Е. В. Сапунов, В. В. Комаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 41–51.