

УДК 621.375.132.9

А. В. Трифонов

Расчет корректирующей емкости трансимпедансного усилителя

Описан новый подход к определению величины корректирующей емкости трансимпедансного усилителя. Предложена расчетная формула для нахождения величины корректирующей емкости.

Ключевые слова: трансимпедансный усилитель, корректирующая емкость, отрицательная обратная связь, запас устойчивости по фазе.

Введение

В фотоприемниках для усиления тока фотодиода в качестве предусилителя часто используется операционный усилитель (ОУ), включенный по схеме трансимпедансного усилителя (ТИУ) [1, 2]. На рис. 1 отображен один из возможных вариантов схемы такого ТИУ. На рис. 2 приведена эквивалентная схема ТИУ по переменному току, где фотодиод представлен в виде идеального источника тока $I_{\text{вх}}$, а емкость C_{IN} равна сумме емкостей фотодиода,

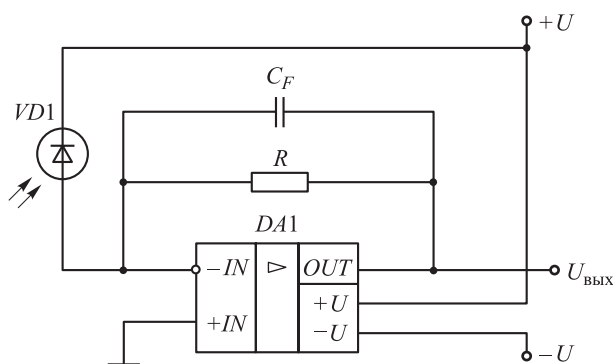


Рис. 1. Схема трансимпедансного усилителя (ТИУ): C_F – корректирующая емкость; R – сопротивление нагрузки; $-U$, $+U$ – питающие напряжения; $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение; $VD1$ – фотодиод; $DA1$ – операционный усилитель

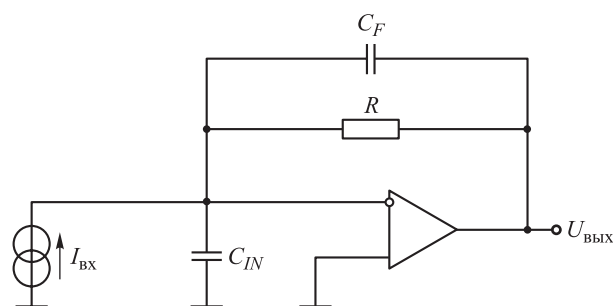


Рис. 2. Эквивалентная схема ТИУ

входной емкости ОУ и монтажной емкости. Передаточная функция ТИУ представляет собой отношение выходного напряжения к входному току и имеет размерность сопротивления.

За счет емкости C_{IN} в петле отрицательной обратной связи (ООС) ОУ образуется дополнительный фазовый сдвиг между напряжениями на инвертирующем входе и выходе ОУ. В отсутствие корректирующей емкости C_F это приводит к уменьшению запаса устойчивости работы ОУ по фазе и возможному самовозбуждению [1, 2].

Приведем расчетные формулы для величины C_F , предлагаемые ведущими фирмами-производителями интегральных микросхем:

• *Texas Instruments*

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left[1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_{\text{IN}} GBW)} \right] \quad [1],$$

где GBW – площадь усиления ОУ (1/с);

• *National Semiconductor*

$$C_F = \sqrt{\frac{C_{\text{IN}}}{2\pi(GBW)R_F}} \quad [2].$$

При выводе этих формул коэффициент передачи по напряжению от выхода ОУ на его инвертирующий вход выбирался равным коэффициенту передачи делителя напряжения, образованного емкостью C_{IN} и параллельным соединением элементов R и C_F (см. рис. 2). Однако это справедливо только в случае, если указанный делитель напряжения не подключен к инвертирующему входу ОУ, т. е. цепь ООС разомкнута. В случае же замкнутой цепи ООС коэффициент передачи по напряжению от выхода ОУ на его инвертирующий вход будет уже совсем другим. Следовательно, необходимо скорректировать указанные выше формулы.



Вывод формулы для расчета величины корректирующей емкости

Сначала применим метод сигнальных графов, кратко изложенный в работе [3]. Используем однополюсную модель передаточной функции ОУ [4]:

$$T_{\text{ОУ}}(p) = \frac{A}{p},$$

где $p = j\omega$ – оператор Лапласа;

A – площадь усиления ОУ (рад/с).

На рис. 3 представлен сигнальный граф, соответствующий эквивалентной схеме ТИУ, приведенной на рис. 2. Основываясь на правилах составления сигнальных графов, можно записать:

$$a = \frac{1}{p(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}}) + G}, \quad b = \frac{pC_{\text{F}} + G}{p(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}}) + G},$$

$$c = -\frac{A}{p},$$

где $G = 1/R$ – проводимость сопротивления нагрузки.

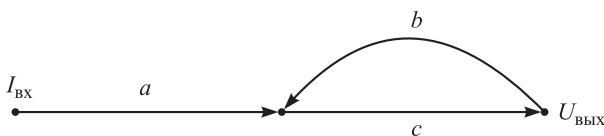


Рис. 3. Сигнальный граф ТИУ

Применяя формулу Мезона [3], определяем коэффициент передачи ТИУ:

$$T_{\text{ТИУ}} = -\frac{aA}{p(1 + bc)}.$$

После несложных преобразований получаем:

$$T_{\text{ТИУ}}(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = -A / \left[(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}}) \left[p^2 + \frac{1 + ARC_{\text{F}}}{R(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}})} p + \frac{A}{R(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}})} \right] \right]. \quad (1)$$

Известно, что цепь нижних частот второго порядка обладает следующей передаточной функцией [4]:

$$T_{\text{НЧ}}(p) = (K\omega_0^2) / \left(p^2 + \frac{\omega_0}{Q_0} p + \omega_0^2 \right), \quad (2)$$

где K – коэффициент передачи;

ω_0 – частота полюсов передаточной функции;

Q_0 – добротность полюсов передаточной функции.

Сравнив выражения (1) и (2), можно записать:

$$K = -R;$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{A}{R(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}})}}; \quad (3)$$

$$Q_0 = \frac{\sqrt{AR(C_{\text{IN}} + C_{\text{F}})}}{1 + ARC_{\text{F}}}. \quad (4)$$

Одним из главных преимуществ ТИУ по сравнению с обычным усилителем напряжения является возможность существенного расширения полосы пропускания. Полоса пропускания определяется частотой полюсов ω_0 , поэтому на практике, как видно из выражения (3), для повышения величины ω_0 обычно всегда выполняется условие

$$C_{\text{IN}} \gg C_{\text{F}}. \quad (5)$$

По той же причине, как правило, имеет место неравенство

$$A \gg \frac{1}{RC_{\text{IN}}}. \quad (6)$$

Известно, что самовозбуждение возникает, если петлевой коэффициент усиления усилителя больше единицы и выходной сигнал подается на вход в фазе с входным сигналом. При этом критерий устойчивости к самовозбуждению выражается через запас устойчивости по фазе, который должен быть не менее 45° [5]. Значит, при частоте, при которой значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) петлевой передаточной функции равно единице, значение фазово-частотной характеристики (ФЧХ) должно отличаться от -360° на 45° и составлять -315° .

Согласно данным рис. 3, запишем передаточную функцию по напряжению от инвертирующего входа на выход ОУ:



$$T_1(p) = -\frac{A}{p}. \quad (7)$$

Передаточную функцию по напряжению от выхода ОУ на его инвертирующий вход находим согласно рис. 3, применяя формулу Мезона и проводя несложные алгебраические преобразования:

$$T_2(p) = \frac{b}{1+bc} = \frac{p(pRC_F + 1)}{p^2R(C_{IN} + C_F) + p(ARC_F + 1) + A}. \quad (8)$$

Передаточная функция по петле ООС (от инвертирующего входа на выход ОУ и далее от выхода ОУ на его инвертирующий вход) имеет следующий вид:

$$T_n(p) = T_1(p)T_2(p) = -\frac{A(pRC_F + 1)}{p^2R(C_{IN} + C_F) + p(ARC_F + 1) + A}. \quad (9)$$

Если приравнять модуль правой части выражения (9) к единице, то после упрощений и с учетом условия (5) получим следующее уравнение:

$$\omega^4 + \frac{\omega^2(1 - 2ARC_{IN})}{R^2C_{IN}^2} = 0.$$

После решения этого уравнения с учетом условия (6) находим частоту, на которой значение АЧХ петлевой передаточной функции равно единице:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2A}{RC_{IN}}}. \quad (10)$$

В соответствии с правилами обращения с комплексными числами и с учетом условия (5) ФЧХ петлевой передаточной функции, определяемой выражением (9), имеет следующий вид:

$$\Phi(\omega) = -180^\circ + \operatorname{arctg}(\omega RC_F) - \operatorname{arctg}\left[\frac{\omega(ARC_F + 1)}{A - \omega^2 RC_{IN}}\right]. \quad (11)$$

Согласно информации на графиках обратных тригонометрических функций, приведенных

в математических справочниках, можно заключить, что для рассматриваемого случая справедливо соотношение

$$\operatorname{arctg} x = 180^\circ - \operatorname{arctg} x.$$

Тогда, согласно критерию обеспечения запаса устойчивости по фазе, выражение (11) можно записать в следующем виде:

$$\Phi(\omega) = -180^\circ + \operatorname{arctg}(\omega RC_F) - \operatorname{arctg}\left[\frac{\omega(ARC_F + 1)}{A - \omega^2 RC_{IN}}\right] - 180^\circ = -360^\circ + \Psi,$$

где Ψ – величина требуемого запаса устойчивости по фазе (град).

Подставив $\omega = \omega_1$ из формулы (10) в полученное уравнение, запишем:

$$\Psi = \operatorname{arctg}\left(C_F \sqrt{\frac{2AR}{C_{IN}}}\right) + \operatorname{arctg}\left(C_F \sqrt{\frac{2AR}{C_{IN}}} + \sqrt{\frac{2}{ARC_{IN}}}\right). \quad (12)$$

Выражение (12) можно переписать так:

$$\Psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{C_F}{C_{IN}} \sqrt{ARC_{IN}}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{C_F}{C_{IN}} \sqrt{ARC_{IN}} + \sqrt{\frac{2}{ARC_{IN}}}\right),$$

или

$$\Psi = \operatorname{arctg}(y\sqrt{x}) + \operatorname{arctg}\left(y\sqrt{x} + \sqrt{\frac{2}{x}}\right), \quad (13)$$

где x, y – безразмерные переменные;

$$x = ARC_{IN}, \quad y = C_F / C_{IN}.$$

На рис. 4 приведена функциональная зависимость переменных x, y для случая $\Psi = 45^\circ$.

Величину Q_0 , определяемую выражением (4), также можно выразить через переменные x, y с учетом условия (5):

$$Q_0 = \frac{\sqrt{x}}{1 + xy}. \quad (14)$$

Таким образом, зная величины A, R, C_{IN} , из уравнения (13) для заданного значения Ψ

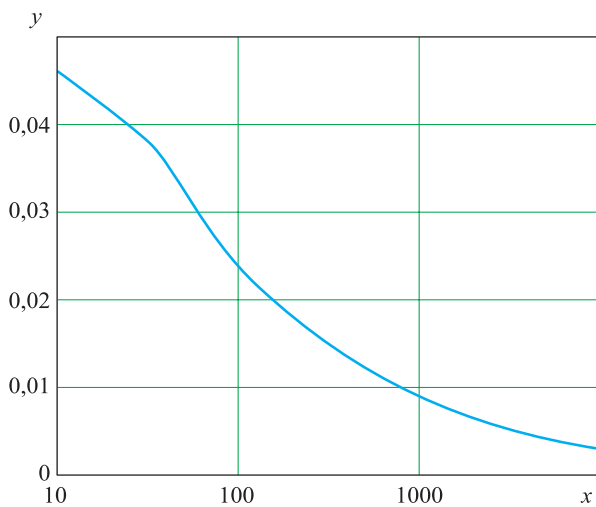


Рис. 4. Функциональная зависимость переменных x , y при $\Psi = 45^\circ$

можно определить величину переменной y , а значит, и величину C_F . Если же в первую очередь важна добротность полюсов передаточной функции ТИУ, то следует из уравнения (14) для заданного значения Q_0 найти величину y . Подставив найденную величину y в уравнение (13), получим значение запаса устойчивости по фазе Ψ .

Заключение

Предлагаемая методика расчета корректирующей емкости ТИУ позволяет одновременно с нахождением ее величины определять величину добротности полюсов передаточной функции ТИУ и запас устойчивости по фазе. В условиях серийного производства это позволяет объективно оценивать допуск на разброс

параметров выходного сигнала ТИУ за счет технологического разброса параметров радиоэлементов и воздействия дестабилизирующих факторов, а также оценивать величину запаса устойчивости по фазе.

Если использовать расчетную формулу, приведенную в руководстве [2], то запас устойчивости по фазе Ψ будет не 45° , как это утверждается в данном документе, а значительно больше (по крайней мере не менее 109°). При этом величина добротности Q_0 практически будет равна 1, что примерно в 3 раза меньше, чем для случая $\Psi = 45^\circ$.

Список литературы

1. Wang T., Erhman B. Compensate transimpedance amplifiers intuitively. Texas Instruments: application report SBOA055A. March 1993. Revised March 2005. 3 p.
2. Design considerations for a transimpedance amplifier. National Semiconductor Corporation: National Semiconductor. Application Note 1803. Maithil Pahchigar. February 28, 2008. 4 p.
3. Мамонкин И. Г. Усилительные устройства. М.: Связь, 1977. 360 с.
4. Мошниц Г., Хорн П. Проектирование активных фильтров: пер. с англ. / под ред. И. Н. Теллюка. М.: Мир, 1984. 320 с.
5. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС: пер. с англ. / под ред. М. В. Гальперина. М.: Мир, 1985. 572 с.

Поступила 27.03.18

Трифонов Александр Васильевич – ведущий инженер ПАО «НПП «Импульс», г. Москва.

Область научных интересов: активные фильтры, системы термоэлектрического охлаждения, радиолокация с излучением непрерывных ЧМ-колебаний.

Computing filtering capacitance for a transimpedance amplifier

The study describes a new approach to determining the capacitance of a filtering capacitor in a transimpedance amplifier. We present a model equation for computing this filtering capacitance.

Keywords: transimpedance amplifier, filtering capacitor, negative feedback, phase margin.

Trifonov Aleksandr Vasilevich – Leading Engineer, Joint stock company “Impuls”, Moscow.

Science research interests: active filters, thermoelectric cooling systems, frequency-modulated continuous-wave radiolocation.