

# Изследване и проектиране на усилвателни схеми с голямо входно съпротивление

Design and investigation of amplifiers working at high impedance level  
проф. д-р Иван Илиев Стоянов, инж. Георги Тодоров Николов,  
инж. Ивайло Миланов Пандиев  
ТУ-София, ФЕТТ, кам."Електронна техника"

## Abstract

In this paper the problems associated with design and investigation of amplifiers working at high impedance levels are discussed. The error sources and basic equations for estimation of their influence are described in brief. The methodology involving fast estimation and computer aided simulation using PSpice A/D is suggested. This approach is illustrated by investigation of the non-inverting amplifier for design and verification. The performance characteristics are presented and discussed in details.

## Въведение

Голямото входно съпротивление на неинвертиращия усилвател определя неговото приложение като предусилвателно стъпало в устройствата за измерване на постоянно напрежение. Обща тенденция при проектиране на такива схеми е да се увеличава входното съпротивление. Това разширява възможностите за измерване на напрежение от източници с голямо вътрешно съпротивление. От друга страна измененията в условията на работа на входната верига - от режим на късо съединение до включване на източник с голямо вътрешно съпротивление е причина за възникване на допълнителна грешка от входния поляризиращ ток на ОУ. Ето защо неинвертиращата усилвателна схема в тези приложения се реализира с операционни усилватели с малки или свръхмалки входни токове (наречани често електрометрични). Такива са ОУ със супербета ВЈТ, ЈFET, или MOS транзистори на входа. Изследването и проектирането на този род усилвателни стъпала, изложени в доклада, имат за изходна база основните метрологически изисквания към схемата.

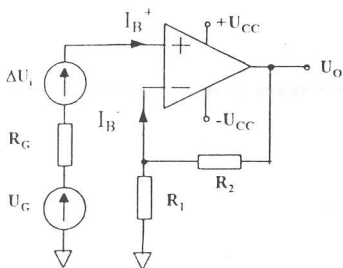
Приложен е нов подход за проектиране, който съчетава ориентировъчните ръчни разчети със симулационните процедури реализирани с помощта на PSpice аналоговия симулатор.

## 1. Принцилна електрическа схема и основни теоретични постановки.

Принципната електрическа схема на неинвертиращия усилвател в условията на работа с източник на напрежение с вътрешно съпротивление  $R_G$  е показана на фиг. 1.

Коефициентът на усилване на системата е

$$(1) \quad A_F = \frac{U_o}{U_G} = \frac{R_i}{R_i + R_G} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$



Фиг. 1.

Входното съпротивление на стъпалото  $R_i$  се определя с изрза

$$(2) \quad R_i = 2R_{CM} \parallel R_d(1 + \beta A),$$

където  $R_{CM}$  и  $R_d$  са съответно входните съпротивления за синфазен и диференциален сигнал;  $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  коефициент на обратна връзка;  $A$  - усилване по напрежение на ОУ при отворена верига на обратна връзка.

Анализът на чувствителност на (1) определя две съставки на мултипликативната грешка:

$$(3) \quad \delta_M = \delta_{MG} + \delta_{MR} = \left[ -\frac{R_G}{R_i} \pm \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \right] 100\%$$

Адитивната грешка представена като изместване на нулата приведено към входа се определя с изрза:

$$(4) \quad \Delta U_i = \pm U_{i0} - I_B^+ \cdot R_G + I_B^- \cdot \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

където  $U_{i0}$  е входното напрежение на несиметрия на ОУ,  $I_B^+$  и  $I_B^-$  съответните входни поляризиращи токове.

При значителни и променящи се стойности на съпротивлението  $R_G$ , известното условие за частична компенсация на влиянието на поляризиращите токове  $R_G = R_1 \parallel R_2$  тук е неприложимо. Ето защо второто условие за оразмеряване на резисторите  $R_1$  и  $R_2$  е по избор на проектанта, като по-нискоомния резистор се приема в границите около  $100\Omega - 10k\Omega$  (високоомните резистори са по правило по-нестабилни).

След такъв избор израз (4) се опростява: (5)  $\Delta U_i = \pm U_{i0} - I_B^+ \cdot R_G$

Когато компенсираме нулата чрез известните методи при условието  $R_G = 0$  и при стайна температура ( $25^\circ\text{C}$ ) изменения на  $R_G$  и на температурата на околната среда пораждат допълнителни грешки. (6)  $\Delta U_i(\Delta R_G) = -I_B^+ \cdot R_G$  (7)  $\Delta U_i(\Delta T) = (TKU_{i0} + TKI_B^+ \cdot R_G) \cdot \Delta T$

## 2. Проектиране и изследване на неинвертираща усилвателна схема.

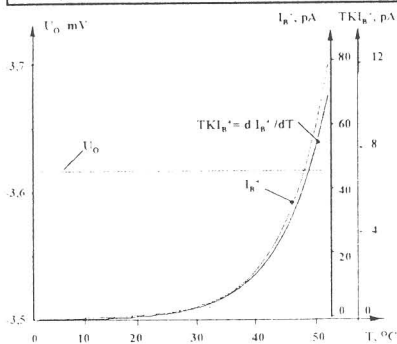
Ще демонстрираме комбинирания способ за изследване и проектиране, прилагайки ръчните пресмятания и симулационните процедури върху неинвертираща усилвателна схема реализирана с операционен усилвател AD 645J (Макромодел AD 645J/AD 4/92 Rev.B)

### Симуляционно изследване на модела на ОУ AD 645J.

Информация за функционалните възможности на моделите на операционните усилватели по начало е оскъдна. Ето защо като първа стъпка на изследванията бяха заложили симуляционни процедури уточняващи основните параметри на модела. Чрез снимане на входната и предавателна характеристика на ОУ при отворена верига на обратна връзка и тяхното диференциране бяха намерени интересующите ни параметри - Таблица 1.

Таблица 1

Параметър	Информация за параметъра				
	Означение	Симулации	Каталог		
			min	тип	max
Усилване по напрежение при отворена верига на обратна връзка	$A_0$ пъти	$4.6 \cdot 10^5$	$5.10^5$	$3.10^5$	
Входно напрежение на несиметрия	$U_{i0}$ , mV	0.5		0.1	0.5
Температурен коефициент на $U_{i0}$	$TKU_{i0}$ , $\mu V/^\circ C$	-		3	10
Входен поляризиращ ток	$I_B^+$ , pA	3.5		0.7	3
Температурен коефициент на $I_B^+$	$TKI_B$ , $pA/^\circ C$				0.35
Диференциално входно съпротивление	$R_{in}$ , $\Omega$	$0.5 \cdot 10^{12}$			$10^{12}$
Синфазно входно съпротивление	$R_{cm}$ , $\Omega$	$0.5 \cdot 10^{12}$			$10^{12}$

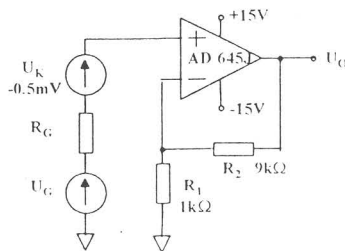


Фиг.2

4.) В каталога не фигурира параметъра  $TKI_B$ . Получените чрез симулации зависимости на входния поляризиращ ток и неговия температурен коефициент (фиг. 2) позволяват намирането на усреднената му стойност в температурен интервал  $20-50^\circ C$   $TKI_B = 3,2 pA/^\circ C$ .

Тяхното сравняване с каталожните данни за ОУ показва следното:

- 1.) Моделът отразява максимално "лошите" стойности за параметрите  $A_0$ ,  $U_{i0}$  и  $I_B$ .
- 2.) Входното съпротивление за синфазен сигнал е на повече от два порядъка по-малко от стойността отразена в каталога.
- 3.) В модела не е заложена температурната зависимост на входното напрежение на несиметрия.



Фиг. 3

## Изследване на неинвертираща усилвателна схема

*Цел на изследването:* Определяне на метрологическите параметри и съставяне на техническа спецификация на разработката.

*Схема на опитната постановка* - съгласно фиг. 3.

Избран е типичен коефициент на усилване  $A_{FN} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 10$

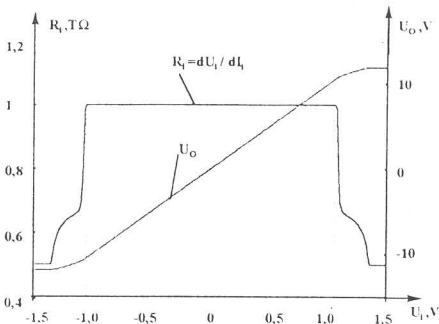
Толеранси на  $R_1$  и  $R_2$ :  $\pm 0.25\%$ . Осъществена е компенсация на нулата чрез източника  $U_K$ .

### Изследване на линейността и на мултипликативните грешки

За целта снемаме и обработваме предавателната и входна характеристики на схемата при условия:  $R_G = 0$ ,  $T = 27^\circ\text{C}$ .

#### Планиране на експеримента

- Вид на анализа - по постоянен ток (DC).
- Развивка на входното напрежение:  $U_i$  - start: -1,5 V; stop: 1,5V; incr. 10mV



Фиг. 4

#### Резултати

Крайните резултати от експеримента са отразени на фиг. 4.

#### Анализ на резултатите

Анализът на резултатите от извършените симулации показват следното:

1. Коефициентът на усилване на схемата е  $A_F = 10,000$  т.е грешката от крайния коефициент на усилване при отворена верига на операционния усилвател е неупловима. Теоретично пресметнатата

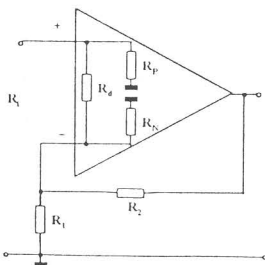
$$\text{ма е: } \delta_A = -\frac{1}{\beta A_{\min}} = -0,002\%$$

2. Линейната област на предавателната характеристика обхваща  $\pm 10,6\text{V}$  за изходното напрежение ( $\pm 1,06\text{V}$  за входното напрежение).

3. Входното съпротивление на схемата е  $R_i = 10^{12}\Omega$ . То се определя предимно от съставката на входното съпротивление за синфазен сигнал -  $R_P = 10^{12}\Omega$  - фиг. 5.

#### Изследване на адитивната грешка

Симулационните процедури са подчинени на целта за изследване на допълнителното



$$R_P = R_N = 10^{12}\Omega;$$

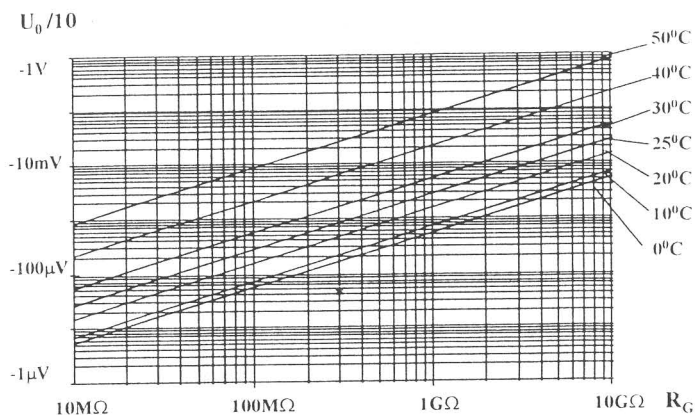
$$R_i = R_P || R_d (1 + \beta A)$$

Фиг. 5

изместване на нулата от температурата за различни стойности на съпротивлението  $R_G$  включено във входната верига на стъпалото.

*Планирането на експеримента обхваща следното:*

- Вид анализ - по постоянен ток (DC)
- Логаритмична разбивка на  $R_G$  -start  $10M\Omega$ ; stop  $10G\Omega$ ; pt/dec. 51.
- Параметричен анализ с параметър температура и стойности от списък 0; 10; 20; 25; 30; 40 и  $50^\circ C$  ( $V_G = 0 V$ ;  $V_k = -0.5 mV$ )



Фиг. 6

*Резултатите от анализа са показани на фиг. 6.*

Аддитивната грешка е отнесена спрямо входа на усилвателното стъпало.

*Анализът на резултатите показва следното:*

1. Подчертаното увеличаване на грешката при равни стъпки на температурата за  $T > 25^\circ C$  е в

пълно съответствие с анализите на температурния коефициент на входния поляризиращ ток и предварителните пресмятания.

2. Получените графики позволяват спецификацията на температурната адитивна грешка в границите на определени температурни интервали и различни стойности на съпротивлението на възбудителния източник.

#### *Обобщение:*

- Мултипликативната грешка се определя предимно от толерансите на резисторите използвани във веригата на обратната връзка.
- Допълнителна съставка на мултипликативната грешка от  $R_G$  е лесно оценима, когато се знае входното съпротивление на усилвателната схема. ( $\delta_{MG} = -R_G/R_I$ )

Основната адитивна грешка ( $25^\circ C$ ) се определя от входното напрежение на несиметрия  $U_{i0}$  и входния поляризиращ ток. Втората съставка е функция на съпротивлението включено в неинвертиращия вход на схемата. Стойността на съпротивлението  $R_G$ , при което двете грешки се изравняват се намира от (5):  $R_{Gmax} = U_{i0}/I_B$ . В нашия

случай на ОУ AD 645J:  $U_{i0}=0,5\text{mV}$ ;  $I_B^+=3\text{pA}$ ;  $R_{G\text{max}}=166\text{ M}\Omega$ , общата адитивна грешка е  $1\text{mV}$ .

Когато в схемата се осъществи калибровка на нулата при  $R_G=0$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ , допълнителни грешки се явяват при следните случаи:

а)  $R_G\neq 0$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ;  $\Delta U_i(\Delta R_G) = -I_B^+ \cdot R_G$ . За AD645J при  $R_{G\text{max}}$  тази грешка е  $0,5\text{mV}$ .

б)  $R_G\neq 0$ ;  $T=\text{var}$ ;  $\Delta U_i(\Delta T) = (\text{TK}U_{i0} + \text{TK}I_B^+ \cdot R_G) \cdot \Delta T$ . В нашия случай  $\text{TK}U_{i0} = 10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (max);  $\text{TK}I_B = 3,2\text{pA}/^\circ\text{C}$  (усреднен температурен коефициент). За изменение на температурата от  $25$  до  $50^\circ\text{C}$  грешката е

$$\Delta U_i(\Delta T) = (10^{-6} + 3,2 \cdot 10^{-12} \cdot 166 \cdot 10^6) \cdot 25 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ V} + 13,28 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 13,53 \text{ mV}.$$

Горните изчисления показват, че температурната грешка от входния поляризиращ ток значително превишава тази от температурния коефициент на  $U_{i0}$ . Стойността на съпротивлението, при което тези две грешки се изравняват е  $R_{G\text{max}} = \text{TK}U_{i0} / \text{TK}I_B = 3,12\text{M}\Omega$ .

• Грешката от  $\text{TK}I_B$  може да се определи по-точно като се използват зависимостите дадени на фиг. 6.

### *Техническа спецификация на предусилвател с високо входно съпротивление.*

Изложените по-горе анализи и получените резултати ни дават основание да съставим следната изходна спецификация на разработката:

- 1.) Обхват на усилваните напрежения от  $0$  до  $\pm 200\text{mV}$ ;
- 2.) Номинален коефициент на усилване по напрежение  $A_{FN} = 10$ ;
- 3.) Основна грешка за температурен обхват  $0$  до  $50^\circ\text{C}$  и  $R_G=0 \pm(0,5\%$  от усилваното напрежение  $+1\text{mV}$ ) ( $\delta_M, \%$  +  $\Delta_{AD}, \text{V}$ );
- 4.) Входно съпротивление  $R_i \geq 10^{12}\ \Omega$ ;
- 5.) Допълнителна грешка от температурния коефициент на входния поляризиращ ток при  $R_G\neq 0$  - съгласно графиките от фиг. 6.

### *Заклучение*

Описания подход за анализ и проектиране на постояннотокови усилватели с повишено входно съпротивление показва недвусмислено необходимостта от съчетаното използване на ориентировъчни инженерни разчети със симулационните процедури на аналоговия PSpice симулатор. По този начин проектантът не само, че се доближава плътно до истината около взетото решение, но е напълно подготвен за работа във фазата на практическата реализация-оживяване и тестване на проектираното изделие.

### *Литература*

- [1] Robert J. Widlar "Working with High Impedance OpAmps", National Semiconductor, AN241, February 1980.
- [2] Robert J. Widlar "Applying a New Precision OpAmp", National Semiconductor, AN242, April 1980.
- [3] National Semiconductor "General Purpose Linear Devices" Databook 1989
- [4] Analog Devices "Design-in Reference Manual", 1994.