

АНАЛИЗ НА ПЪЛНАТА ГРЕШКА НА АЦП С ВХОДЕН УСИЛВАТЕЛ

Доц. д-р Елисавета Димитрова Гаджева*, доц. д-р Катя Кръстева
Стефанова**,

инж. Илия Едуардов Петров**

*Катедра Електроника, ТУ – София, e-mail: egadjeva@vmei.acad.bg

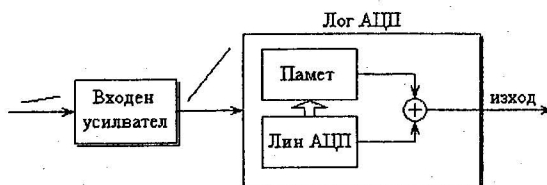
**Катедра Електроника, ТУ – София, ф-л Пловдив, e-mail:

k_stefanova@yahoo.com

Analysis of the total error of A/D converters with input amplifier. The present paper shows the results of the behavioral modeling of the logarithmic ADC, which implementation in environment of the schematic simulator DesignLab is done in previous paper of the same authors [1]. Here most of the investigations are developed on MATLAB. The origin of the total error of the logarithmic ADC is explained in details. This error define the basic requirements to the parameters of the input amplifier. In its own aspect the sources of errors of the input amplifier are: the finite gain of Op Amp; the deviation of the gain; the temperature drift of the input voltage of asymmetry and the deviation of the resistors. The calculations of the input amplifier are made on the base of the specified by DesignLab mathematical model in the environment of MATLAB.

ИЗЛОЖЕНИЕ: Структурната схема на логаритмичен АЦП има следния вид (фиг. 1):

Входният сигнал се усилюва 10 пъти и на входа на логаритмичния усилвател постоянно напрежение е от 1V до 2V. На изхода се получава характеристиката на АЦП, която има неравномерна стъпаловидна форма.

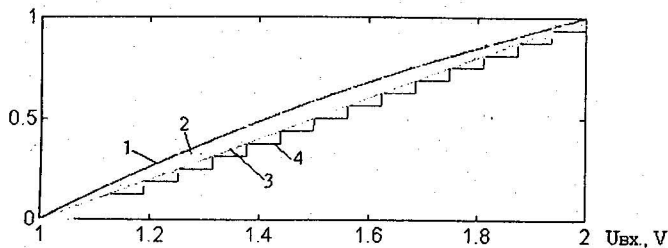


фиг.1. Структурна схема на логаритмичен АЦП с входен усилвател.

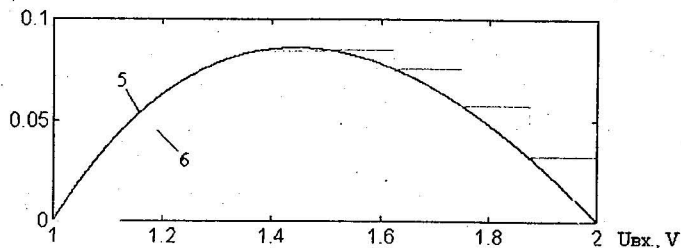
Принципа на преобразуването на линейния непрекъснат сигнал в логаритмичен стъпаловиден, заложен конкретно в този тип логаритмичен АЦП, е следния:

1. входният сигнал се преобразува от линеен АЦП;
2. изходния код на линейния АЦП отива и към цифров суматор и към адресните входове на паметта;
3. в паметта се съхраняват дискретизираните стойности на разликата на непрекъснатия логаритмичен (в граници от 0 до 1V) и непрекъснатия линеен сигнал (в същите граници);
4. стойностите, записани в паметта се сумират с линейния стъпаловиден сигнал и на изхода на преобразувателя се получава дискретизиран логаритмичен сигнал с определена грешка;
5. грешката зависи както от разрядността на линейния АЦП, така и от обема на паметта за корекция.

На фиг.2 е онагледен принципа на преобразуването за 4-разреден линейен АЦП и 8 стойности за корекция.



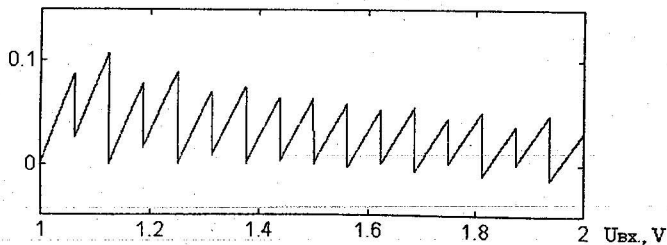
фиг.2а. Характеристика на АЦП при 16 нива на линейния АЦП и 8 стойности на корекцията: 1 – идеална логаритмична функция; 2 – изходен сигнал на Лог АЦП; 3 – идеална линейна функция; 4 – изход на линейния АЦП.



фиг.2б.Графики на корекцията:5–идеална коригираща функция; 6–дискретна коригираща функция.

Графика 1 на фиг.2 може да се получи като сума от графика 3 и графика 5 на фиг.2 и това може да се разглежда, като АЦП с безкрайно голям брой разряди. При краен брой разряди имаме реален изходен сигнал (графика 2), който се получава като сума от графика 4 и графика 6 на фиг.2. Очевидно щом двата сигнала са стъпаловидни и при това с различна стъпка на дискретизация то изходния сигнал ще има също начупена форма. Разликата между идеалния (графика 1 на фиг.2) и реалния сигнал (графика 2) представлява грешката от преобразуването и тя е показана на фиг.3.

От графиката на грешката се вижда, че тя има трионообразен вид и е с



фиг.3. Изходна грешка на логаритмичния преобразувател.

променлива амплитуда, която в началото на интервала е по-голяма, в края е по-малка, а около средата е най-малка. Това се дължи на особената форма на графика 1 от фиг.2б., която в началото расте бързо, малко преди средата спира да нараства и след това започва да намалява, но с по-малка скорост, отколкото при нарастването.

Фиг. 2 и 3 имат само илюстративен характер, който характер не биха имали графиките на необходимите в практиката 10-12 битови АЦП. Трябва да се отбележи още, че разглеждането се прави при идеален линеен АЦП, който в действителност също има някаква грешка. Но на първо време тази грешка не се отчита.

За да могат да се дефинират изискванията към входния усилвател трябва първо да се определи максималната стойност или размаха на грешката от фиг.3. При определянето на максималната стойност на грешката при голям брой битове на АЦП-то, резултатите от фиг.3 биха могли да бъдат много полезни. Например, от нея се вижда, че максималната стойност се получава между втората и третата стъпка на дискретизация. Изследването на грешката при 10 и 12 разрядно АЦП потвърждават това. Предварителната информация за това би спестило ненужно търсене на максимална грешка в други подинтервали от диапазона на

изменение на входния сигнал. От своя страна търсенето на минималната стойност би могло да се ограничи между предпоследните две стъпки на дискретизация.

Ограничаването

на интервала на търсене има две положителни страни: от една страна се получава малък изходен файл, а от друга – точността, с която се намира съответната стойност може да бъде значително увеличена, без това да натоварва прекалено ресурсите на компютъра.

В таблица 1 са дадени стойностите на максималната и минималната грешка при 10 и 12 битов АЦП (2-ра и 3-та колони, даващи броя на разределите и броя на нивата) и съответно по две стойности на броя на клетките на паметта за корекция - едната равна на нивата на линейния АЦП, а другата двойно по-малка (1-ва колона от таблицата). В 4-та колона се дава броя на точките, на които се разделя интервала [1;2], чиято реципрочна стойност дава приблизителна представа за точността, с която е извършено изчисляването на максималната абсолютна грешка - $\max(eg)$ и минималната абсолютна грешка - $\min(eg)$ (както се вижда от таблицата това особено важи за максималната грешка). Така например, ако сравним първи и втори ред се вижда, че до втория знак няма промяна, а при сравняването на втори и трети промяната е в четвъртия знак. В дейст-

Таблица 1

s table	n	2 ⁿ	p	мин. грешка, mV	макс. грешка, mV
512	10	1024	1,024.10 ⁶	-0.2716052219	1.8370469709
512	10	1024	1,024.10 ⁷	-0.2716052219	1.8383124935
512	10	1024	1,024.10 ⁸	-0.2716052219	1.8384390457
1024	10	1024	1,024.10 ⁶	0.0000000000	1.4067868848
1024	10	1024	1,024.10 ⁸	0.0000000000	1.4081803177
2048	12	4096	4,096.10 ⁶	-0.0679981376	0.4597763376
2048	12	4096	4,096.10 ⁸	-0.0679981376	0.4601248658
4096	12	4096	4,096.10 ⁶	0.0000000000	0.3518253458
4096	12	4096	4,096.10 ⁸	0.0000000000	0.3521739590

вителност точната стойност на максималната грешка може да се получи от следния израз:

$$\max(er) = 1/2^n + \max(\text{diff}(s_table_er)),$$

където n е броя на разредите на линейния АЦП;

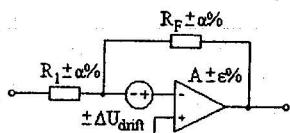
$\text{diff}(s_table_er)$ е функция в MATLAB [2], която дава разликата между съседните стойности на аргумента-вектор, който в случая е s_table_er и представлява вектора с корекциите, записани в паметта;

$\max(\text{diff}(s_table_er))$ е максималната стойност на горната разлика.

Получената по тази формула стойност за максималната грешка е 1.8384531071 mV, към която очевидно се приближава редът от стойностите в първи ред на таблицата. Но точността, с която се представя последната стойност е повече от удовлетворителна, а точната стойност дава само увереност в сходимостта на резултатите.

По-важно е, за какво се използва тази стойност. Тя определя какви да бъдат параметрите на входния усилвател, т.е. трябва да се търси такова техническо решение, което в най-лошия случай да дава отклонение в посока намаляване или нарастване, например, по-малко от половината от тази грешка.

Входният усилвател, който се изследва е представен на фиг.4.



фиг.4

ците на грешки са : отклонението от номинала на резисторите R_1 и R_F определящи усилването – $\pm\alpha\%$; температурния дрейф на нулата на ОУ – $\pm\Delta U_{\text{drift}}$; крайния коефициент на усилване на ОУ – A и разброса на усилването при различните екземпляри – $\pm\epsilon\%$. Изследването беше направено

на продукта DesignLab, с помощта на който бе уточнен математическия модел на целия усилвател, а резултатите от моделирането са получени в табличен вид, с помощта на MATLAB [2]. Изразите

$$U_{\text{out}} = \frac{A \left(1 \pm \frac{\epsilon\%}{100}\right) R_F \left(1 \pm \frac{\alpha\%}{100}\right) U_{\text{in}} + A \left(1 \pm \frac{\epsilon\%}{100}\right) (\pm \Delta U_{\text{drift}}) (R_F + R_1) \left(1 \pm \frac{\alpha\%}{100}\right)}{R_F \left(1 \pm \frac{\alpha\%}{100}\right) + \left[1 - A \left(1 \pm \frac{\epsilon\%}{100}\right)\right] R_1 \left(1 \pm \frac{\alpha\%}{100}\right)}; \quad (1)$$

$$U_{\text{out}} = \frac{A \cdot R_F \cdot U_{\text{in}}}{R_F + (1 - A) \cdot R_1} \quad (2)$$

представяват математическия модел на входния усилвател и дават зависимостта на изходното напрежение U_{out} от входното U_{in} . Формула (1) се използва при определяне на максималните и минималните отклонения на изходното напрежение, а формула (2) е за изчисляване на номиналната стойност на това напрежение. Ако се зададат 4 коефициента на усилване A : 100 dB, 114 dB, 120 dB и 134 dB, две стойности на отклонението на A : $\pm 50\%$ и $\pm 20\%$, три толеранса на резисторите: $\pm 0.01\%$, $\pm 0.005\%$ и $\pm 0.001\%$ и две стойности на температурния

дрейф на нулата: $\pm 10\mu\text{V}$ и $\pm 1\mu\text{V}$ [3] и се направят всички комбинации се получават по 48 резултата за отклоненията на идеалната изходна стойност в посока намаляване, в посока нарастване и при номинални стойности на величините (в последния случай единствения източник на грешки е крайния коефициент на усилване на ОУ). В таблица 2 са представени част от тези резултати.

Сравнявайки данните от таблица 1 и таблица 2 могат да се направят следните изводи:

1. При брой клетки на паметта за корекция - 512 и нива на линейния АЦП - 1024 биха могли да се изберат следните варианти на входен усилвател (разбира се, тук се дават само минималните изисквания, които не надхвърлят половината от максималната грешка, иначе всички случаи в таблица 2, без първия, удо-

Таблица 2

A, dB	$\pm \epsilon, \%$	$R_p, k\Omega$	$R_f, k\Omega$	$\pm \alpha, \%$	$\pm \Delta U_{\text{гр.}}, \mu\text{V}$	откл. в минус, mV	ном. откл., mV	откл. в плюс, mV
100	50	10	1	0.010	10.0	-0.3633	0.2200	0.9503
100	50	10	1	0.010	1.0	-0.2643	0.2200	0.8513
100	50	10	1	0.005	10.0	-0.1633	0.2200	0.7502
100	50	10	1	0.005	1.0	-0.0643	0.2200	0.6512
100	50	10	1	0.001	10.0	-0.0033	0.2200	0.5901
100	50	10	1	0.001	1.0	0.0957	0.2200	0.4911
100	20	10	1	0.010	10.0	-0.3267	0.2200	0.7852
100	20	10	1	0.010	1.0	-0.2277	0.2200	0.6862
100	20	10	1	0.005	10.0	-0.1267	0.2200	0.5851
114	50	10	1	0.010	10.0	-0.4806	0.0440	0.5981
114	50	10	1	0.005	1.0	-0.3816	0.0440	0.4991
114	50	10	1	0.001	10.0	-0.1207	0.0440	0.2380
114	50	10	1	0.001	1.0	-0.0217	0.0440	0.1390
114	20	10	1	0.010	10.0	-0.4733	0.0440	0.5651
134	50	10	1	0.010	10.0	-0.4000	0.0044	0.3158
134	50	10	1	0.005	10.0	-0.3070	0.0044	0.3188
134	50	10	1	0.005	1.0	-0.2081	0.0044	0.2198
134	50	10	1	0.010	10.0	-0.1433	0.0044	0.1590
134	20	10	1	0.005	10.0	-0.3063	0.0044	0.3155

Заб.: Отклоненията са получени спрямо идеалната стойност на изходното напрежение 2V, при входно напрежение 0.2 V.

влетворяват тези изисквания):

- усилване - 100 dB $\pm 50\%$; отклонение на резисторите от номинала - $\pm 0.01\%$; температурен дрейф на нулата - $\pm 1\mu\text{V}$ в работния температурен диапазон. В този случай максималното отклонение се получава в посока на нарастване е 0.8513 mV и е по-малко от половината на максималната грешка (1.8384 mV), което ни удовлетворява;

- друг вариант е увеличен дрейф на нулата - $\pm 10\mu\text{V}$, но по-малко отклонение на резисторите - $\pm 0.005\%$, всичко останало е еднакво. Тогава максималното отклонение е в същата посока и е с 0.1 mV по-малко от предходното.

- ако се избере такъв тип ОУ, който да има усилване - 100 dB, но с по-малко отклонение на отделните екземпляри - $\pm 20\%$, то тогава бихме постиг-

нали дори по-добри резултати от първи вариант (максимално отклонение 0.7852 mV), при занижени изисквания към дрейфа на нулата на ОУ - $\pm 10\mu\text{V}$;

2. При брой клетки на паметта за корекция - 1024 и нива на линейния АЦП - 1024 входния усилвател би могъл да има следните параметри (търси се – максимално отклонение по-малко от 1/2 от 1.4082 mV или по-малко от 0.7 mV):

- при избиране на най-малкото за усилване - 100 dB $\pm 50\%$ се вижда, че изискването не се удовлетворява при отклонение на резисторите $\pm 0.01\%$;

- ако усилването е същото, но отклонението е $\pm 20\%$, то тогава отклонението на резисторите би могло да бъде $\pm 0.01\%$, но дрейфа на нулата трябва да не е по-голям от $\pm 1\mu\text{V}$ – тогава отклонението е 0.6862 mV.

- при увеличаване на усилването 5 пъти, т.е. 114 dB, тогава отпада и строгото изискване за ниска стойност на дрейфа.

3. При 12 битов АЦП и 2048 броя клетки в паметта, необходимата точност е 0.23 mV или около 4 пъти по-голяма, отколкото в първа точка. Тя се удовлетворява при следните варианти на входния усилвател:

- очевидно минималното усилване трябва да е 114 dB и то в комбинация с най-малкия разброс на резисторите - $\pm 0.001\%$;

- ако се избере усилване 134 dB, то отклонението на резисторите може да се увеличи на $\pm 0.005\%$, но тогава се изисква минимален дрейф на нулата на ОУ.

4. При 4096 броя клетки на паметта за корекция и 4096 нива на линейния АЦП се търси усилвател с точност не по-малка от 0.175mV:

- такава точност не би могла да се получи при точност на резисторите по-малка от $\pm 0.001\%$, освен това ако се избере малко усилване на ОУ без обратна връзка (не по-малко от 114 dB) тогава дрейфа на нулата трябва да е $\pm 1\mu\text{V}$. Ако това изискване е твърде тежко за изпълнение, този дрейф би могъл да се увеличи, но за сметка на по-голямо усилване на ОУ – минимум 134 dB.

ИЗВОДИ: Увеличаването на разредността на разгледания вид логаритмични АЦП до 14-16, води до изключително високи изисквания към точността на резисторите и ОУ на входния усилвател. Такива елементи може дори да не съществуват все още, но това е едно предизвикателство към конструкторите да създават усилватели с параметри приближаващи се до тези на идеалния.

Библиография:

- [1] Stefanova, K., E. Gadjeva, Behavioral Computer Modelling of A/D Converters Using General Purpose Analysis Programs, Electronics '99 – Proceedings of the Conference – book 2, September 23-25, 1999, Sozopol, pp. 146-151.
- [2] Biran, A., M. Breiner, MATLAB for Engineers, Addison – Wesley Publishing Company, 1996.
- [3] Хоровиц, П., У. Хилл, Искусство схемотехники, Т. 1, М., Мир, 1993.
- [4] Соклоф, С., Приложения на аналогови интегрални схеми, С., Техника, 1990.