

известно време на закъснение t_d зависи от инерционността на операционния усилвател, изходното напрежение става като това, на идеален интегратор или след времето на закъснение t_d реалната изходна характеристика е успоредна на идеалната [1].

За минимизиране на грешките в интегрирането е необходимо ограничаване на изходния честотен диапазон отдолу за осигуряване на съотношението: $f \ll kRC$ [1]. От друга страна с повишаването на честотата на входния сигнал влияние оказват две неща. Първо, оказва влияние инерционността на интегратора и второ, намаляването на неговия коефициент на усилване, поради делителя на изхода, съставен от изходното съпротивление на ОУ и реактивното съпротивление на интегриращия кондензатор.

Изходното напрежение на интегратора в устройството се определя по следната зависимост [1]:

$$V_I(t) = V_{\text{пр}}(t) + \frac{\tau_{\text{out}}}{\tau} \Delta V_0 = V_{\text{пр}} + \frac{r_{\text{out}}}{r} \Delta V_0 \quad (1)$$

$V_I(t)$ - изходно напрежение на интегратора в момента t ;

$\tau_{\text{out}} = r_{\text{out}} C$ - времеконстанта на изходното инерционно звено на интегратора;

r_{out} - изходно съпротивление на операционния усилвател;

$\tau = R_I C$ - номинална времеконстанта на интегриране;

$V_{\text{пр}}$ - праг на сработване на компаратора;

ΔV_0 - изменение на изходното напрежение на компаратора.

Реакцията на реалния интегратор, вследствие на чистото закъснение t_d на интегратора довежда до изменение на изходната честота f^* на преобразувателя:

$$f^* = \frac{1}{T^*} = \frac{1}{T + 4t_d} \quad (2)$$

Изходното напрежение на интегратора V_{out} във времето t при нулеви начални условия и при скок на входното напрежение от 0 до V_{IN} се определя по следната формула [1]:

$$V_{\text{OUT}}(t) = -kV_{\text{IN}} \left(1 - e^{-\frac{t}{k\tau}} \right) + V_{\text{IN}} \frac{\tau_0 + \tau_{\text{OUT}}}{k\tau} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0/k}} \right) + V_{\text{IN}} \frac{\tau_{\text{OUT}}}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau_0/k}} \quad (3)$$

където:

- V_{IN} е входното напрежение на интегратора;

- k – коефициент на усилване на ОУ;

- τ_0 - времеконстанта на изходното безинерционно звено на интегратора или времеконстанта на единичното усилване на ОУ.

Във формулата (3) преходната характеристика на интегратора се състои от три части. Първата част практически представлява характеристиката на идеален интегратор, втората е от вида на неидеално интегриращо звено от първи ред и третата на неидеално диференциращо звено от първи ред. Определянето на t_d се извършва чрез полагане на $t = t_d$, $V_{\text{OUT}}(t_d) = 0$ и решаване на уравнението за определен период от време, който зависи най-вече от продължителността на преходния процес, респективно стойностите на времеконстантите.

2. Входни данни за извършване на моделирането.

За извършване на моделирането е необходимо избор на операционен усилвател, стойности на дискретните елементи в интегриращите звена и изчисляване на времеконстантите.

За операционния усилвател LF356 в състава на интегратора се определят [3]:

$$\tau_I = R_I C_I = 2 \cdot 10^{-5} \text{ s}; \quad \tau_{OUT} = r_{out} C_I = 3,979 \cdot 10^{-3} \text{ s}; \quad \tau_0 = \frac{k}{2\pi f_1} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

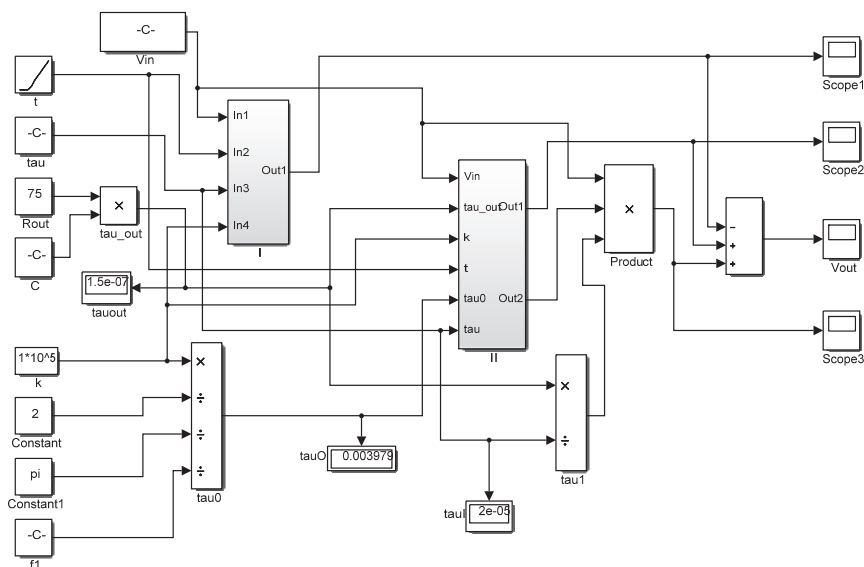
$$R_I = 10k\Omega, \quad C_I = 2nF, \quad f_1 = 4\text{MHz}, \quad r_{out} = 75\Omega, \quad k = 10^5$$

Максималната стойност на входното напрежение е:

$$V_{IN \max} \leq \frac{V_{out \max} (R_I + r_{out})}{r_{out} k} \leq 5,373 \text{ mV} \quad (4)$$

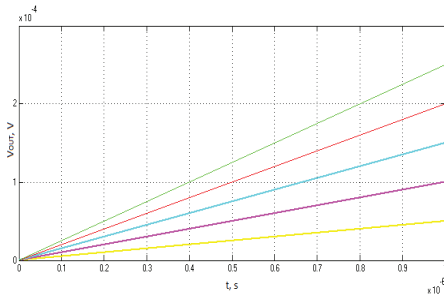
3. Моделиране на грешката от закъснението при превключване на интегратора

На фиг.2. е показано моделирането на формула (3) в MATLAB. Първата част от уравнението е моделирана в Subsystem I, а втората и третата в Subsystem II. За определяне на влиянието на входните напрежения на времезакъснението са зададени входни напрежения от 1 до 5 mV, съгласно (4), със стъпка 1mV- (блок V_{in}). Преходният процес се изследва за време 10^{-6} s, със стъпка 10^{-12} s.

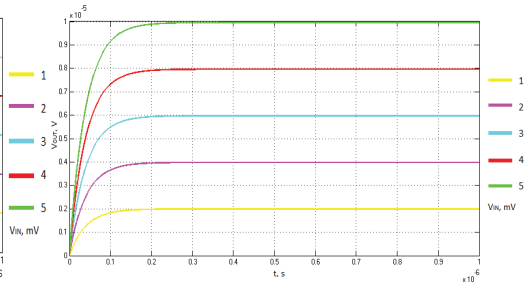


Фиг.2. Моделиране работата на интегратора в състава на преобразувателя

Визуализирани са трите компонента на уравнението на интегратора - V_{out1} (Scope1); - V_{out2} (Scope2); - V_{out3} (Scope3) и изходното напрежение V_{out} . Първото напрежение V_{out1} е получено от първата част на уравнение (3), V_{out2} от втората част на уравнение (3) и V_{out3} от третата част на уравнение (3). Изходното напрежение на интегратора V_{out} представлява сумиране на моментните стойности на трите напрежения във функция на времето t .

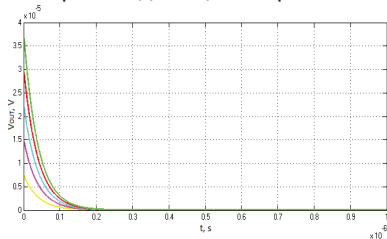


Фиг.3 Графична зависимост $V_{out1}=f(t)$

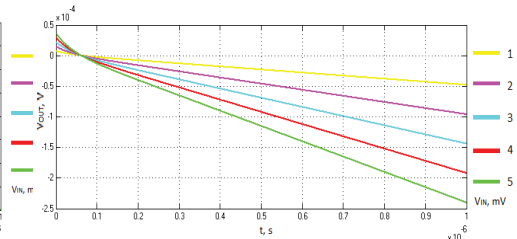


Фиг.4. Графична зависимост $V_{out2}=f(t)$

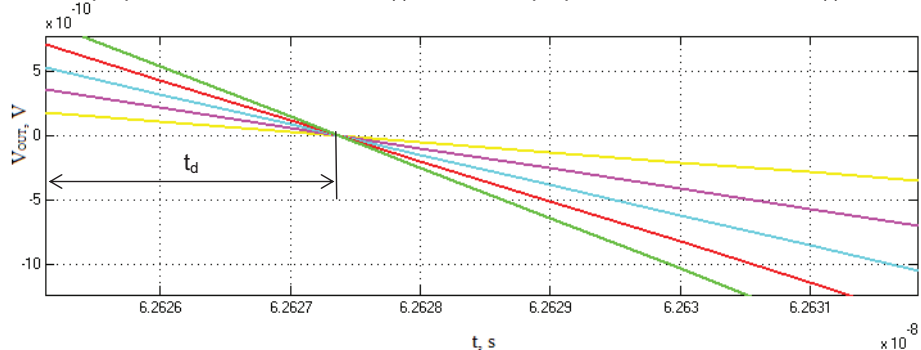
От времедиаграмите (фиг. 3 и 4) се вижда, че в момента на включване на входното напрежение (при $t = 0$), на изхода на интегратора, първите два члена от уравнението на интегратора са нула, а третият член определя стойността на изходното напрежение- фиг. 5. След известно време напрежението на изхода на интегратора ще се изменя по същия закон, както при интегратора с безинерционен ОУ, но с известно закъснение t_d - фиг. 6. Точното определяне на времезакъснението на изходното напрежение t_d се извършва по графиката на фиг. 7 и представлява времето за първоначалното нулиране стойността на изходното напрежение и съответното му нарастване във времето. На графиките фиг. 6 и 7 ясно се вижда, че входните напрежения **не** влияят на времето на закъснението t_d и то може да бъде определено като константна величина за съответния операционен усилвател, влизащ в състава на интегратора с отчитане стойностите на дискретните елементи във времезадаващите вериги.



Фиг.5. Графична зависимост $V_{out3}=f(t)$



Фиг.6. Графична зависимост $V_{out}=f(t)$

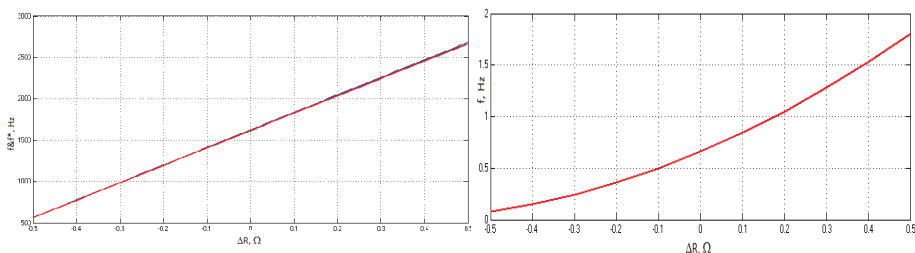


Фиг.7. Определяне на времезакъснението t_d на ОУ LF356

За операционният усилвател LF356 се получава стойността $t_d=6,26274 \cdot 10^{-8}$ s, което е 62,6274 ns. С тази стойност ще бъде моделирано влиянието на закъснението на интегратора в състава на преобразувателя. Времезакъснението е получено при 10^6 итерации, всяка от които с продължителност от 10^{-12} секунди при обща продължителност на изследвания преходен процес 10^{-6} s.

Важно е да се отбележи бързият преход на експоненциалната функция V_{out3} (Скоре3) до нула– фиг.5 и линейното нарастване на изходното напрежение, което е важно условие за очакваната висока линейност на преобразувателя, формираща се от всички блокове - фиг. 7.

На фиг. 8 е са визуализирани основната честота и получената честота с отчитане влиянието на закъснението t_d . На фиг. 9 е дадена абсолютната грешка от влиянието на закъснението на интегратора в състава на преобразувателя.



Фиг.8 Графични зависимости $f(\Delta R)$ и $f^*(\Delta R)$ Фиг.9 Графична зависимост $f(\Delta R) - f^*(\Delta R)$

$R_{11}/R_{13}, \Omega$	f, Hz	f^*, Hz	f_{out_lin}, Hz	$\gamma_{lin}, \%$
1	2	3	4	5
99,5/100,5	564,9718	564,8918	564,8918	0
99,6/100,4	776,8362	776,6850	776,58391	-0,01301837
99,7/100,3	988,7006	988,4557	988,27602	-0,01818533
99,8/100,2	1200,5650	1200,2040	1199,9681	-0,02387114
99,9/100,1	1412,4294	1411,9298	1411,6602	-0,01909477
100,0/100,0	1624,2938	1623,6331	1623,3524	-0,01729568
100,1/99,9	1836,1582	1835,3140	1835,0445	-0,01468764
100,2/99,8	2048,0226	2046,9724	2046,7366	-0,01152183
100,3/99,7	2259,8870	2258,6084	2258,4287	-0,00795527
100,4/99,6	2471,7514	2470,2219	2470,1208	-0,00409112
100,5/99,5	2683,6158	2681,8129	2681,8129	0

Таблица 1. Симулационни резултати

В таблица 1 са дадени изчислените стойности на изследваните параметри. В колона 1 е дадено съпротивлението на датчиците, свързани диференциално, в колона 2- получената честота във функция от изменението на съпротивлението на датчиците, в колона 3 - коригираната честота с отчитане времезакъснението на интегратора. В колона 4 са изчислени съответните точки от линеаризиращата права f_{out_lin} , прекарана между първата и последната точки на изходната честота f^* . В колона 5 е изчислена приведената грешка от нелинейност по формула (5):

$$\gamma_{lin} = \frac{f_{out} - f_{out_lin}}{f_{out_max} - f_{out_min}} 100\% \quad (5)$$

От таблица 1 се отчита максимална абсолютна грешка от порядъка на 1,81Hz и максимална относителна грешка 0,0695%. Максималната приведена грешка от нелинейност е 0,0238%.

Потискането на тези грешки е невъзможно, тъй като те зависят основно от бързодействието на операционния усилвател и могат да бъдат намалени само чрез използването на ОУ с по-добри параметри.

За сравнение, интегратора е моделиран с операционен усилвател с честота на единичното усилване $f_1 = 0,55$ MHz от вида AD8622, AD8624. Получената стойност на времеконстантата t_d е 238,832 ns. Отчита се максимална абсолютна грешка 6,78 Hz, или 3,5 пъти повече в сравнение с по-добрият LF356 [3], [4].

Последващо увеличаване на единичната честота на усилване f_1 , с цел намаляване на грешките не е икономически оправдано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изводи от моделирането на интегратор в състава на преобразувател:

1. Моделирано е уравнението на интегратора за определяне на времезакъснението при работа в динамичен режим. На базата на този модел може да се определи с голяма точност чистото закъснение на реален операционен усилвател, свързан в схема на интегратор.

2. Доказано е, че стойностите на входното напрежение на интегратора в определен диапазон не влияят на чистото закъснение от инерционността на операционния усилвател.

3. При работа с операционни усилватели с честота на единичното усилване $f_1 > 4$ MHz, грешката от нелинейност е под 0,03% и на практика може да се пренебрегне.

4. Моделирането на преобразувателя би спомогнало за по-добрия подбор на операционен усилвател и дискретни компоненти с цел намаляване на грешките до възможно минимални стойности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гигов Хр., Измервателна електроника, 2013, ТУ- Варна ;
- [2] Стоянов Св., Станков Ст., Гигов Хр., Метрологичен анализ на преобразувател за тензомост с честотен изход, СУ-Варна, 2012, сп. „Известия на съюза на учените”, бр.1, 2012, стр. 90 – 93;
- [3] <http://www.analog.com/en/ad8622-4/products/product.html>, Datasheet;
- [4] <http://www.ti.com/product/lf356>, Texas Instruments, Datasheet, LF356;
- [5] Stoyanov S., A Linear converter of strain gauge bridge bidirectional disbalance into frequency deviation, списание “E+E”, бр.3-4, стр. 21-26, 2014.

За контакти:

Гл.ас.инж. Свилен Христов Стоянов, Добруджански технологичен колеж в структурата на ТУ-Варна, тел. 058604712, E-mail: svilen.stoyanov@tu-varna.bg

Гл.ас.д-р инж. Владимир Георгиев Демирев, Добруджански технологичен колеж в структурата на ТУ-Варна, тел. 058604712, E-mail: vl.demirev@abv.bg

инж. Станимир Красимиров Станков, ТУ-Варна, тел. 0883303504, E-mail: stankov@tu-varna.bg

Докладът е рецензиран.