

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SET OF PRECISE U/I AND I/U CONVERTERS FOR TRANSMISSION OF ANALOGUE SIGNALS ON LONG DISTANCES

Valentina Markova, Technical university of Varna, via@tu-varna.bg

Abstract: The purpose of this paper is to be designed and realized a set of precise converters U/I and I/U. characterized with linear shape of the transformation function and high level of stability with regard to the deviations of the supplied voltages. The proposed solution is comparably simpler and much cheaper than the existing on the market similar devices. It gives an opportunity for separate settings for the minimum and the maximum value of the measuring range. The proposed set of converters is very suitable for implementation in cases of data collection systems.

Ключови думи: I/U converter, U/I converter, 0 – 20 mA, 4 – 20 mA current inputs.

ПРОЕКТИРАНЕ И РЕАЛИЗИРАНЕ НА КОМПЛЕКТ ПРЕЦИЗНИ U/I И I/U ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЗА ПРЕДАВАНЕ НА АНАЛОГОВИ СИГНАЛИ НА ГОЛЕМИ РАЗСТОЯНИЯ

Валентина Маркова, Технически университет Варна, via@tu-varna.bg

Абстракт: Целта на този доклад е да се проектира и реализира комплекс прецизни преобразуватели „напрежение-ток” и „ток-напрежение”. Преобразувателите се характеризират с много голяма линейност на преобразователната функция и с висока стабилност по отношение на колебанията на захранващите напрежения. Предложеното решение е сравнително просто и много по-евтино от предлаганите на пазара подобни устройства. Има възможност за прецизна самостоятелна настройка на минималната и максимална стойност на измервателния обхват. Предложеният комплекс преобразуватели са много подходящи за използване при системи за събиране на данни.

Ключови думи: преобразуватели „напрежение–ток“ и „ток–напрежение“, стандарт за токов изход 0 – 20 mA и 4 – 20 mA, шумозащитеност на вериги

Въведение

Системите за събиране на данни са съставени от сензори, преобразуватели, мултиплексори и крайни устройства за съхранение и обработка на информация. Сензорите преобразуват физическите величини в електрически сигнали, най-често постоянни напрежения. За намаляване на грешката, предизвикана от свързващите проводници, при предаване на големи разстояния, се препоръчва преобразуване на изходното напрежение от сензорите в ток. При протичане през входната верига на приемното устройство, този ток се преобразува отново в напрежение, пропорционално на тока, т.е. и на първичното напрежение.

Използват се различни стандарти за т. нар. „токов изход”. При изменение на входното напрежение към преобразувателя от 0 до 10 V, най-често се използват стандартите за изходен ток 0 – 20 mA и 4 – 20 mA.

Разработена е схема на преобразувател „напрежение – ток” [1], при който изходният ток се изменя от 0 до 20 mA, при изменение на входното напрежение от 0 до 2 V. Схемата осигурява много добра линейност на предавателната функция, но е със сравнително ниска шумозащитеност.

За повишаване на шумозащитеността и даване възможност за сигнализация при прекъсната връзка, се препоръчва стандартът за изходен ток 4 – 20 mA. Разработени са схеми за промишлени приложения [2, 3, 4, 5], в които се използва външен източник на захранващо напрежение, което може да се изменя в широки граници. За осигуряване на висока стабилност на изходния ток на преобразувателя, в схемата се включва допълнителен прецизен стабилизирани изправител. В някои от тези схеми [6] се използват и специализирани интегрални схеми (XTR115, XTR116), с които се постига по-голяма стабилност на изходния ток. Описаните преобразуватели са сравнително сложни и не е предвидена възможност за настройка.

В приемната страна, при използване на стандарта 0 – 20 mA за преобразуване на тока в напрежение, се използва само 1 прецизен резистор. При използване на стандарта 4 – 20 mA се използват сравнително сложни схемни решения [7, 8], без или с ограничена възможност за настройка на обхвата.

Целта на настоящата публикация е да се разработи *комплект преобразуватели* „напрежение-ток” и „ток-напрежение”, които да се използват за свързване на сензори с аналогов (напрежителен) изход към входовете на проектираната в [1] система за събиране на данни.

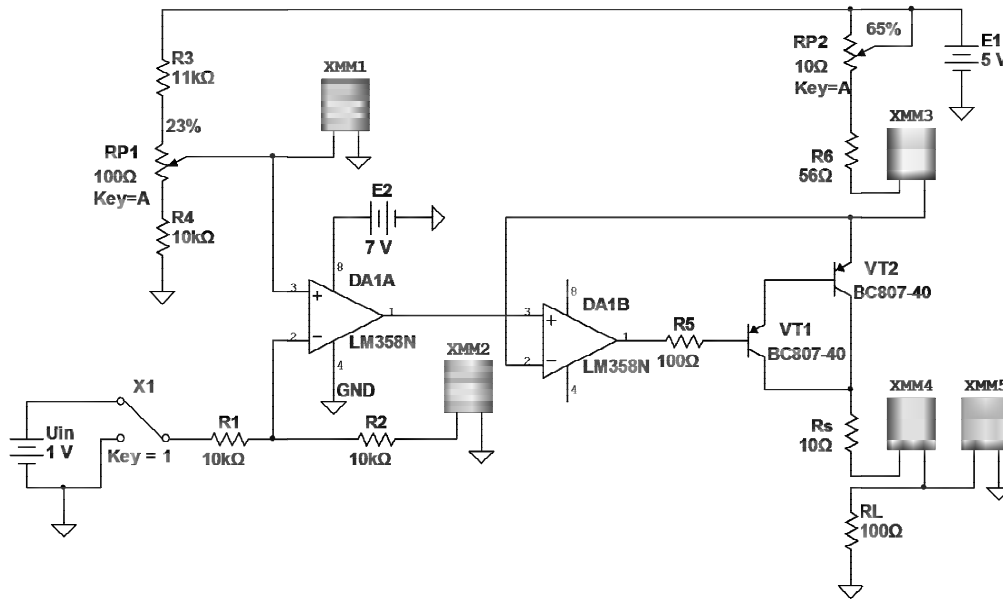
Проектираният преобразувател „напрежение-ток” преобразува входно напрежение, изменящо се от 0 до 1 V (0 до 10 V), в изходен ток, изменящ се от 4 до 20 mA. Вторият преобразува входния ток, изменящ се от 4 до 20 mA, в напрежение, изменящо се от 0 до 2 V. Това осигурява повишаване на шумозащитеността на веригата при предаване на полезен сигнал.

Разработените схеми са симулирани предварително с помощта на програмния продукт Multisim. След настройката на всяка от схемите, уточняване на стойностите на използваните компоненти и извършените изследвания, са синтезирани практическите схеми на преобразувателите. Всяка от тях е изследвана и резултатите са сравнени с тези от симулациите. Изследванията са извършени по отношение на линейността на преобразувателите и нестабилността им, във функция от захранващите напрежения.

1. Проектиране и реализиране на преобразувател „напрежение – ток”

2.1. Изследвания чрез симулации

Симулираната принципна схема преобразувател „напрежение – ток” е дадена на фиг.1. Изменението на входното напрежение от 0 до 1 V предизвиква изменение на изходния ток от 4 до 20 mA. При по-широк диапазон на изменение на входното напрежение, например от 0 до 10 V, на входа може да се добави делител на напрежение.



Фиг.1. Преобразувател „напрежение-ток” при $U_{in} = 0 V$

Напрежението на изхода на първото стъпало, изпълнено с операционния усилвател $DA1A$ по схема на диференциален усилвател, е:

$$U_{outDA1A} = -U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1} + U_{ref} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad [V] \quad (1)$$

където: V_i е напрежението на входа на преобразувателя.

$$U_{ref} = E_1 \cdot \frac{R_4 + b \cdot RP_1}{R_3 + RP_1 + R_4} \quad [V] \quad (2)$$

е опорното стабилизирано напрежение, необходимо за „отместване” на изходното напрежение на $DA1A$, така че изходният ток да има стойност $I_{out} = 4 \text{ mA}$, при входно напрежение $U_{in} = 0 V$, където b е частта на потенциометъра $RP1$ между плъзгача му и резистора $R4$.

Второто стъпало, изпълнено с операционния усилвател $DA1B$ и съставния транзистор ($VT1$ и $VT2$), представлява „преобразувател „напрежение-ток”, Напрежението между неинвертиращия вход на $DA1A$ - $U_{outDA1A}$ и захранващото напрежение E_1 , се преобразува в ток през товарния резистор R_L :

$$I_{out} = \frac{E_1 - U_{outDA1A}}{RP_2 + R_6} \quad [A] \quad (3)$$

Стойността на токоопределящия резистор ($RP_2 + R_6$) се определя с израза:

$$RP_2 + R_6 = \frac{E_1 - U_{outDA1A}}{I_{out}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

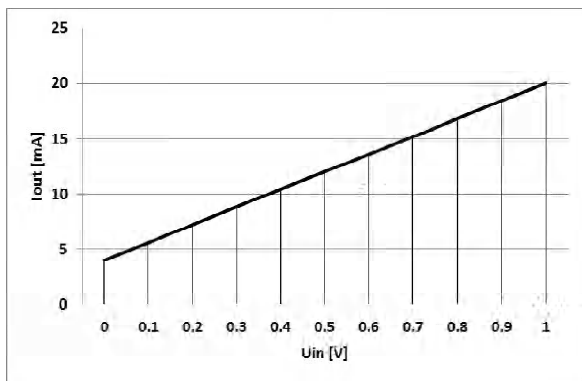
За получаване на изходен ток $I_{out} = 20 \text{ mA}$, при захранващо напрежение $E_1 = 5 V$, е избрана стойност за $U_{outDA1A} = 3,7 V$. За тази стойност $RP_2 + R_6 = 65 \Omega$. Използват се последователно свързани постоянен резистор $R_6 = 56 \Omega$ и донастройващ потенциометър $RP_2 = 10 \Omega$.

За получаване на изходен ток $I_{out} = 4 \text{ mA}$, при входно напрежение $U_{in} = 0 V$, напрежението на плъзгача на потенциометъра $RP1$ трябва да има стойност $U_{in} = 2,35 V$.

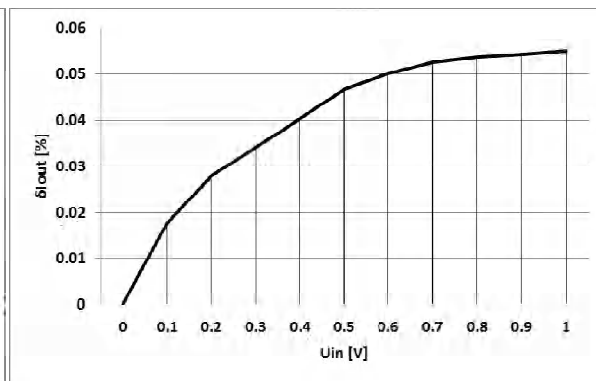
Стойността на $I_{out} = 4 \text{ mA}$ се настройва с потенциометъра RP_1 , а тази на $I_{out} = 20 \text{ mA}$ - с потенциометъра RP_2 . Настройките се повтарят няколкократно, до достигане на желаната точност.

2.1.1. Изследване на линейността на схемата на преобразувателя

Направени са изследвания на линейността на схемата на преобразувателя, при захранващо напрежение $V_{CC} = E_1 = 5 \text{ V}$. На *фиг.2* е представена графично зависимостта на изходния ток от входното напрежение $I_{out} = \varphi(U_{in})$. Резултатите показват, че линейността на преобразувателя е много добра, а относителната грешка $\delta_{I_{out}}$ (*фиг.3*) е изключително ниска - не надвишава 0,055 %.



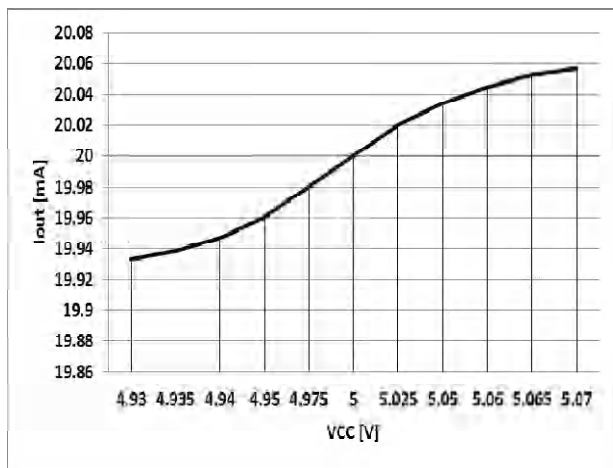
Фиг.2. Зависимост $I_{out} = \varphi(U_{in})$



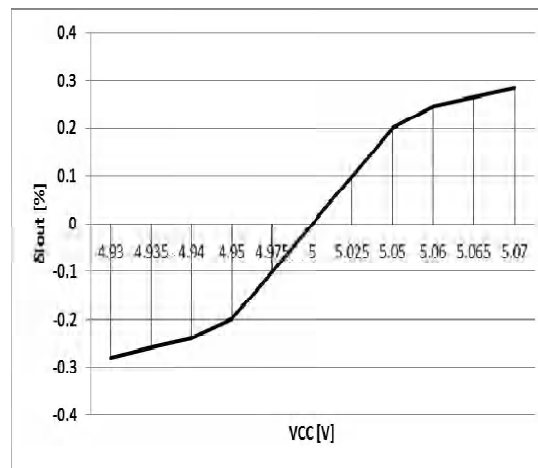
Фиг.3. Зависимост $\delta_{I_{out}} = \varphi(U_{in})$

2.1.2. Изследване на нестабилността на схемата на преобразувателя от изменението на захранващото напрежение

Изследвана е и нестабилността на схемата на преобразувателя от изменението на захранващото напрежение. Резултатите от изследванията на изменението на изходния ток I_{out} във функция на изменението на захранващото напрежение V_{CC} , при постоянно входно напрежение $V_i = 1 \text{ V}$, са дадени в на *фиг. 4* и *фиг. 5*.



Фиг.4. Зависимост $I_{out} = \varphi(V_{CC})$



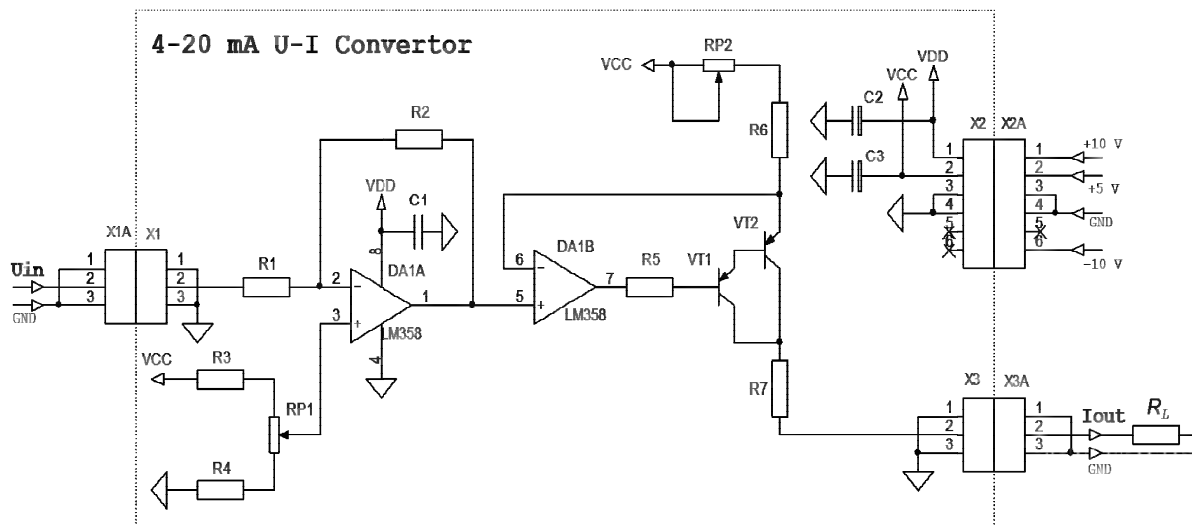
Фиг.5. Зависимост $\delta_{I_{out}} = \varphi(V_{CC})$

При изменение на захранващото напрежение V_{CC} с $\pm 4 \%$, което е характерно за масово използваните стабилизатори на напрежение, относителната грешка $\delta_{I_{out}}$ се изменя с по-малко от 0,3%. За това е препоръчително използването на високо стабилизирано

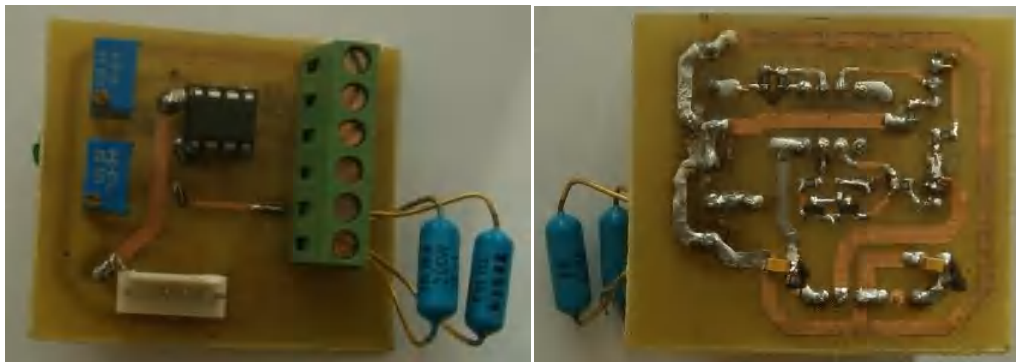
напрежение, с нестабилност под 0,5%, при което относителната грешка $\delta_{I_{out}}$ се изменя с по-малко от 0,1 %.

2.2. Експериментални изследвания върху реализирано устройство

Реализираната принципна схема на преобразувателя „напрежение – ток” е дадена на фиг.6. Основните компоненти са разположени върху една печатна платка и се свързват с останалите през три съединителя. Входното напрежение се подава през съединителя X1. Изходният ток се пропуска през съединителя X3 към резистор със съпротивление $R_L = 100 \Omega$ и създава напрежение U_{out} , пропорционално на този ток. Изменението на входното напрежение U_{in} от 0 до 1 V предизвиква изменение на изходния ток I_{out} от 4 до 20 mA. Захранващите напрежения се свързват към схемата през съединителя X2. На фиг.7 е показана монтираната печатна платка на реализирания модул.



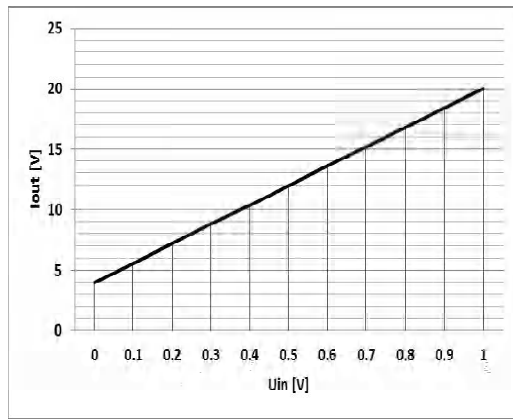
Фиг.6. Преобразувател „напрежение-ток”



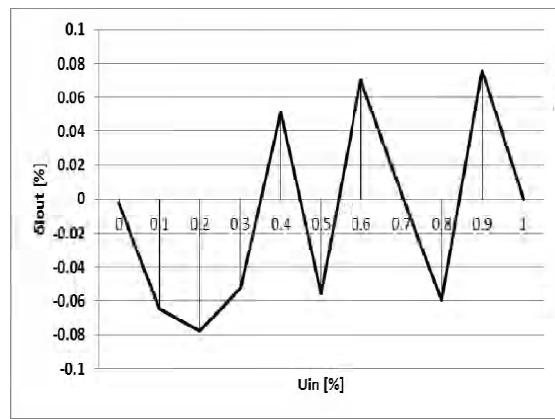
Фиг.7. Печатна платка на модула „напрежение-ток”

2.2.1. Изследване на линейността на схемата на преобразувателя

На фиг.8 са представени графично резултатите от изследванията на линейността на схемата на преобразувателя, при захранващо напрежение $V_{CC} = E_1 = 5 \text{ V}$. Резултатите отговарят на очакванията. Линейността на преобразувателя е много добра. Относителната грешка $\delta_{I_{ou}}$ (фиг.9) е изключително ниска - не надвишава 0,08 %.



Фиг.8. Зависимост $I_{out} = \varphi (U_{in})$

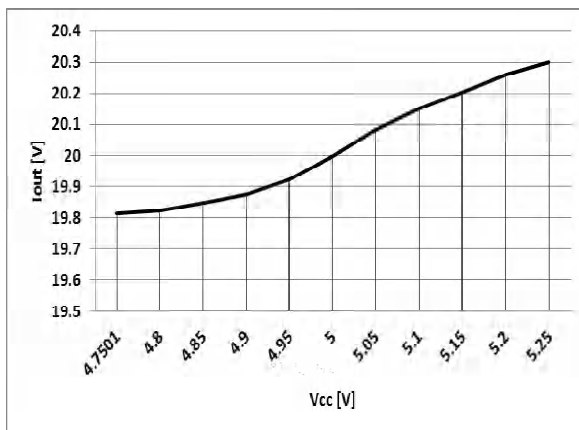


Фиг.9. Зависимост $\delta I_{out} = \varphi (U_{in})$

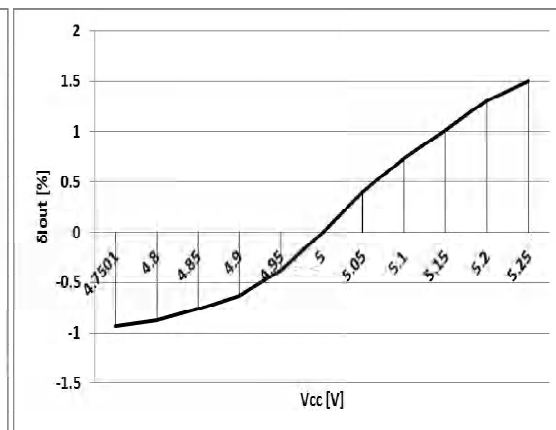
Измерените реални стойности на изследваните величини са много близки до тези на симулираните схеми.

2.2.2. Изследване на нестабилността на схемата на преобразувателя от изменението на захранващото напрежение

Резултатите от изследванията на изменението на изходния ток I_{out} , във функция от изменението на захранващото напрежение V_{CC} , при постоянно входно напрежение $V_i = 1 V$, са представени графично на фиг.10. При изменение на захранващото напрежение с $\pm 4\%$, нестабилността δI_{out} се изменят с по-малко от 1,3 % (фиг.11).



Фиг.10. Зависимост $I_{out} = \varphi (V_{CC})$



Фиг.11. Зависимост $\delta I_{out} = \varphi (V_{CC})$

При използване на високо стабилизирано захранващо напрежение, с нестабилност под 0,5 %, относителната грешка δI_{out} ще се изменя само с 0,2 %. Може да се използва интегралната схема MCP1252, която е с типична нестабилност на изходното напрежение $\pm 0.5\%$, или ADR02, с типична нестабилност на изходното напрежение $\pm 0.05\%$, която е значително по-скъпа.

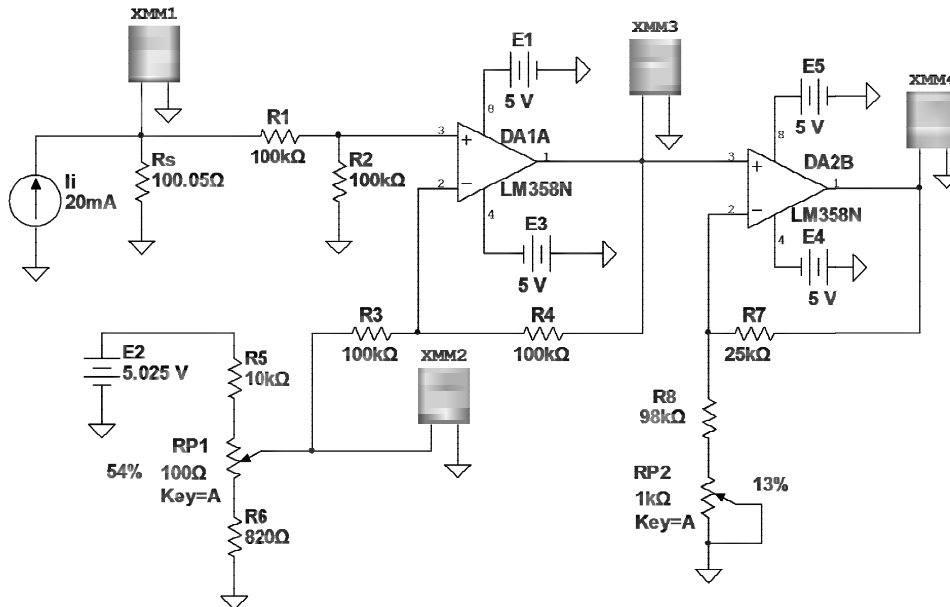
3. Проектиране и реализиране на преобразувател „ток – напрежение”

Схемата е предназначена за преобразуване на постоянния ток във входната верига в постоянно напрежение на изхода. Разработена е принципна схема на преобразувател „ток – напрежение”, позволяваща използването на два обхвата за изменение на входния ток: от 0 до 20 mA и от 4 до 20 mA. Обхватът на изменение на изходното напрежение е от 0 до 2 V.

3.1. Изследвания чрез симулации

Симулираната принципна схема, при входен $I_i = 4 \text{ mA}$, е дадена на фиг.12.

Входният ток протича през резистора R_S , включен паралелно на входните клеми. При изменение на тока I_i от 4 до 20mA напрежението върху резистора се изменя от 0,4 до 2V.



Фиг.12. Преобразувател „ток - напрежение” при $I_i = 4 \text{ mA}$

Напрежението на изхода на първото стъпало, изпълнено с операционния усилвател $DA1A$ по схема на диференциален усилвател, е:

$$U_{outDA1A} = I_i \cdot R_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - U_{ref} \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad [\text{V}] \quad (5)$$

където:

$$U_{ref} = E_2 \cdot \frac{R_6 + b \cdot RP_1}{R_5 + RP_1 + R_6} \quad [\text{V}] \dots \quad (6)$$

е опорното стабилизирано напрежение, необходимо за „отместване” на изходното напрежение на $DA1A$, така че при входен ток $I_i = 4 \text{ mA}$ изходното напрежение да има стойност $U_{out} = 0 \text{ V}$,

Стойността на резистора R_S се определя така, че стойността на входното съпротивление на схемата:

$$R'_S = \frac{R_S \cdot (R_1 + R_2)}{R_S + R_1 + R_2} \quad (7)$$

да има стойност $R'_S = 100 \Omega$.

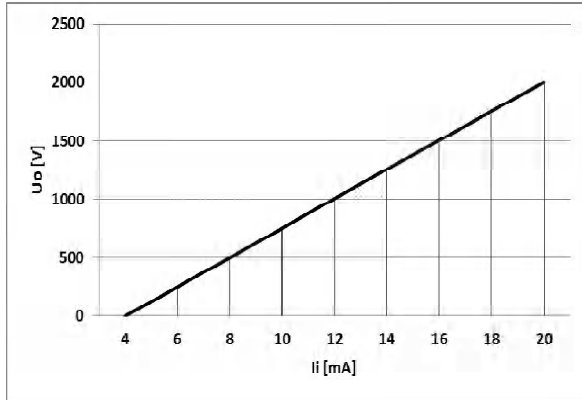
Второто стъпало, изпълнено с операционния усилвател $DA2B$, е неинвертиращ усилвател с коефициент на усилване по напрежение $K_U = 1,25$. Изходното му напрежение е:

$$U_{outDA2B} = U_{outDA1A} \cdot \left(1 + \frac{R_8 + RP_2}{R_7 + RP_2 + R_8} \right) \quad [\text{V}] \quad (8)$$

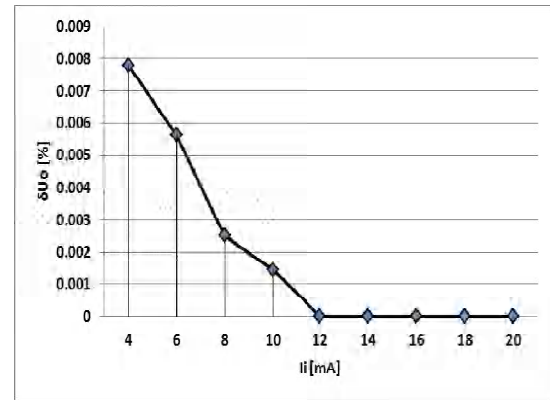
С помощта на потенциометъра RP_1 се настройва стойността на изходното напрежение на схемата да бъде $U_{out} = 0 \text{ V}$, при входен $I_i = 4 \text{ mA}$. С потенциометъра RP_2 се настройва стойността на изходното напрежение на схемата да бъде $U_{out} = 2 \text{ V}$, при входен $I_i = 20 \text{ mA}$. Настройките се повтарят няколкократно, до достигане на желаната точност.

3.1.1. Изследване на линейността на схемата на преобразувателя

На фиг.13 е представена графично зависимостта на изходното напрежение от входния ток $U_o = \varphi(I_i)$. Изследванията са извършени при захранващи напрежения: $+E = E_1 = E_5 = 5V$, $--E = E_3 = E_4 = -5V$. Линейността на преобразувателя е много добра. Нестабилността δ_{Iou} е изключително ниска - не надвишава 0,008 % (фиг.14). Трябва да отбележим, че при входен ток I_i над 12 mA, относителната грешка става практически 0.



Фиг.13. Зависимост $U_o = \varphi(I_i)$



Фиг.14. Зависимост $\delta_{U_o} = \varphi(I_i)$

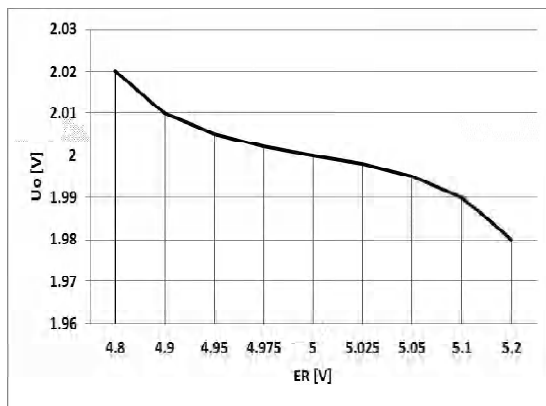
3.1.2. Изследване на нестабилността на схемата на преобразувателя от изменението на захранващите напрежения

При направените изследвания на нестабилността на схемата този преобразувател се установи, че изходното напрежение не се изменя ($U_{out} = 2V = const$), при изменение на захранващите напрежения в широки граници:

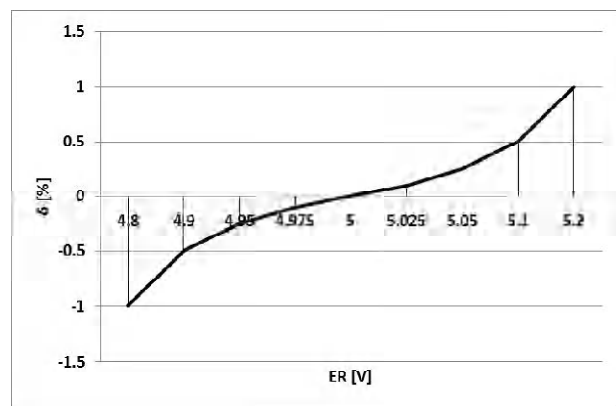
$$+E = E_1 = E_5 = + (4,8 \div 5,5) V;$$

$$--E = E_3 = E_4 = - (4,7 \div 5,4) V.$$

Нестабилността на преобразувателя зависи само от изменението на опорното напрежение $E_R = E_2$. Затова са направени изследвания на нестабилността на схемата по отношение на изменението на захранващите напрежения на операционния усилвател. На фиг.15 е представена графично зависимостта $U_o = \varphi(E_R)$, при захранващи напрежения $+E = E_1 = E_5 = 5V$, $--E = E_3 = E_4 = -5V$ и входен ток $I_i = 20 mA$, а на фиг.16 – зависимостта $\delta_{U_o} = \varphi(E_R)$.



Фиг.15. Зависимост $U_o = \varphi(E_R)$

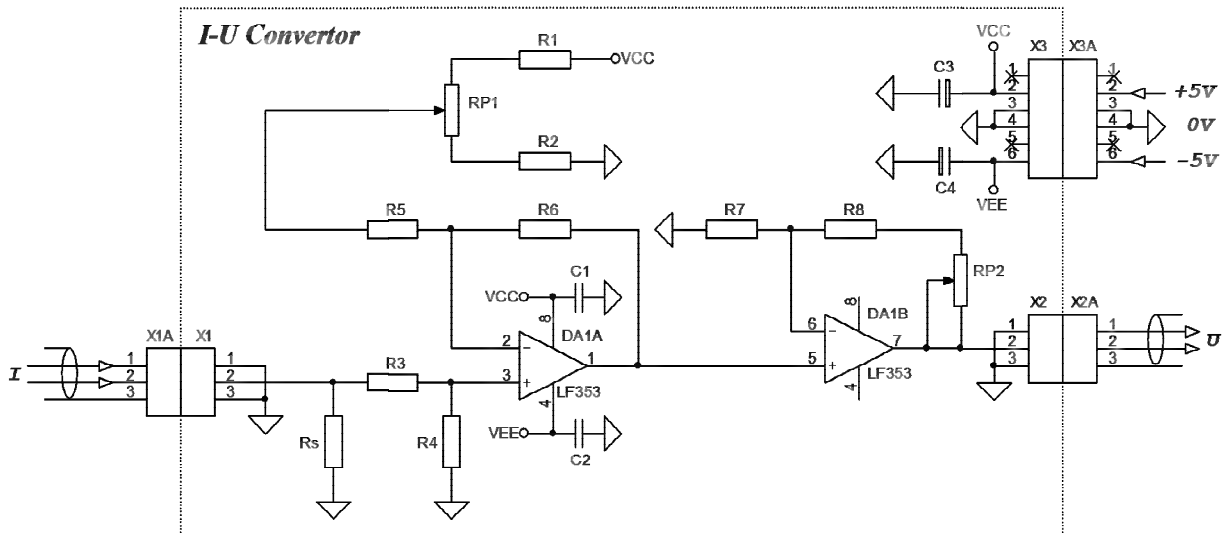


Фиг.16. Зависимост $\delta_{U_o} = \varphi(E_R)$

От резултатите се вижда, че за намаляване на нестабилността на преобразувателя е необходимо да се използва стабилен източник единствено за опорното напрежение. Това опростява схемата и намалява цената на крайната реализация.

3.2. Експериментални изследвания върху реализирано устройство

Реализираната принципна схема преобразувател „ток – напрежение” е дадена на фиг.17. Изменението на входния ток I от 4 до 20 mA предизвиква изменение на изходното напрежение U от 0 до 2 V. На базата на изводите от симулационните изследвания, при реалната схемна реализация са обединени източника на опорно напрежение и положителното захранване на операционния усилвател.

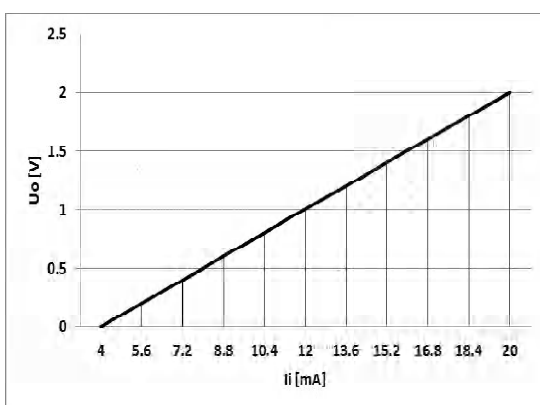


Фиг.17. Преобразувател „ток - напрежение”

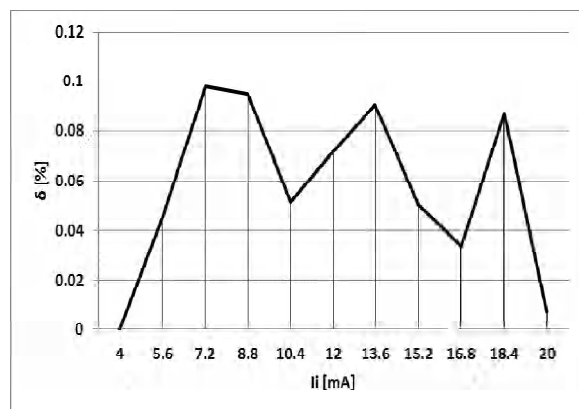
3.2.1. Изследване на линейността на схемата на преобразувателя

Изследвана е линейността на схемата на преобразувателя при захранващи напрежения: $V_{CC} = +5V$, $V_{EE} = -5V$.

На фиг.18 и фиг.19 са представени графично получените зависимости за изходното напрежение $U_o = \varphi(I_i)$ и относителната грешка $\delta_{U_o} = \varphi(I_i)$.



Фиг.18. Зависимост $U_o = \varphi(I_i)$,



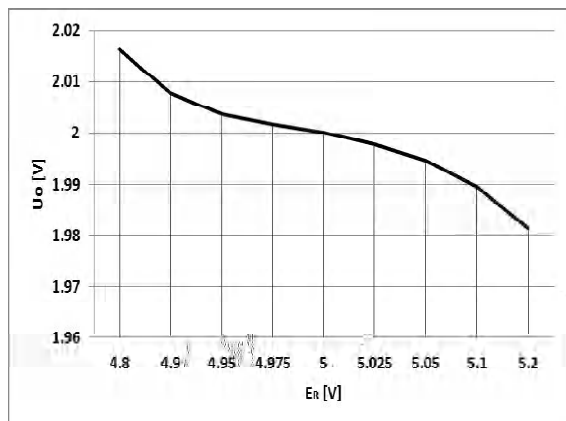
Фиг.19. Зависимост $\delta_{U_o} = \varphi(I_i)$

Резултатите потвърждават твърдението, че реализираният преобразувател е много прецизен, с изключително линейна преобразователна характеристика. Относителната грешка δ_{U_o} при тази схема е много ниска - под 0,1 %.

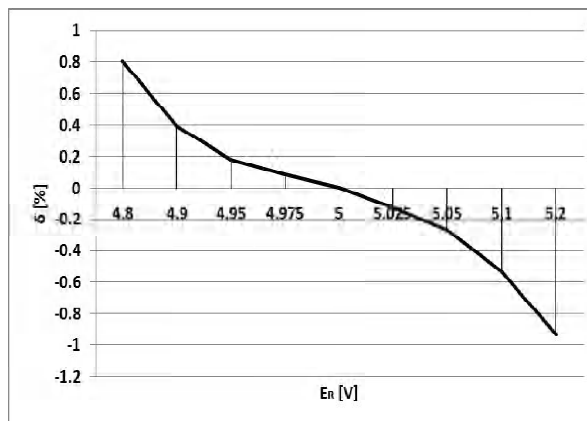
3.2.2. Изследване на нестабилността на схемата на преобразувателя от изменението на захранващите напрежения

Направените изследвания показват, че изходното напрежение не се изменя ($U_{out} = 2 V = const$), при широк диапазон на изменение на захранващото напрежение: $V_{EE} = - (4,8 \div 5,2) V$. Затова по-детайлна информация е представена само за нестабилността на схема на преобразувателя от изменението на захранващите напрежения на операционния усилвател.

Резултатите от измерванията, извършени при изменение на захранващото напрежение $V_{CC} \approx 5V$, при входен ток $I_i = 20 mA$, са дадени на фиг. 20 ($U_o = \varphi(V_{CC})$) и фиг. 21 ($\delta U_o = \varphi(V_{CC})$).



Фиг.20. Зависимост $U_o = \varphi(V_{CC})$



Фиг.21. Зависимост $\delta U_o = \varphi(V_{CC})$

Резултатите показват, че при изменение на захранващото напрежение V_{CC} с $\pm 4\%$, стойностите на δU_{out} се изменят с по-малко от $\pm 1\%$. Ако се използва по-прецизни стабилизатори на напрежение с изменение на захранващото напрежение с $\pm 0,5\%$, нестабилността на предложения преобразувател се изменя с $\pm 0,2\%$. Всички измерени стойности на реализирания преобразувател са близки до тези от симулирането на схемата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В този доклад беше представено проектирането и реализацията на комплекс преобразуватели „напрежение-ток” и „ток-напрежение”. Те се характеризират с много висока линейност на преобразователната функция и с много ниска нестабилност, причинена от нестабилността на захранващите напрежения.

Предложеното решение е сравнително просто и много по-евтино от предлаганите на пазара подобни устройства. Двата преобразувателя имат автономно захранване, което ги прави независими едно от друго. Има възможност за прецизна самостоятелна настройка на минималната и максимална стойност на измервателния обхват.

Всички тези предимства правят този комплекс от преобразуватели много подходящи за използване при системи за събиране на данни. При използване и на високостабилни източници на захранващи напрежения, разработените преобразуватели могат да се използват с успех за свързване на сензори с аналогов (напрежителен) изход към входовете на система за събиране на данни по проводникова връзка на сравнително големи разстояния, без да се внася съществена допълнителна грешка в предаваната информация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Markova V., T. Trifonova, Draganov V., “Design and implementation of data collection module for WSN application”, Int. Journal of Practical Electronics, 2014, vol.1., No1, pp27-36, www.sciencepubco.com/index.php/IJPE
2. Albert O'Grady, „Precision Signal-Processing and Data-Conversion ICs for PLCs Now Have More Performance at Less Power, Size, and Cost“, Analog Dialogue, vol.40, 2006.
3. 4 mA to 20 mA Process Control Loop Using the AD5662 DAC, Analog Devices. http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0009.pdf
4. Flexible, 4 mA-to-20 mA, Loop-Powered Pressure Sensor Transmitter with Voltage or Current Drive, Analog Devices. http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN-0289.pdf
5. 4-20 mA Low Power, 14-Bit, Process Control Current Loop Transmitter, Analog Devices. http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0179.pdf
6. Winfield Hill, CR4 - The Engineer's Place for News and Discussion, Simple 4-20mA Generator. <http://cr4.globalspec.com>
7. 12-Bit, 300 kSPS, Single -Supply, Fully Isolated, Data Acquisition System for 4-20 mA inputs, Analog Devices, http://www.analog.com/static/imported-files/circuit_notes/CN0336.pdf
8. Michel, 4-20 mA Input and 5 V Output I/V Switching Circuit of LM324, SeekIC, www.seekic.com