

## VÁKUUM MÉRÉSÉRE ALKALMAS RENDSZER FEJLESZTÉSE HŐVEZETÉSEN ALAPULÓ ÉRZÉKELŐ ÉS ALACSONY KÖLTSÉGŰ BEÁGYAZOTT RENDSZER FELHASZNÁLÁSÁVAL

### DEVELOPMENT OF A PRESSURE MEASURING UNIT BASED ON A THERMAL CONDUCTIVITY GAUGE AND A LOW COST EMBEDDED SOLUTION FOR MID-RANGE VACUUM APPLICATIONS

Fekete Albert-Zsombor<sup>1</sup>, Jakab-Farkas László<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>*Sapientia – Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, 540485, Románia, Marosvásárhely, Segesvári út 1C; Tel. +40-766-649950, e-mail: <sup>1</sup>zsombor.fekete@tetronic.ro, <sup>2</sup>jflaci@ms.sapientia.ro.*

#### Abstract

The study presents the development of a pressure measuring unit based on a Pirani gauge and a dedicated embedded system, incorporating a simple, low cost practical solution for reducing significantly the various measurement altering factors, such as drifts and offsets. This is achieved by eliminating the conventional differential analogue signal processing stage and by replacing it with a high resolution analog to digital converter. Therefore the goal was to minimize the number of the electronic components whose operation is influenced by the variation of the ambient temperature.

**Keywords:** *vacuum pressure, thermal conductivity gauge, low cost embedded solution, high resolution analog to digital converter, network connectivity.*

#### Összefoglalás

A tanulmány egy hővezetésen alapuló érzékelő és egy dedikált beágyazott rendszer segítségével megvalósított nyomásmérő rendszer tervezési lépéseit ismerteti, amely egy egyszerű, alacsony költségű gyakorlati megoldást biztosít a mérést befolyásoló drift és offset tényezők jelentős lecsökkentésére. A javasolt megoldás a hagyományos analóg differenciális jelfeldolgozó egységnek egy nagy felbontású analóg-digitális átalakítóval történő helyettesítését feltételezi. A kitűzött cél minimálisra csökkenteni azon elektronikai alkatrészek számát, amelyeknek működését befolyásolja a környezeti hőmérséklet változása.

**Kulcsszavak:** *vákuum-nyomás, hővezetésen alapuló érzékelő, alacsony költségű beágyazott rendszer, nagy felbontású analóg-digitális átalakító, hálózati kapcsolat.*

#### 1. Bevezetés

A vákuum berendezések egyik legfontosabb eleme az evakuálási rendszer, melynek rendellenes működése a berendezés nem kívánt leállításához és esetenként a használt szivattyúk végérvényes meghibásodásához

vezethet. Ennek elkerülése érdekében, a vákuum-berendezések [2] működtetésének egyik legfontosabb feladata a nyomás megfelelő mérése és a vákuumszint felügyelete.

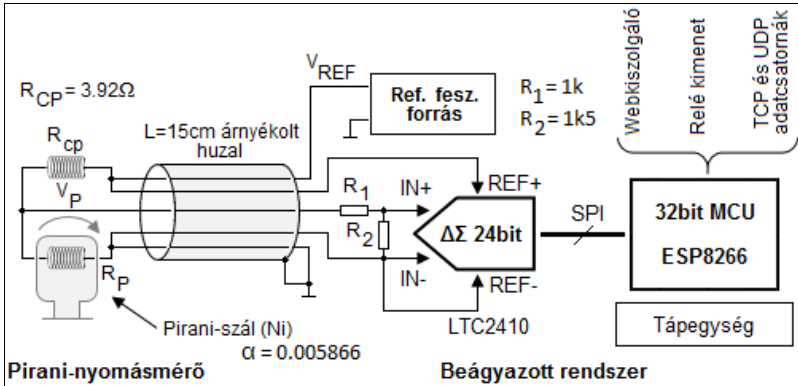
## 2. Hővezetésen alapuló érzékelő

A turbomolekuláris és a rotációs szivattyúk között lévő vákuumvonalak esetében rendszerint Pirani-nyomásmérőt alkalmaznak.

Az érzékelő működése a hőátadási és hővezetési tényezők nyomásfüggésén alapszik [1]. Az érzékelő fűtött izzószálának hőmérséklete egy egyensúlyi hőmérséklet, amelyet a termelt és leadott hőmennyiségek egyensúlya határoz meg. A gáz hővezető

képessége csökken a nyomáscsökkenéssel, így megváltozik a termikus egyensúlyi hőmérséklet és ezáltal a fűtőszál ellenállása is. Ez az ellenállás változás a nyomásváltozásnak tulajdonítható, ezért indirekt módon jelzi a nyomás értékét [1,4].

A mérőeszköz viszonylag széles nyomástartományban ( $5 - 1 \cdot 10^{-4}$  Torr) használható. Az egyszerű és robusztus felépítésének köszönhetően minimális karbantartást igényel.

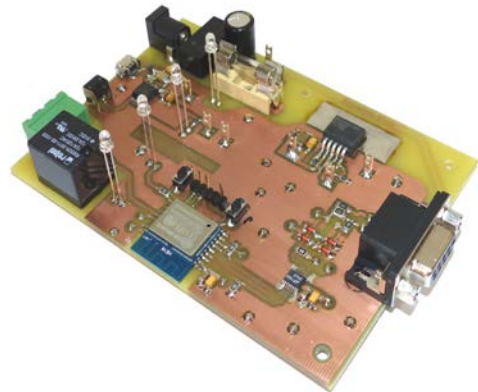


1. ábra. A mérőáramkör és a beágyazott rendszer egyszerűsített tömbrajza

## 3. A beágyazott rendszer

A cél egy alacsony költségű beágyazott rendszer (2. ábra) kialakítása volt, amely közvetlenül kapcsolódik a FAN Pirani mérőfej nikkell izzószálára ( $R_P$ ) egy LTC2410 szigma-delta típusú [6] analóg-digitális átalakítóval (ADC). Ez a megközelítés (1. ábra) kiküszöböli a hagyományos differenciálerősítő fokozatot, minimalizálva az aktív komponensek számát, amelyek offsetet és driftet okozhatnak. Az átalakító hibahatára ebben az esetben csak  $2.5\text{ppm}$ , míg a maximális bemeneti hőmérsékleti feszültség drift  $10\text{nV}/\text{C}^\circ$  [6].

Az ADC egy szinkron soros interfészen (SPI) keresztül egy 80 MIPS-es, 32 bites ESP8266 típusú mikrovezérlőhöz (MCU) [5] csatlakozik. A mintavételi idő  $500\text{ms}$ , és minden átalakítást az MCU kezdeményez.



2. ábra. A beágyazott rendszer prototípusa

A beágyazott rendszer vezeték nélküli hálózati kapcsolódást biztosít, lehetővé téve TCP és UDP adatcsatornák révén a távoli hozzáférést [2].

#### 4. Mérések és kalibráció

A kalibrálási eljárást egy Pfeiffer Vacuum PKR251 [7] típusú teljes tartományú nyomásmérővel végeztük, melynek globális pontossága  $\pm 30\%$ . Mindkét mérőeszközt egy szabályozható nyomású vákuumkamrához illesztettük. A méréseket  $q_{N_2}=4\text{SCCM}$  és  $q_{Ar}=6\text{SCCM}$  hozamokkal kialakult gázkeverék, valamint 16bittes ADC felbontás mellett végeztük el. A különböző gázok hőkapacitása és hővezetési képessége eltérő [3], ezért a kalibrálási folyamatot célszerű a használt gázok jelenlétében végezni.

Figyelembe véve az ellenállás hőmérséklettől való függését, valamint a bemutatott áramkör feszültségegyenleteit, megbecsülhető a fűtőszál hőmérséklete (1) és a hőmérsékletváltozás felbontása (3) egy adott egyensúlyi állapotban.

$$T = \frac{V_P \cdot R_{CP}}{V_{REF} - V_P} + R'_P (\alpha \cdot T' - 1) \quad (1)$$

$$\alpha \cdot R'_P$$

ahol az  $R'_P$  (3,72 $\Omega$ ) a Pirani-szál referenciaellenállása  $T'=30\text{C}^0$ -on,  $\alpha$  a nikkell

ellenállás hőmérsékleti együtthatója, míg  $V_P$  a feszültség az izzószálon (2)

$$V_P = \frac{ADC \cdot 0.5 \cdot V_{REF} \cdot (R_1 + R_2)}{R_2 \cdot (2^{16} - 1)} \quad (2)$$

A (3)-as összefüggés értelmében a felbontás növelhető a  $V_{REF}$  növelésével.

$$\Delta T = \Delta V_P \cdot \frac{R_{CP}}{V_{REF} \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{V_P}{V_{REF}}\right)^2} \quad (3)$$

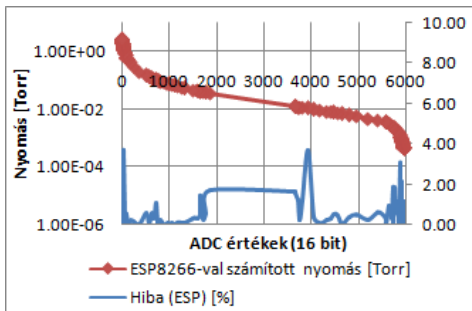
Gyakorlati úton meghatároztuk a  $V_{REF}$  értékét úgy, hogy a nyomástartomány alsó részén az AD konverzió kvantuma  $\Delta p=1.5 \cdot 10^{-5}$  Torr nyomásváltozásnak feleljen meg. Ezáltal a  $4 \cdot 10^{-4}$  Torr értékű végvákuum és a fent leírt eljárással kapott 194mV-os referenciafeszültség mellett az izzószál hőmérséklete (1)  $95\text{C}^0$ . Olajjal tömített rotációs szivattyúk esetében az olajgőzök a meleg Pirani-szál felületén lerakodnak, megváltoztatva a hőátadási paramétereit, ezért ajánlatos a lehető legalacsonyabb hőmérsékleten működtetni.

**1. táblázat.** Nyomás kalibrációs függvények FAN Pirani érzékelő számára 194mV-os referenciafeszültség, 16bittes felbontás, valamint Ar és N<sub>2</sub> gázkeverék használata esetében

Nyomás- tartomány [Torr]	Kalibrációs függvények: $p=f(x)$ [Torr], ahol $x=ADC$ érték – statikus offset	Átlaghi ba [%]	$\sigma^2$ [%]	Felbontás [Torr]
2 ÷ 1	$7.8046 \cdot 10^{-4} x^2 - 6.5190 \cdot 10^{-2} x + 2.5216$	1.25	0.74	$5.64 \cdot 10^{-2}$
1 ÷ $8 \cdot 10^{-1}$	$-9.5460 \cdot 10^{-3} x + 1.4252$	0.25	0.01	$8.41 \cdot 10^{-3}$
$8 \cdot 10^{-1}$ ÷ $6 \cdot 10^{-1}$	$-5.1364 \cdot 10^{-3} x + 1.1067$	0.26	0.05	
$6 \cdot 10^{-1}$ ÷ $3 \cdot 10^{-1}$	$1.0198 \cdot 10^{-5} x^2 - 5.5330 \cdot 10^{-3} x + 1.0323$	0.18	0.01	
$3 \cdot 10^{-1}$ ÷ $1 \cdot 10^{-1}$	$4.5231 \cdot 10^{-7} x^2 - 7.4903 \cdot 10^{-4} x + 4.0840 \cdot 10^{-1}$	0.48	0.03	
$1 \cdot 10^{-1}$ ÷ $7 \cdot 10^{-2}$	$1.0020 \cdot 10^{-7} x^2 - 2.7747 \cdot 10^{-4} x + 2.4969 \cdot 10^{-1}$	0.08	0.01	$7.30 \cdot 10^{-5}$
$7 \cdot 10^{-2}$ ÷ $4 \cdot 10^{-2}$	$3.6922 \cdot 10^{-8} x^2 - 1.4581 \cdot 10^{-4} x + 1.8102 \cdot 10^{-1}$	0.24	0.02	
$4 \cdot 10^{-2}$ ÷ $1 \cdot 10^{-2}$	$4.4449 \cdot 10^{-9} x^2 - 3.7522 \cdot 10^{-5} x + 8.9687 \cdot 10^{-2}$	1.35	0.79	$5.03 \cdot 10^{-6}$
$1 \cdot 10^{-2}$ ÷ $3 \cdot 10^{-3}$	$6.8013 \cdot 10^{-10} x^2 - 1.0591 \cdot 10^{-5} x + 4.1463 \cdot 10^{-2}$	0.37	0.05	
$3 \cdot 10^{-3}$ ÷ $1 \cdot 10^{-3}$	$-1.247 \cdot 10^{-8} x^2 + 1.3696 \cdot 10^{-4} x - 3.7305 \cdot 10^{-1}$	1.47	0.81	
$1 \cdot 10^{-3}$ ÷ $6 \cdot 10^{-4}$	$-8.9454 \cdot 10^{-6} x + 5.3825 \cdot 10^{-2}$	0.53	0.06	$1.51 \cdot 10^{-5}$
$6 \cdot 10^{-4}$ ÷ $4 \cdot 10^{-4}$	$-6.9886 \cdot 10^{-8} x + 5.3825 \cdot 10^{-2}$	0.51	0.01	

Adott rendszerparaméterek mellett, a 12 részre osztott nyomástartomány mindenikében első, vagy másodrendű polinomfüggvénnyel közelítettük meg az AD konverzió kísérletileg meghatározott eredményét a nyomás függvényében (1. táblázat).

Meghatároztuk a beágyazott rendszeren implementált függvények kiszámításának pontosságát, valamint a különböző nyomástartományokban érvényes felbontásokat. Az átlaghiba, valamint a szórásnégyzet ( $\sigma^2$ ) a számolt nyomás és a kalibráló mérőeszköz által mért nyomás közti eltérést adják meg. A kapott eredményeket az 1. táblázat és a 3. ábra tartalmazza.



3. ábra. ESP8266 típusú beágyazott rendszerrel számolt nyomás és az elért pontosság

## 5. Szoftver kialakítás

Bár az MCU egy 32 bites architektúrát tartalmaz, a fejlesztési környezet úgy a *double*, mint a *float* változótypust 7 tizedesre korlátozza. Ez azt eredményezi, hogy a különböző kalibrációs függvények pontossága jelentősen lecsökken.

A javasolt megoldás egy dedikált könyvtár [8] használatát feltételezi, amely a tizedesek számát 16-ra növeli. Ezzel arányosan megemelkednek a rendszerkövetelmények is. A maximális tapasztalt végrehajtási idő 4ms, amely 0.8%-a a mintavételi időnek.

## 6. Következtetések

A kifejlesztett rendszer egy viszonylag egyszerű és alacsony költségű megoldást kínál Pirani nyomásmérők működtetésére. Lehetőség nyílik a működési paraméterek optimalizálására az alkalmazási terület és a nyomástartomány ismeretében.

Ugyanakkor létfontosságú biztonsági elemként is szolgál, amely képes érzékelni a nyomásvesztést és az evakuálási rendszer egyes működési rendellenességeit.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Szöllösi Istvánt és a *Thin Solid Films Research Group* (TSFRG) munkatársait a fejlesztési munka során nyújtott segítségükért.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] P. K. Weng and J. S. Shie: *Micro-Pirani vacuum gauge*. Review of Scientific Instruments, vol. 65, pp. 492-499, 1994.
- [2] A.-Z. Fekete, A. Kelemen, and L. Jakab-Farkas: *Multilevel Distributed Embedded System for Control of the DC Magnetron Sputtering Process*. Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering, vol. 9, pp. 43-55, 2017.
- [3] K. Toshio, H. Tadahiko, N. Yohta, and T. Hiroyuki: *Sensitivity Coefficients of Pirani Gauge for Various Atoms and Molecules* Japanese Journal of Applied Physics, vol. 37, p. 369, 1998.
- [4] T. Brun, D. Mercier, A. Koumela, C. Marcoux, and L. Duraffourg: *Silicon nanowire based Pirani sensor for vacuum measurements*. Applied Physics Letters, vol. 101, p. 183506, 2012.
- [5] Espressif: *ESP-WROOM-02*. ESP8266 adatlap, 2017 (verzió: 2.5).
- [6] Linear Technology: *24-Bit No Latency  $\Delta\Sigma$  ADC with Differential Input and Differential Reference*. LTC2410 adatlap, 2000 (REV A).
- [7] Pfeiffer Vacuum: *Compact Full Range<sup>TM</sup> Gauge*. PKR251 adatlap, 2008-04.
- [8] N. Gammon: *BigNumber* könyvtár: <https://github.com/nickgammon/BigNumber> (2018.02.10).