

# **HIDRAVLICNE MERILNE CELICE ZA MERJENJE MAJHNIH OBREMENITEV**

**Roman Pačnik**

**Doktorska disertacija**  
**Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana**  
**Ljubljana, Slovenija, januar 2011**

**Komisija za oceno doktorske disertacije:**

*doc. dr. Marko Hrovat, predsednik, Institut »Jožef Stefan«*

*prof. dr. Andrej Žemva, član, fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani*

*doc. dr. Jurij Šilc, član, Institut »Jožef Stefan«*

Roman Pačnik

# **HIDRAVLICNE MERILNE CELICE ZA MERJENJE MAJHNIH OBREMENITEV**

**Doktorska disertacija**

## **HYDRAULIC LOAD CELLS FOR MEASUREMENT OF SMALL LOADS**

**Doctoral Dissertation**

*Mentor:* prof. dr. Franc Novak

*Somentor:* prof. dr. Marija Kosec

JANUAR 2011

**MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA**  
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL  
Ljubljana, Slovenija





# Kazalo

<b>Povzetek</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Seznam kratic</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Uvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Merilne celice</b> .....	<b>13</b>
2.1 Splošno o merilnih celicah in njihovi uporabi.....	13
2.2 Karakteristike merilnih celic .....	13
2.2.1 Prenosna funkcija.....	14
2.2.2 Vhodni razpon .....	15
2.2.3 Izhodni razpon .....	15
2.2.4 Točnost .....	15
2.2.5 Napaka nelinearnosti.....	16
2.2.6 Histereza .....	17
2.2.7 Kombinirana napaka .....	18
2.2.8 Lezenje.....	18
2.2.9 Občutljivost.....	18
2.2.10 Ponovljivost.....	19
2.2.11 Ostale karakteristike, ki so specifične za merilne celice .....	19
2.3 Razred točnosti in razvrstitev merilnih celic po OIML priporočilih .....	21
2.3.1 Vrste obremenitev merilnih celic.....	21
2.3.2 Celotna a klasifikacija merilne celice .....	21
2.4 Kratek povzetek OIML R 60 priporočil .....	22
2.4.1 Okolje in pogoji testiranja.....	23
2.4.2 Potek karakterizacije merilnih celic.....	24
<b>3 Specifikacije in zahteve za merilno celico</b> .....	<b>27</b>
3.1 Splošne zahteve.....	27
3.2 Določitev merilne celice glede na zahteve preobremenitev .....	27
<b>4 Stanje področja</b> .....	<b>29</b>
4.1 Vrste merilnih celic .....	29
4.1.1 Merilne celice s kovinskimi merilnimi lističi .....	29
4.1.2 Debeloplastna tehnologija.....	30
4.2 Merilna celica, ki deluje na principu pretvorbe sile v tlak tekočine.....	33
4.2.1 Hidravlične merilne celice .....	33
4.3 Splošne značilnosti najbolj razširjenih vrst merilnih celic .....	39
4.4 Načini uporabe merilnih celic v univerzalnih kuhinjskih aparatih.....	41
4.4.1 Vgradnja merilnih celic med posodo aparata in ohišjem aparata .....	41
4.4.2 Vgradnja merilnih celic v podnožje aparata .....	42
4.4.3 Samostojna tehtnica kot dodaten del kuhinjskega aparata.....	44
4.4.4 Povzetek.....	44

<b>5 Priprava merilnega okolja</b> .....	<b>47</b>
5.1 Priprava za ročno dodajanje in odzemanje bremena.....	47
5.2 Priprava za avtomatično karakterizacijo merilnih celic.....	48
5.3 Laboratorijska oprema za karakterizacijo merilnih celic.....	53
<b>6 Razvoj hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev</b> .....	<b>55</b>
6.1 Hidravlična merilna celica - BSH verzija 1 .....	55
6.1.1 Izdelava vzorcev .....	55
6.1.2 Vgradnja v aparat in testiranje.....	57
6.1.3 Povzetek za hidravlično merilno celico - BSH verzija 1 .....	58
6.2 Hidravlična merilna celica – BSH verzija 2.....	59
6.2.1 Načrtovanje in izdelava vzorcev.....	59
6.2.2 Karakterizacija hidravličnih merilnih celic .....	60
6.3 Hidravlična merilna celica - BSH verzija 3 .....	63
6.3.1 Simulacija hidravlične merilne celice z metodo končnih elementov (MKE).....	64
6.3.2 Izvedba analize z metodo končnih elementov .....	65
6.3.3 Rezultati simulacij z metodo končnih elementov .....	67
6.4 Prototipni vzorci hidravličnih merilnih celic – BSH-V3 .....	71
6.4.1 Merjenje tlaka v hidravlični merilni celici.....	71
6.4.2 Merjenje temperaturnega odziva: .....	73
6.4.3 Temperaturna odvisnost nične napetosti in občutljivosti silicijevega senzorja tlaka .....	73
6.4.4 Izdelava vzorcev .....	75
6.4.5 Karakterizacija prototipov .....	76
6.4.6 Karakterizacija merilnih celic v dejanskem merilnem območju.....	78
6.4.7 Vpliv barometričnega tlaka .....	79
<b>7 Zaključek</b> .....	<b>81</b>
<b>8 Zahvala</b> .....	<b>83</b>
<b>9 Literatura in viri</b> .....	<b>85</b>
<b>Izjava</b> .....	<b>89</b>
<b>Kazalo slik</b> .....	<b>91</b>
<b>Kazalo tabel</b> .....	<b>95</b>
<b>Priloge</b> .....	<b>97</b>

## Povzetek

V tem delu opisujemo načrtovanje hidravličnih merilnih celic za univerzalni kuhinjski aparat z integrirano funkcijo tehtanja, ki jih bo mogoče kasneje uporabiti tudi v mreži senzorjev za spremljanje dinamičnih lastnosti in nadzor kuhinjskega aparata. V konkretnem primeru bo funkcija tehtanja prilagojena tehtanju večjih količin živil (do 5 kg). Želimo čim manjše merilne celice, ki ne bodo bistveno večje od obstoječih gumijastih nogic kuhinjskega aparata.

Naša dodatno zahteva pri vgradnji merilnih celic v kuhinjski aparat je uporaba majhnih in cenovno sprejemljivih merilnih celic z velikim izhodnim razponom električnega signala. Merilnih celic s takšnimi želenimi lastnostmi nismo našli na trgu, zato smo se odločili, da skladno z našimi željami razvijemo merilno celico, ki je opisana v tej disertaciji. Cilj je bil razviti merilno celico enostavne konstrukcije, s čimer bomo lahko dosegli nižjo ceno izdelave. Želimo tudi, da so merilne celice narejene iz standardnih komponent, ki jih bo mogoče enostavno izdelovati z uporabo okolju prijaznih tehnologij.

Hidravlično merilno celico, ki izpolnjuje zgoraj navedene zahteve, smo zasnovali in modelirali z metodo končnih elementov (MKE) pred samo sestavo in testiranjem vzorcev, z namenom izbora najprimernejših komponent in njihovih dimenzij. Zahteva po enostavni konstrukciji, uporabi standardnih komponent in njihovi enostavni sestavi, nas je pripeljala do odločitve, da uporabimo s hidroforming tehnologijo izdelane kovinske mehove. Ti so lahko narejeni iz različnih materialov, kot so nerjaveče jeklo, berilijev bron, medenina ali Monel (nikelj-bakrova zlitina). Izbrali smo berilijev bron (CuSn8). Kovinski mehovi iz berilijevega brona imajo vrsto dobrih lastnosti. Najpomembnejše so odlična odpornost proti koroziji, neznaten pojav lezenja in histereze in možnost spajkanja. Polnilni medij, ki zapolnjuje notranjost hidravlične merilne celice, je v stiku z vsemi kovinskimi deli in s silicijevim senzorskim elementom za merjenje tlaka. Takšen medij mora biti dober električni izolator, ne sme kemijsko reagirati z elementi, s katerimi je v stiku, ne sme biti abraziven in mora imeti nespremenljive fizikalne lastnosti v širokem temperaturnem območju. Zaradi možnega neposrednega stika z nezaščiteno silicijevo senzorsko tabletko smo izbrali silikonsko olje.

Na podlagi opravljenih simulacij smo izdelali serijo prototipnih hidravličnih merilnih celic. Za merjenje tlaka tekočine v hidravlični merilni celici smo uporabili absolutne silicijeve senzorje tlaka MS7904A in MS7204A (0,4 MPa), proizvajalca Intersema Sensoric SA. Vzorce smo testirali pri različnih temperaturah in sicer pri 10 °C, 20 °C, 30 °C in 40 °C. Da smo dosegli željeno natančnost in ponovljivost testov, smo izdelali namensko pripravo za karakterizacijo hidravličnih merilnih celic. Celoten nadzor poteka karakterizacije in meritve vzorca smo izvedli s pomočjo programskega paketa LabVIEW.

Dosegli smo dobro občutljivost, velik odziv izhodne napetosti v odvisnosti na vhodno obremenitev. To daje dobro razmerje signal/šum in zagotavlja visoko odpornost na elektromagnetne motnje v kuhinjskem aparatu, kar je prednost pred klasičnimi merilnimi celicami. Glavne karakteristike smo izmerili v skladu s priporočilom OIML R 60. Dobljeni rezultati izpolnjujejo postavljene osnovne zahteve za namene v ciljni aplikaciji.

## Abstract

This work deals with the design of a small kitchen appliance with a weighing function integrated into a control loop in order to prevent unbalanced movement of the appliance during operation. In this particular case, the weighing should be appropriate for larger amounts (up to 5 kg) of ingredients. The size and shape of the load cells should be small, similar to the existing rubber feet of the appliance.

Another requirement related to the target application is that small, low-cost load cells with high electrical output signals are employed. In fact it was the lack of devices complying with these requirements that fostered the development of the load cell reported in this dissertation. The goal was to develop a load cell with a simple construction to cut down the costs. In addition, the load cell should be composed of standard components that can be easily assembled using environment-friendly technologies.

A hydraulic load cell complying with the above requirements was conceived and modelled with the finite element method (FEM) prior to assembly and testing the samples in order to select the most suitable components and their dimensions. The requirements of a simple construction and standard components that can be easily assembled led to the decision to use hydroformed metallic bellows, which are usually made of a variety of materials, like stainless steel, phosphor bronze, brass, and Monel (nickel-copper alloy). In our case phosphor bronze (CuSn8) was selected. This material has excellent resistance to corrosion and is relatively free from creep, drift and hysteresis, and can be easily soldered. The fluid that fills the internal space of the hydraulic load cell is in contact with all the metallic parts and the membrane of the silicon pressure sensor. Therefore, the fluid must be good electrical insulator; it must be chemically unreactive and non-abrasive; and it must have stable physical properties over a broad temperature range. A silicon fluid was chosen because of the direct contact with the unprotected silicon pressure-sensor die.

Based on the performed simulations, a series of prototypes was implemented. A 0.4-MPa-absolute silicon pressure-sensor die MS7904A and MS7204A from Intersema Sensoric was selected as the sensing device for measuring the pressure of the fluid inside the hydraulic load cell. The samples were characterized at 10 °C, 20 °C, 30 °C and 40 °C. To achieve more accurate and repeatable tests, a special measurement device for characterising the hydraulic load cells was built. The whole procedure for the exercise and the measurements of the test samples was controlled and measured in the LabVIEW environment.

High response of the output voltage to the applied load has been obtained. It ensures good noise immunity and gives it an advantage over conventional strain-gauge load cells. The main characteristics were measured in accordance with the OIML R 60 recommendation, and the obtained results fulfil the requirements imposed by the target application.

## Seznam kratic

FS	=	Full Scale
B/S/H/	=	Bosch and Siemens Home Appliances Group
DOS	=	Dielectric-on-Steel
GF	=	faktor merilnika (Gauge Factor)
IPC	=	International Patent Classification
LTCC	=	Low Temperature Cofired Ceramics
LVDT	=	Linear Variable Differential Transformer
MC	=	merilna celica (angl. Load Cell)
MKE	=	metoda končnih elementov
NDP	=	največji dopustni pogrešek
OIML	=	Mednarodna organizacija za zakonsko metrologijo (Organisation Internationale Métrologie Légale)
TKGF	=	temperaturni koeficient faktorja merilnika
TKR	=	temperaturni koeficient upornosti
TOS	=	Tape-on-Steel
VIM	=	mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov iz meroslovja (Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology)
VIML	=	mednarodni slovar izrazov zakonskega meroslovja (International Vocabulary of Terms in Legal Metrology)
$D_{\min}$	=	minimalna obremenitev merilnega območja
$D_{\max}$	=	maksimalna obremenitev v merilnem območju
$E_{\lim}$	=	meja varne obremenitve
$E_{\min}$	=	minimalna mrtva obremenitev
$E_{\max}$	=	maksimalna zmogljivost
$n$	=	število preizkusnih razdelkov za merilno celico
$n_{\max}$	=	maksimalno število kontrolnih intervalov merilne celice
$v_{\min}$	=	minimalni preizkusni interval za merilno celico



# 1 Uvod

Univerzalni kuhinjski aparati so namenjeni obdelavi oziroma pripravi živil in/ali napitkov. Večina gospodinjstev uporablja kakšnega izmed univerzalnih ali kompaktnih kuhinjskih aparatov (v nadaljevanju kuhinjski aparat). Z uporabo različnih priključkov spreminjamo namembnost kuhinjskega aparata in ga prilagodimo pripravi različnih živil oziroma napitkov. Pri pripravi živil poleg kuhinjskega aparata pogosto potrebujemo tudi tehtnico, zato je smiselno, da funkcijo tehtanja integriramo v kuhinjski aparat.

Za izvajanje tehtanja s kuhinjskim aparatom, moramo nanj namestiti merilne senzorje – merilne celice. Le te vršijo pretvorbo tehtane mase v proporcionalno vrednost izhodnega električnega signala, ki ga po zajemu in procesiranju prikažemo kot rezultat tehtanja. Merilne celice morajo biti dovolj točne, da je možno izvajati tehtanje za gospodinjске potrebe. Meritve, ki smo jih naredili na kuhinjskih aparatih, prisotnih na trgu, kažejo, da imajo le redki takšni aparati napako tehtanja manjšo od 1 %, čeprav jih proizvajalci sami deklarirajo kot bolj točne. Vgradnja merilnih celic med dnom kuhinjskega aparata in fiksno podlago, na katero je le ta nameščen, ima poglobilni prednosti v boljši konstrukciji kuhinjskega aparata in v načinu izvedbe tehtanja z njim. Neugodno pa je, da so tako vgrajene merilne celice izpostavljene preobremenitvam in možnostim poškodb med delovanjem ali rokovanjem z kuhinjskim aparatom.

Trenutno je na evropskem trgu moč kupiti le nekaj kuhinjskih aparatov, s katerimi je mogoče tudi tehtati, njihova deklarirana zmogljivost tehtanja pa znaša 3 kg oziroma pri nekaterih do 6 kg. Ker pa imamo opravka tudi z dinamičnimi obremenitvami med delovanjem kuhinjskega aparata, je izbor ustreznih merilnih celic težji in zahteva poglobljeno analizo ter testiranja.

Kot bo prikazano, so se za ciljno aplikacijo izkazale kot najprimernejše hidravlične merilne celice. Hidravličnih merilnih celic z območjem tehtanja do 10 kg, ki bi jih lahko uporabili za vgradnjo v kuhinjski aparat, nismo našli v dostopni strokovni literaturi, kot tudi ne v patentnih prijavih. Komercialne hidravlične merilne celice imajo merilna območja nad 50 kg, kar je bistveno več od naših zahtev.

Želimo zasnovati univerzalno merilno celico, primerno za več tipov aparatov, z velikim varnostnim faktorjem preobremenitve, malih zunanjih dimenzij in velikim izhodnim razponom – to je dobro občutljivostjo. Zato je bilo potrebno preštudirati sorodne principe in narediti hidravlično merilno celico za merjenje majhnih mas, ki naj bi bila tako majhna, da jo lahko vgradimo v namesto obstoječe gumijaste nogice kuhinjskega aparata. Pomembni problemi, ki smo jih morali preučiti pri načrtovanju, izvedbi in evalvaciji hidravličnih merilnih celic se nanašajo na zadovoljivo natančnost, nelinearnost odziva, histerezo, vpliv temperature na merilne karakteristike in izbor primernih materialov ter konstrukcijsko izvedbo. Za boljše razumevanje najprej na kratko povzemamo splošne značilnosti merilnih celic, ter naše zahteve za merilno celico. V nadaljevanju podamo pregled področja merilnih celic in načinov njihove uporabe v kuhinjskih aparatih. Na koncu predstavimo potek načrtovanja, izvedbo in merilne rezultate treh različnih izvedb hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev.



## 2 Merilne celice

### 2.1 Splošno o merilnih celicah in njihovi uporabi

Merilna celica (angl. load cell) je definirana kot pretvornik sile, ki ob upoštevanju efekta zemeljskega težnostnega pospeška ( $g$ ) in vzgona v zraku na mestu uporabe meri maso s pretvorbo merjene veličine (mase) v drugo merljivo veličino. Z merilnimi celicami, ki so zelo precizni merilni pretvorniki, lahko merimo maso kot tudi silo. Izraza "obremenitev" in "sila" se pri merilnih celicah pogosto uporabljata kot sopomenki, kjer se prvi pogosteje uporablja v industriji drugi pa v raziskovalni sferi. Za merilno celico zasledimo večkrat v uporabi izraz senzor sile. V tem delu se bomo omejili na uporabo izraza merilna celica, ki jo bomo obremenjevali tako, da bomo lahko izmerili njene merilne karakteristike.

Merilne celice pretežno uporabljamo za tehtanje in so "srce" oziroma osnovni del vsake tehtnice, v katero so vgrajene, obenem pa so tudi njihov najbolj občutljiv del. Merilna celica se lahko poškoduje zaradi preobremenitve, nenadne preobremenitve – šoka, prenapetostnih ali tokovnih sunkov, napačnega ravnanja (padec na tla, prijemanje za vodnike), vlage, izpostavljenosti raznim kemikalijam in prekomernim vibracijam. Če hočemo imeti zanesljivo tehtnico z želeno natančnostjo, je potrebno merilno celico izbrati glede na želeno območje tehtanja, razred točnosti in okolje, v katerem bo takšna merilna celica delovala. Upoštevati je potrebno tudi fizikalen princip konkretne izvedbe merilne celice, saj imajo različne konstrukcije tako določene prednosti kot tudi pomanjkljivosti.

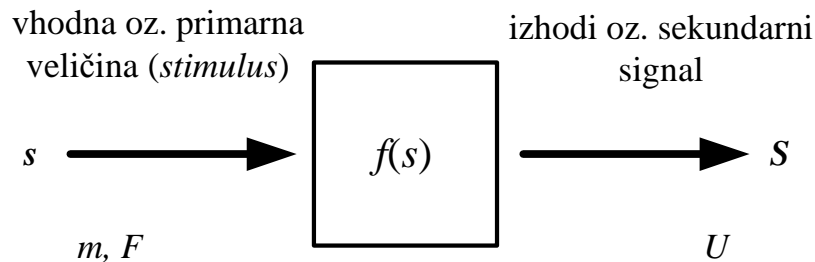
Osnovne definicije in terminologija, uporabljana v tem delu, je povzeta iz mednarodnega slovarja osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja VIM [1] in ustreznega izrazoslovja s področja uradne metrologije VIML [2]. Uporabljeni so poslovenjeni izrazi [3], zaradi večje preglednosti pa so poleg slovenskih izrazov večkrat podani tudi izvorni angleški izrazi.

### 2.2 Karakteristike merilnih celic

Merilne celice lahko v povezavi z osnovnimi merilnimi karakteristikami obravnavamo kot splošen merilni senzor, saj tudi zanje veljajo enake splošne definicije. Da pretvorimo merjeno vhodno veličino v izhodni signal, je običajno potrebnih več vmesnih korakov pretvorbe. Karakteristike merilnih senzorjev predstavljajo zvezo med vhodno veličino  $s$  in izhodnim signalom  $S$ . Vhodna veličina, imenovana tudi stimulus, je v primeru merilnih celic vrednost mase  $m$  oziroma sile  $F$ , s katero obremenjujemo merilno celico, kot to prikazuje slika 1. Izhodni signal  $S$  pa največkrat predstavlja izhodna napetost.

Merilne celice so, kot ostali senzori, podvržene različnim napakam. Naštejmo le nekatere najbolj značilne: nelinearnost, histereza, lezenje in temperaturni efekt. V splošni uporabi je še vedno daleč najbolj razširjena uporaba merilnih celic, pri katerih so na kovinsko elastično vzmetno telo na ustreznih mestih nameščeni uporovni merilni lističi (angl. strain gauge). Uporovni merilni lističi so merilniki mehanskih deformacij, ki pretvarjajo deformacijo (raztezek, skrčec, upogib ...) v električni signal in delujejo po principu piezouporovnega efekta. Ker je merilna celica sestavljena iz več komponent (vzmetno telo, lepilo za pritrjevanje, uporovni merilni lističi, zaščita, vodniki ...), vsaka izmed komponent v celoten sistem prispeva določen delež k skupni napaki.

Poljubno vrsto merilne celice lahko v splošnem predstavimo kot zaprto »črno škatlo«, ki deluje z vsemi svojimi značilnostmi in na tak način, da pri določenem znanem vzbujanju dobimo nek izhodni električni signal, ki ga lahko nadalje obdelujemo z elektronskim vezjem. V nadaljevanju tega poglavja bomo predstavili nekatere izmed pomembnejših splošnih definicij, lastnosti in parametrov, ki veljajo za senzorje [4, 5].



Slika 1: Splošna predstavitev - vhodno veličino  $s$  (stimulus) senzor pretvori v izhodni signal  $S$ .

### 2.2.1 Prenosna funkcija

Vsaka merilna celica ima svojo idealno ali teoretično razmerje med vhodno veličino in izhodno vrednostjo. Če bi bila takšna merilna celica idealno načrtovana in izdelana iz idealnih materialov, ki bi jo sestavili idealni delavci, bi njen izhodni signal v vsaki točki predstavljal pravo (točno) vrednost njene vhodne veličine. Takšno idealno razmerje lahko predstavimo s tabelo vrednosti, grafom ali matematično funkcijo (analitično). Idealen oziroma teoretičen odnos, ki ponazarja povezavo med izhodnim signalom  $S$  in vzbujanjem na vhodu senzorja  $s$ , predstavimo s prenosno funkcijo (angl. transfer function)  $f(s)$  (1).

$$S = f(s) \quad (1)$$

Za večino senzorjev velja, da je prenosna funkcija enodimenzionalna, torej opisuje izhodni signal v odvisnosti od ene vhodne veličine. Prenosna funkcija je lahko linearna ali pa nelinearna funkcija. Enodimenzionalno linearno prenosno funkcijo lahko zapišemo z enačbo (2), kjer je  $a$  začetna vrednost (vrednost izhodnega signala pri neobremenjenem senzorju) in  $b$  smerni koeficient linearne funkcije. Smerni koeficient  $b$  velikokrat imenujemo tudi občutljivost senzorja in je v tem primeru konstanta.

$$S = a + bs \quad (2)$$

Nelinearen odnos med izhodno vrednostjo in vhodno veličino senzorja pa najpogosteje aproksimiramo z logaritemsko (3), eksponentno (4) ali potenčno prenosno funkcijo (5).

$$S = a + b \ln s \quad (3)$$

$$S = ae^{ks} \quad (4)$$

$$S = a_0 + a_1 s^k \quad (5)$$

V primeru, da prenosne funkcije ne moremo zadovoljivo opisati z nobeno zgoraj deklarirano aproksimacijsko metodo, običajno uporabimo za aproksimacijo polinomom. Za nelinearno prenosno funkcijo občutljivost ni več konstantna kot v primeru linearne aproksimacije (2). Za vsako vhodno vrednost  $s_0$  pa jo lahko določimo s (6).

$$b = \frac{dS(s_0)}{ds} \quad (6)$$

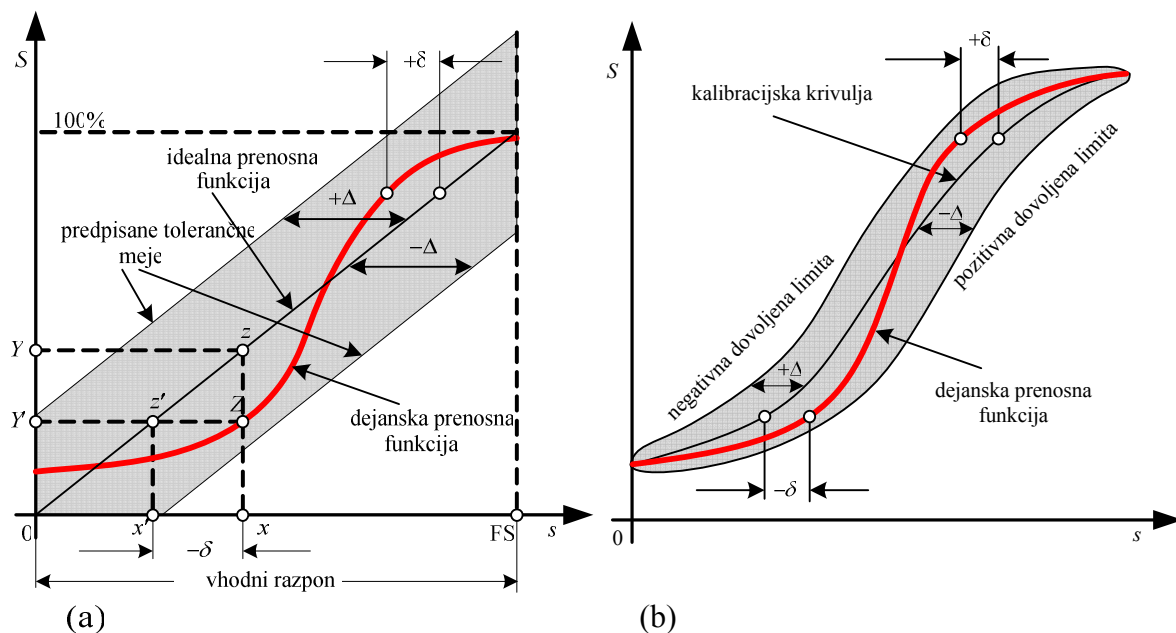
V mnogo primerih lahko nelinearno prenosno funkcijo smatramo kot linearno na določenem omejenem območju. Takšno segmentno aproksimacijo realiziramo tako, da prenosno funkcijo po segmentih zapišemo z več linearnimi prenosnimi funkcijami.

### 2.2.2 Vhodni razpon

Dinamičen obseg vhodne veličine, ki ga je možno aplicirati na nek senzor, imenujemo vhodni razpon ali na kratko razpon (angl. span). Določen je z razliko med maksimalno vrednostjo vhodne veličine  $s_{\max}$  in minimalno (ničelnim) vrednostjo vhodne veličine  $s_{\min}$ . Ovrednotimo ga z najvišjo vrednostjo, ki jo senzor še lahko pretvori, ne da bi presegli dovoljene oziroma deklarirane karakteristike točnosti sensorja.

### 2.2.3 Izhodni razpon

Če na vhod sensorja dovedemo najnižjo in najvišjo vrednost vhodne veličine, potem dobimo na izhodu temu primerno najmanjšo in največjo vrednost izhodnega signala. Razliko med skrajnima vrednostma izhodnega signala imenujemo izhodni razpon ali obseg (angl. full-scale output). Pri tem je potrebno vključiti vsa odstopanja od idealne prenosne funkcije. Splošen prikaz prenosne funkcije in polnega izhodnega razpona je prikazan na sliki 2a. Tako za merilne celice, kot za večino ostalih senzorjev je izhodna veličina običajno napetost, v nekaterih primerih pa je lahko tudi frekvenca, kapacitivnost in podobno.



Slika 2: Splošna predstavitev s podanimi mejami točnosti, za linearno (a) in nelinearno (b) prenosno funkcijo.

### 2.2.4 Točnost

Zelo pomembna lastnost vsakega sensorja je njegova točnost (angl. accuracy). S tem dejansko opišemo njegovo netočnost, ki je določena kot največja vrednost odstopanja izhodnega signala, ki ga podaja senzor glede na idealno ali točno vrednost na njegovem vhodu.

Na sliki 2 je prikazana idealna ali teoretična prenosna funkcija. V realnosti pa vsak senzor izkazuje določene pomanjkljivosti, ki so posledica napak v materialu, napak pri izdelavi, sprememb v materialu, toleranc in ostalih materialnih in tehnoloških pomanjkljivosti oziroma omejitev pri izdelavi sensorja. Primer možne dejanske prenosne funkcije je na sliki 2 prikazan

z rdečo črto, ki v splošnem ni linearna niti monotona. Prenosna funkcija redko sovpa z idealno prenosno funkcijo. Kljub vsem možnim napakam, ki so prisotne, pa mora dejanski odziv sensorja vedno ležati znotraj nekega tolerančnega pasu idealne karakteristike, kar je prikazano kot sivo označeno področje. Meje dovoljenega odstopanja od idealne prenosne funkcije ponazorimo z odstopanjem  $\pm\Delta$ . Resničen odziv pa odstopa za vrednost  $\pm\delta$ , pri tem pa mora vedno veljati (7).

$$\delta \leq \Delta \quad (7)$$

Povzemimo primer sensorja, kjer je vrednost vhodne veličine  $x$ . V idealnem primeru bi bila izhodna vrednost  $Y$ , kar bi ustrezalo točki  $z$  na idealni prenosni funkciji. V realnosti pa dobimo na izhodu vrednost  $Y'$ , ki ustreza točki  $Z$  na realni prenosni funkciji. Ta točka sovpa s točko  $z'$  idealne prenosne funkcije, ki bi, če bi jo pretvorili nazaj, dejansko ustrezala vhodni veličini  $x'$ . Vrednost  $x'$  je v prikazanem primeru manjša od vrednosti  $x$  in ima zato merilni pogrešek vrednost  $-\delta$ .

Če imamo idealno prenosno funkcijo, ki ni linearna, je običajno tudi tolerančni pas  $\pm\Delta$  nelinearen in določen s kalibracijsko krivuljo v več točkah, kot je prikazano na sliki 2b. Pri nekaterih novejših sensorjih, podatek s točnosti večkrat zamenjuje podatek o merilni negotovosti, ki tako zajame naključne kot tudi sistematične vire pogreškov in ni omejen samo z napako prenosne funkcije.

### 2.2.5 Napaka nelinearnosti

Napako nelinearnosti (angl. nonlinearity) lahko definiramo za sensorje, katerih prenosno funkcijo je mogoče aproksimirati s premico. Nelinearnost merilne celice predstavlja največje odstopanje realne prenosne funkcije sensorja glede na idealen linearen odziv in se običajno podaja v razmerju tega odstopanja proti polnemu obsegu. Napako nelinearnosti je mogoče definirati na različne načine, odvisno od tega, kako premico »položimo« na prenosno funkcijo sensorja.

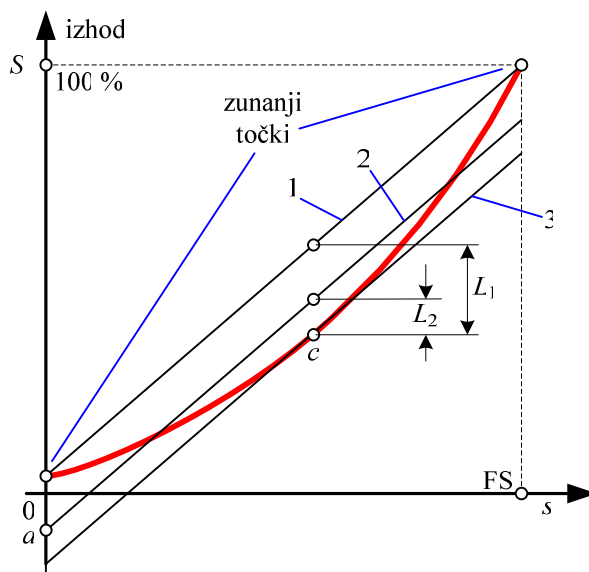
Eden od pogosto uporabljenih načinov je uporaba začetne in končne točke, ki sta definirani kot izhodni vrednosti pri najmanjši in največji obremenitvi, ter skozi njiju potegnemo ravno črto. Na sliki 3 je tak način linearizacije označen z »1«. Pri takšni linearizaciji je napaka nelinearnosti najmanjša v območju začetne in končne točke in običajno največja nekje na sredini med tema dvema skrajnima točkama – na sliki 3 označena z  $L_1$ .

Drugi možen način je, da za aproksimacijo uporabimo metodo najmanjših kvadratov. To storimo tako, da izmerimo več ( $n$ ) vrednosti izhodnega signala  $S$  pri različnih obremenitvah  $s$  v dejanskem merilnem območju oziroma v celotnem vhodnem razponu. Koeficienta premice najboljšega linearnega približka po metodi najmanjših kvadratov določimo s pomočjo (8) in (9), kjer  $a$  predstavlja presečišče z y osjo in  $b$  smerni koeficient premice. Na sliki 3 je aproksimacija z metodo najmanjših kvadratov označena z »2«.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n S \sum_{i=1}^n s^2 - \sum_{i=1}^n S \sum_{i=1}^n s S}{n \sum_{i=1}^n s^2 - \left( \sum_{i=1}^n s \right)^2} \quad (8)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n s S - \sum_{i=1}^n s \sum_{i=1}^n S}{n \sum_{i=1}^n s^2 - \left( \sum_{i=1}^n s \right)^2} \quad (9)$$

Pri nekaterih aplikacijah je zaželena večja natančnost sensorja, predvsem v določenem obsegu vhodne veličine. Običajno takšen senzor umerimo v območju te želene boljše natančnosti. V prikazanem primeru kalibracijsko premico »3« določimo v točki  $c$ , kot je prikazano na sliki 3. Rezultat takšnega načina umerjanja je v tem, da je napaka nelinearnosti najmanjša v kalibracijski točki in največja na začetku in na koncu vhodnega razpona.

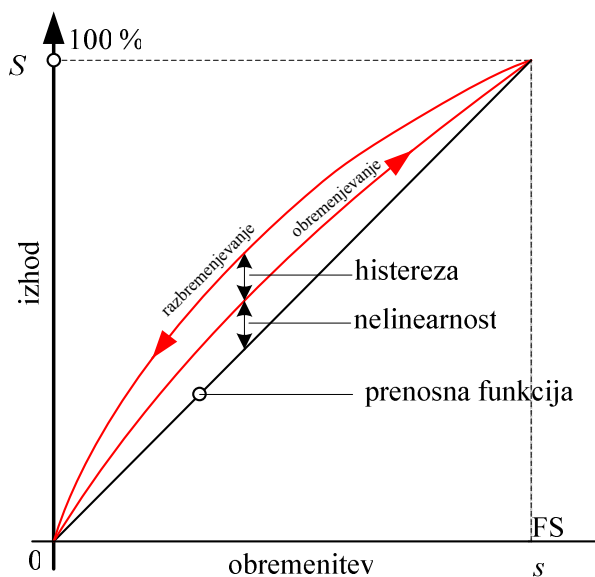


Slika 3: Prikazani trije različni možni načini linearne aproksimacija prenosne funkcije.

Ker so možni različni načini določanja aproksimacijske premice, lahko dobimo različne poteke premice, ki opisuje prenosno funkcijo sensorja. Ker so posledično zato tudi vrednosti za napako nelinearnosti različne pri enaki obremenitvi, je potrebno vedeti, na kakšen način je bila napaka nelinearnosti določena.

### 2.2.6 Histereza

Napaka histereze je prikazana na sliki 4, kjer je vrisana tudi napaka nelinearnosti.



Slika 4: Prikazani napaka nelinearnosti in napaka histereze.

Napaka histereze senzorja (angl. hysteresis error) je odstopanje izhodne vrednosti v isti točki vhodne veličine, ko se ji približujemo z dveh različnih smeri. Pri isti vrednosti vhodne veličine, s katero obremenjujemo senzor, dobimo različne odzive glede na to, ali smo v točko ki jo opazujemo, prišli tako, da vrednost vhodne veličine večamo ali zmanjšujemo. Tipični vzroki za pojav histereze so trenje in strukturne spremembe v materialu.

### 2.2.7 Kombinirana napaka

Velikokrat proizvajalci v tehnični dokumentaciji za senzor podajajo kombinirano napako (angl. combined error). Kombinirana napaka je največje odstopanje od premice skozi zunanji točki izhodnega razpona in meritvijo pri naraščajoči in padajoči vhodni veličini. Kombinirana napaka zajema napako nelinearnosti in tudi napako histereze.

### 2.2.8 Lezenje

Lezenje je časovno odvisna sprememba na izhodu senzorja, ki se pojavi kljub temu, da se vhodna veličina ne spreminja in so pogoji okolice ves čas konstantni in pri konstantnem napajanju. Lezenje (angl. creep) se meri pri obremenitvi z maksimalno zmogljivostjo merilne celice in izrazi v % maksimalne zmogljivosti v določeni časovni enoti (običajno 10 minut ali 30 minut).

Pri merilnih celicah je lezenje zlasti neugodno v primerih, ko je merilna celica obremenjena in se obremenitev le malenkostno spreminja. V takem primeru, če nimamo algoritma za kompenzacijo mehanskega popuščanja, lahko teh majhnih sprememb v obremenitvi ne zaznamo.

Pri natančnejšem tehtanju je pojav lezenja zelo moteč. Številni izdelovalci tehtnic oziroma merilnih celic vlagajo precej truda v odpravo tega neželenega pojava. Ker tega pojava ni možno povsem zadovoljivo odpraviti, se uporabljajo posebni algoritmi, ki na podlagi obremenitve vnaprej izračunajo, kakšen bo potek mehanskega popuščanja in ustrezno korigirajo prikazano vrednost, ko zaznajo spremembo obremenitve [6-8].

### 2.2.9 Občutljivost

Občutljivost (angl. sensitivity) je razmerje med spremembo izhodnega signala merilnega senzorja v odvisnosti od spremembe vhodne veličine. V praksi težimo k temu, da je odziv senzorja linearen, saj v tem primeru njegov odziv opisuje enostavna linearna prenosna funkcija -  $S_{lin}$ . Občutljivost je v takem primeru odvod prenosne funkcije (10).

$$S_{lin} = \left( \frac{ds}{dS} \right) = \text{konst.} \quad (10)$$

Občutljivost idealnega linearnega senzorja je konstantna po vsem merilnem območju in je kar enaka strmini karakteristike, zato lahko včasih v literaturi zasledimo tudi druge izraze, kot sta strmina ali naklon karakteristike.

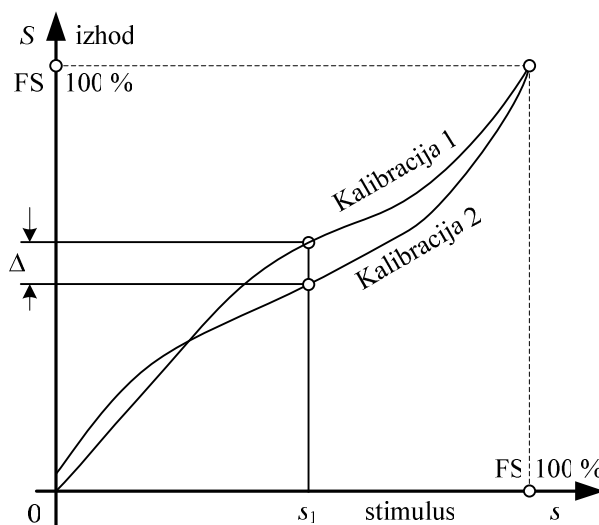
Zlasti pri simetričnih mostičnih vezjih (Wheatstonov mostič), je občutljivost senzorja direktno odvisna tudi od napajalne napetosti mostičnega vezja. Zato za merilne celice pogosto zasledimo podatek o občutljivosti, kjer je podana občutljivost v odvisnosti glede na napajalno napetost. Tipična občutljivost merilnih celic s kovinskimi uporovnimi merilnimi lističi znaša okrog  $S_{lin} = 2 \text{ mV/V}$ . Razumljivo je, da napajalne napetosti ne moremo poljubno večati, pač pa so precej standardno razširjeni vrednosti napajalne napetosti in sicer 5 V ter 10 V.

### 2.2.10 Ponovljivost

Ponovljivost (angl. repeatability) je sposobnost merilne celice, da zagotavlja verno sledljivost rezultatov v primeru, ko z istim bremenom večkrat in na enak način obremenimo merilno celico pri enakih pogojih testiranja. Napako ponovljivosti  $\delta_r$  izrazimo kot največjo razliko odčitkov izhodnega signala pri dveh izvedenih kalibracijskih ciklih. Napako ponovljivosti običajno izražamo v odstotkih vrednosti izhodnega razpona (11), kjer je FS polni izhodni razpon,  $\Delta$  pa napaka dveh zaporednih kalibracijskih ciklov.

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \cdot 100\% \quad (11)$$

Na sliki 5 je prikazana napaka ponovljivosti. Za enako vhodno vrednost  $s_1$  dobimo pri dveh kalibracijskih ciklih različni vrednosti za izhodno vrednost.



Slika 5: Napaka ponovljivosti, ki se pojavi pri dveh zaporednih kalibracijskih ciklih.

### 2.2.11 Ostale karakteristike, ki so specifične za merilne celice

Maksimalna zmogljivost ( $E_{max}$ ) (angl. maximum capacity):

je največja vrednost mase bremena, s katero lahko obremenimo merilno celico, ne da bi presegli največji dovoljeni pogrešek merilne celice - NDP.

Maksimalna obremenitev v merilnem območju ( $D_{max}$ ) (angl. maximum load of the measuring range):

je največja vrednost mase bremena, s katerim obremenimo merilno celico med umerjanjem ali uporabo. Ta vrednost ne sme biti večja od ( $E_{max}$ ).

Minimalna mrtva obremenitev ( $E_{min}$ ) (angl. minimum dead load):

je najmanjša vrednost mase bremena, s katero lahko obremenimo merilno celico, ne da bi presegli NDP.

Minimalna obremenitev v merilnem območju ( $D_{min}$ ) (angl. minimum load of the measuring

range):

je najmanjša vrednost mase bremena, s katero obremenimo merilno celico med uporabo ali umerjanjem. Ta vrednost ne sme biti manjša kot  $E_{\min}$ .

Meja varne obremenitve ( $E_{\lim}$ ) (angl. safe load limit):

je maksimalna vrednost mase bremena, s katerim lahko obremenimo merilno celico brez trajnih posledic na tehnične karakteristike, deklarirane za merilno celico.

Maksimalno število kontrolnih intervalov merilne celice ( $n_{\max}$ ) (angl. maximum number of load cell verification intervals):

je maksimalno število kontrolnih intervalov, v katere lahko razdelimo merilno območje merilne celice, za katere velja, da napaka rezultata ne sme presegati največjega dopustnega pogreška – NDP.

Minimalni preizkusni interval za merilno celico ( $v_{\min}$ ) (angl. minimum load cell verification interval):

je najmanjša vrednost preizkusnega intervala (masa) na katere se lahko razdeli merilno območje.

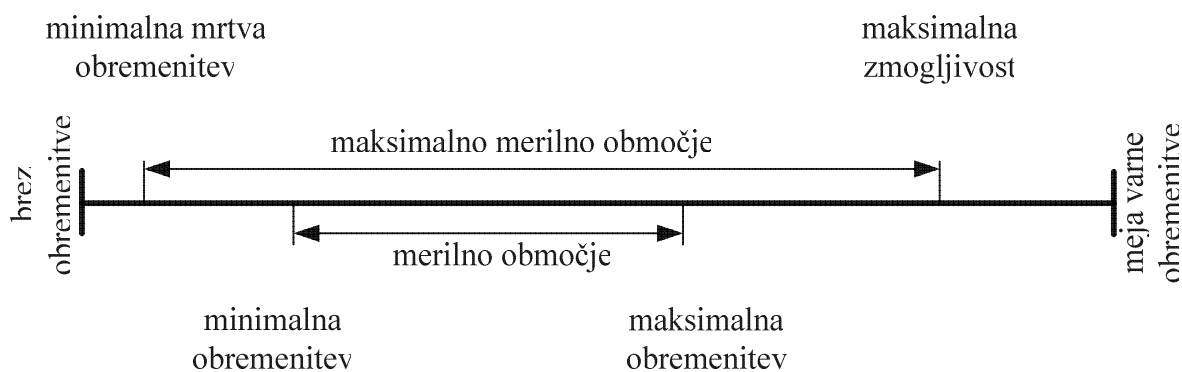
Število preizkusnih razdelkov za merilno celico ( $n$ ) (angl. number of load cell verification intervals):

je število preizkusnih razdelkov merilne celice, ki jih dobimo z razdelitvijo merilnega območja merilne celice.

Največji dopusten pogrešek (NDP) (angl. maximal permissible error):

je ekstremna vrednost pogreška, dovoljenega s priporočilom mednarodne organizacije za zakonsko metrologijo, ki se nanaša na merilne celice (OIML R 60).

Na sliki 6 so grafično prikazane nekatere izmed zgoraj opisanih karakteristik. Celotno območje je omejeno z mejo varne obremenitve  $E_{\lim}$ , če to mejo presežemo, merilno celico trajno poškodujemo.



Slika 6: Grafičen prikaz nekaterih definicij. Z merilno celico dejansko merimo v območju med  $D_{\min}$  in  $D_{\max}$ .

Maksimalno merilno območje se razteza od  $E_{\min}$  do  $E_{\max}$ . Dejansko pa v praksi izrabljamo samo merilno območje, ki je omejeno z  $D_{\min}$  in  $D_{\max}$ .

## 2.3 Razred točnosti in razvrstitev merilnih celic po OIML priporočilih

Merilne celice so razvrščene, skladno z doseženimi metrološkimi lastnostmi v 4 razrede točnosti:

- razred A
- razred B
- razred C
- razred D

Razvrstitev merilnih celic v deklarirane razrede točnosti je narejena z namenom, da se olajša njihova uporaba v različnih sistemih, kjer se merilne celice uporabljajo za merjenje mase. Ker se vgrajujejo v različne sisteme, ni nujno, da je realizirani sistem v enakem razredu točnosti kot uporabljena merilna celica. Prav tako ni zahtevano, da merilni sistem za merjenje mase uporablja merilne celice, ki bi bile predhodno overjene in deklarirane skladno z OIML priporočili.

Tabela 1: Maksimalno število kontrolnih intervalov merilne celice ( $n_{\max}$ ) glede na razred točnosti.

	razred A	razred B	razred C	razred D
spodnja meja	50.000	5.000	500	100
zgornja meja	neomejeno	100.000	10.000	1.000

### 2.3.1 Vrste obremenitev merilnih celic

Merilna celica so narejene za določen način merjenja in ni vseeno, na kakšen način merilno celico obremenimo. Če merilno celico obremenimo na tlak, govorimo o tlačni obremenitvi (angl. compression loading). Če merilno celico obremenimo z natezno silo, govorimo o natezni obremenitvi (angl. tension loading). Določene merilne celice so primerne tako za tlačne kot tudi za natezne obremenitve, to so univerzalne merilne celice. Za konzolne merilne celice, ki so na enem mestu fiksno vpete, je značilno, da jih obremenjujemo le na en način. OIML tudi predpisuje, da je način obremenitve merilne celice podan v dokumentaciji, še posebej v primeru, ko iz same konstrukcije merilne celice le tega ni možno nedvoumno definirati. V tabeli spodaj so podani standardni simboli, s katerimi označujemo način obremenitve merilne celice.

Tabela 2: Standardizirani simboli za označevanje dovoljene vrste obremenitev za merilno celico.

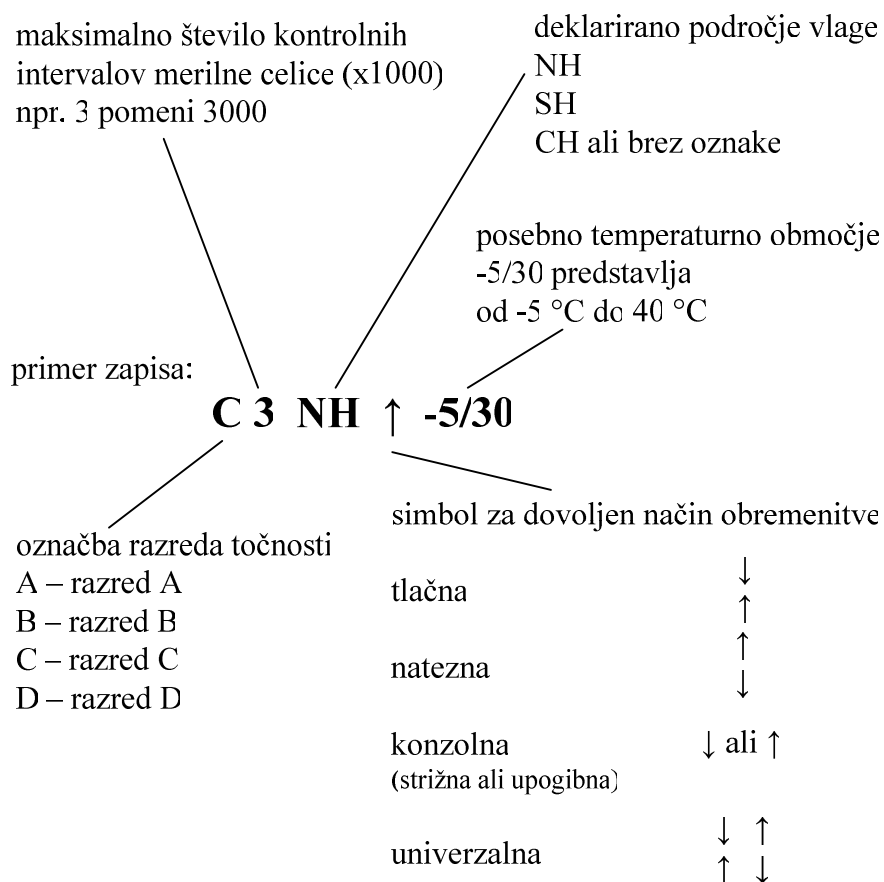
vrsta obremenitve	simbol
tlačna obremenitev	↑ ↓
natezna obremenitev	↓ ↑
konzolna (strižna ali upogibna obremenitev)	↑ ali ↓
univerzalna	↑ ↓ ↓ ↑

### 2.3.2 Celotna a klasifikacija merilne celice

Merilna celica, za katero želimo podati celotno klasifikacijo, mora vsebovati vseh šest sledečih zapisov:

1. oznako razreda točnosti
2. maksimalno število kontrolnih intervalov merilne celice
3. oznako za dovoljen način obremenitve, če je potrebna
4. omejeno temperaturno področje uporabe, če je potrebno
5. oznako za deklarirano področje vlage
6. ostale podatke, ki podrobneje podajo ostale značilnosti; od tega so določeni obvezni (npr. ime ali znak izdelovalca, model merilne celice, serijska številka in leto izdelave,  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$ ,  $E_{\lim}$  (vse tri obremenitve morajo biti podane v ustreznih enotah g, kg ali t),  $v_{\min}$ , napajalna napetost ...)

Vzorčen primer kompletne klasifikacije merilne celice je podan na sliki 7. Prikazani so možni zapisi, ni pa podanega primera zapisa podatkov, zahtevanih pod točko 6.



Slika 7: Primer prikaza standardnih klasifikacij za merilno celico. Ostali podatki (točka 6) niso prikazani.

## 2.4 Kratek povzetek OIML R 60 priporočil

Merilne lastnosti in specifikacije merilnih celic, ki jih kupimo na trgu, so podane z ustreznimi certifikati. Takšen mednarodno sprejet in priznan certifikat je OIML R 60, izdan s strani mednarodne organizacije za zakonsko meroslovje OIML (Organisation Internationale de Metrologie Legale) [9]. OIML je mednarodna organizacija za zakonsko meroslovje, ki je bila ustanovljen leta 1955 z namenom globalne podpore za poenotenje procesov zakonskega meroslovja. Priporočila izdana s strani OIML niso obvezujoča, vendar jih uporabljajo in povzemajo v svoji nacionalni zakonodaji vse države članice, ki jih je trenutno 60, tudi 58

pridruženih držav članic. Med temi državami so vse članice Evropske unije (EU), Japonska, Amerika, Rusija, Avstralija in Združene države Amerike, če naštejemo le največje. Testi, ki jih opisuje OIML R 60, so omejeni izključno na testiranje in umerjanje merilnih celic.

V EU OIML R 60 certifikate interpretira Evropsko združenje za legalno meroslovje WELMEC (European Cooperation in Legal Metrology) [10]. V Združenih državah Amerike pa NTEP (National Type Evaluation Program), ki je nekakšen ekvivalent Evropskemu OIML.

#### 2.4.1 Okolje in pogoji testiranja

Pred izvedbo meritev po priporočilih OIML R 60, je na lokaciji izvedbe meritev potrebno preveriti potrebnost korekcije konstante težnega pospeška. Težni pospešek je deklariran kot  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Dejanski težni pospešek pa po celotni zemeljski obli variira, tudi do 0,8 %. Težni pospešek je odvisen od lokacije in razdalje med tehtanim telesom in centrom Zemlje. Za vsako lokacijo na zemeljski obli se lahko težni pospešek  $g$  določi eksperimentalno ali pa se izračuna [10, 11]. Za izračun težnega pospeška se smatra enačba, ki jo navaja WGS84 (World Geodetic System 1984), kot najbolj točna, kjer ob upoštevanju nadmorske višine dobimo (12):

$$g = 9,7803267714 \left( \frac{1 + 0,00193185138639 \cdot \sin^2 \lambda}{\sqrt{10,00669437999013 \cdot \sin^2 \lambda}} \right) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot h$$

$\lambda$  - zemljepisna širina (°) (12)

$h$  - nadmorska višina (m)

Na težnostni pospešek v manjši meri vpliva tudi geološka sestava tal in reliefne značilnosti na specifični geografski legi, vendar pa tega v splošno enačbo za izračun gravitacijskega pospeška v poljubni točki zemeljske oble ni mogoče zajeti.

Kot je razvidno iz grafa na sliki 8, se dejanski težnostni pospešek spreminja od  $9,780 \text{ m/s}^2$  na ekvatorju do  $9,832 \text{ m/s}^2$  na tečaju zemeljske oble, torej za 0,53 %. Dodatno se zmanjša še za 0,03 % na vsakih 100 m nadmorske višine, končno variiranje zaradi višine dosega 0,26 % po celotni zemeljski površini.



Slika 8: Težnostni pospešek  $g$  v odvisnosti od geografske širine in nadmorske višine za posamezna večja mesta pa so izmerjene vrednosti gravitacijskega pospeška podane v tabeli 3.

Tabela 3: Vrednost težnostnega pospeška  $g$  v večjih svetovnih mestih [11].

mesto	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	mesto	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	mesto	$g$ (m/s <sup>2</sup> )
Amsterdam	9,813	Istanbul	9,808	Pariz	9,809
Atene	9,807	Kalkuta	9,788	Rim	9,803
Auckland, NZ	9,799	Köbenhavn	9,815	Rio de Janeiro	9,788
Bangkok	9,783	Kuvajt	9,793	San Francisco	9,80
Bruselj	9,811	Lizbona	9,801	Singapur	9,781
Buenos Aires	9,797	London	9,812	Stockholm	9,818
Cape Town	9,796	Los Angeles	9,796	Sydney	9,797
Chichago	9,803	Madrid	9,800	Tajpej	9,790
Ciudad de Mexico	9,779	Manila	9,784	Tokio	9,798
Džakarta	9,781	New York	9,802	Vancouver	9,809
Frankfurt	9,810	Nikozija	9,797	Washington, DC	9,801
Havana	9,788	Oslo	9,819	Wellington, NZ	9,803
Helsinki	9,819	Ottawa	9,806	Zürich	9,807

Če v enačbo (12) vstavimo podatke za Ljubljano, to je zemljepisno širino  $\lambda = 46,042^\circ$  in nadmorsko višino  $h = 320$  m, izračunamo težnostni pospešek  $g_L = 9,80615$  m/s<sup>2</sup>, ki pa dejansko malo odstopa od izmerjenega za Ljubljano, ki je  $g_L = 9,805931$  m/s<sup>2</sup>. Ker izračunana in izmerjena vrednost težnostnega pospeška minimalno odstopata od deklarirane, korekcija konstante težnega pospeška ni potrebna.

#### 2.4.2 Potek karakterizacije merilnih celic

Merilno celico namestimo na pripravo za dodajanje bremena in obremenimo z  $D_{\min}$  in jo temperaturno stabiliziramo na želeno temperaturo.

Merilno celico 3-krat obremenimo ( $D_{\min} \rightarrow D_{\max}$ ) in razbremenimo ( $D_{\max} \rightarrow D_{\min}$ ). Pri vsaki spremembi obremenitve počakamo 5 minut. Postavimo na  $D_{\min}$  in počakamo 5 minut.

Zabeležimo vrednost izhodne napetosti pri  $D_{\min}$ .

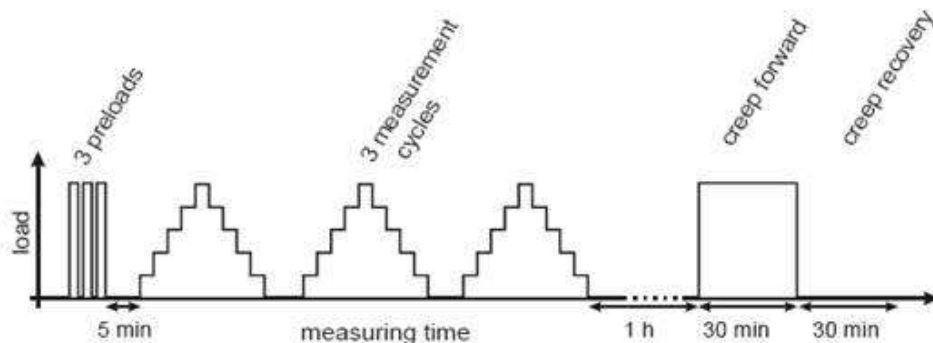
Merilne točke so pri dodajanju in odvzemanju obremenitve v enakih časovnih intervalih. Ko breme dodamo (ali odvzamemo), počakamo 10 s (za merilne celice 0 kg – 10 kg), preden zabeležimo izhodno vrednost merilne celice. Izberemo vsaj 5 merilnih točk, enakomerno razporejenih med  $D_{\min}$  in  $D_{\max}$ .

V vsaki merilni točki zabeležimo maso in odziv merilne celice.

Za razred točnosti C in D cikel meritev dodajanja in odvzemanja bremena ponovimo še 2-krat.

Ko merimo mehansko popuščanje, je potrebno predhodno merilno celico pustiti 1 uro obremenjeno z  $D_{\min}$ . Nato jo obremenimo z  $D_{\max}$  in beležimo časovni potek izhodnega signala v naslednjih 30 minutah. Obvezno zabeležimo vrednost izhoda v 20. minuti in 30. minuti. Razlika med začetnim odčitkom (pri  $D_{\min}$ ) in katerikoli odčitkom v periodi 30 minut (ko je merilna celica obremenjena z  $D_{\max}$ ) ne sme preseči  $0,7 \cdot NDP$ . Razlika, odčitana, v 20. in 30. minuti, pa ne sme preseči  $0,15 \cdot NDP$ .

Slika 9 podaja grafičen prikaz poteka meritev pri posamezni temperaturi. Najprej merilno celico 3-krat obremenimo in razbremenimo (treniranje merilne celice). Sledijo tri zaporedne meritve, kjer postopoma dodajamo in odvzemamo testna bremena. Na koncu naredimo še test lezenja in test vrnitve v izhodišče pri minimalni obremenitvi. Enak test se ponovi tudi za druge temperature. Če temperaturno območje ni predpisano, potem se meri vpliv temperature vsaj pri  $5^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$  in  $30^\circ\text{C}$ .



Slika 9: Priporočen potek za testiranje merilnih celic, testna procedura po OIML R 60 – za vsako temperaturo. Grafično je pokazan potek obremenjevanja merilne celice v času izvedbe meritve.



### 3 Specifikacije in zahteve za merilno celico

#### 3.1 Splošne zahteve

Kljub namenu, da kuhinjski aparat z dodatno funkcijo tehtanja prinaša dodatno funkcionalnost, pa ostaja dejstvo da zaradi tega primarne funkcije gospodinjskega aparata, tj. obdelava živil, v nikakor ne smejo biti okrnjene. Funkcija tehtanja je v tem primeru dodatna funkcija, ki je namenjena za lažje in uporabniku prijaznejše delo pri pripravi živil. Funkcija tehtanja naj bo zato prilagojena za tehtanje večjih količin živil, kot je na primer moka, do skupne mase 5 kg. Funkcija tehtanja se izvaja samo pri mirujočem aparatu.

Velikost in oblika merilne celice naj bo po velikosti primerljiva že obstoječim gumijastim nogicam kuhinjskih aparatov oziroma naj ne bo bistveno večja. Za dizajn kuhinjskih aparatov, ki jih proizvaja BSH Hišni aparati d. o. o., je primarna vgradnja štirih merilnih celic v dno aparata. Vgradnja merilnih celic med dnom aparata in delovno podlago je ugodna rešitev tudi zato, ker je v tem primeru razvita platforma gospodinjskega aparata, ki omogoča najlažji nadaljnji razvoj pušča največ možnosti za morebitne nadgradnje ali kasnejših modifikacije kuhinjskega aparata. Predvidena je vgradnja štirih merilnih celic v kuhinjski aparat, kjer je za izbor ustrezne nosilnosti potrebno upoštevati maso aparata in njegovo dinamiko med delovanjem.

Cilj je bil razviti hidravlično merilno celico enostavne konstrukcije iz standardnih, na trgu dostopnih komponent, ki bo ekonomsko sprejemljiva.

Če povzamemo na kratko konkretne zahteve:

- vgradnja merilnih celic prinaša dodano funkcionalnost aparata,
- primarne funkcije aparata s tem ne smejo biti zmanjšane,
- funkcija tehtanja se izvaja, ko aparat miruje, predvidi se možnost mreženja senzorjev za realizacijo naprednih funkcij gospodinjskega aparata,
- robustna merilna celica, ki ne potrebuje dodatne zaščite med delovanjem in manipulacijami z aparatom,
- merilna celica majhnih dimenzij, ki jo lahko integriramo v obstoječ prostor, namenjen gumijastim nogicam gospodinjskega aparata,
- točnost primerljiva oziroma boljša od konkurence (0,7 %),
- občutljivost večja kot pri merilnih celicah z folijskimi uporabnimi merilnimi lističi,
- princip delovanja je hidravlična merilna celica,
- sprejemljiva cena in optimizacija za velikoserijsko proizvodnjo.

#### 3.2 Določitev merilne celice glede na zahteve preobremenitev

Ker je merilna celica izpostavljena statičnim in dinamičnim obremenitvam med delovanjem in rokovanjem z aparatom, v katerega je vgrajena, je potrebno glede na okolje uporabe, tip in kapaciteto tehtnice, izbrati merilno celico z ustrezno maksimalno zmogljivostjo. Splošne formule za izbor ustrezne merilne celice ni, pač pa empirično preizkušene enačbe in priporočila [12]. Znana je izkustvena enačba (13), po kateri lahko približno določimo

priporočeno vrednost za zmogljivost merilne celice.

$$C = 1,25K \frac{W_T + W_N}{N} = 1,25 \cdot 1,5 \frac{5 \text{ kg} + 5 \text{ kg}}{4} = 4,68 \text{ kg}$$

kjer je:

$C$  – priporočena vrednost zmogljivosti merilne celice (13)

$W_T$  – masa mrtve obremenitve (kg)

$W_N$  – masa tehtane snovi (kg)

$K$  – faktor dinamične obremenitve ( $K=1,5$ )

V zgornji enačbi se pojavi izraz masa tehtane snovi in predstavlja maso, ki jo želimo tehtati. Masa mrtve obremenitve pa predstavlja maso, ki obremenjuje merilne celice, ne da bi karkoli tehtali, v našem primeru je to masa kuhinjskega aparata. Faktor dinamične preobremenitve je določen s tipom tehtnice. Funkcijsko najbližja je izvedba v tehtnica v obliki platforme, ki ima dinamičen faktor preobremenitve 1,5.

Če v zgornjo empirično enačbo vstavimo številke 5 kg za maso ki jo želimo tehtati in 5 kg in faktor dinamične obremenitve 1,5, vgrajene pa imamo 4 merilne celice dobimo, da je priporočena zmogljivost merilnih celic 5 kg (zaokroženo navzgor).

Pri vgradnji tehtnice v kuhinjski aparat je velika mrtva teža v primeru dinamičnih obremenitev trenutno neznanka in jo je potrebno podrobneje raziskati. Podatkov o dolgotrajnejših meritvah pri kuhinjskem aparatu z vgrajenimi merilnimi celicami nismo zasledili.

## 4 Stanje področja

### 4.1 Vrste merilnih celic

Maso lahko merimo na več načinov, pet najbolj pogosto uporabljenih metod za merjenje sile teže je [4]:

1. iskanje ravnovesja med neznano silo in silo gravitacije znane uteži,
2. s pomočjo merjenja pospeška telesa z znano maso, na katerega deluje neznana sila,
3. ravnovesje med neznano silo in nasprotno silo elektromagnetnega polja,
4. pretvorba sile v tlak tekočine in meritev tega tlaka,
5. z meritvijo tlačne ali natezne napetosti, ki jo v nosilnem elastičnem telesu povzroči delovanje neznane sile.

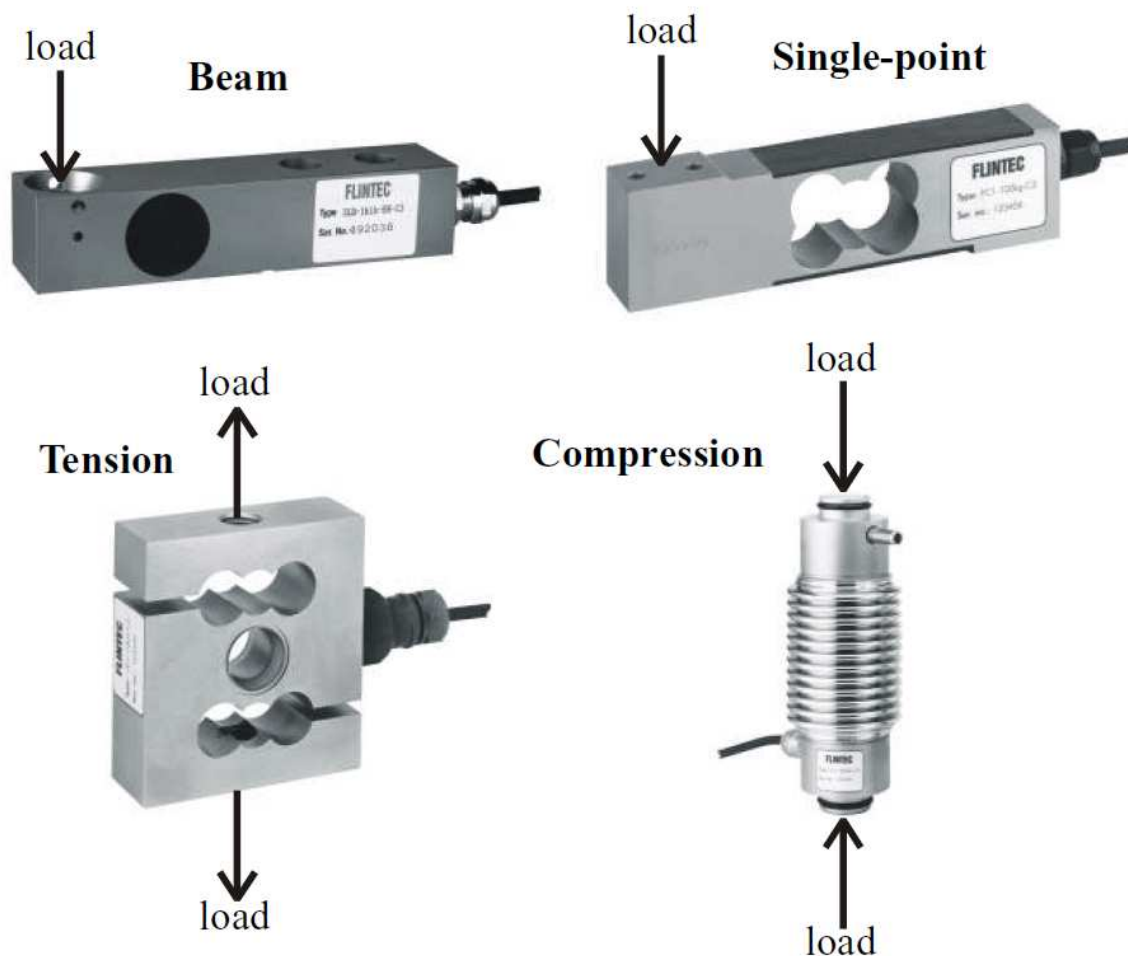
Daleč najbolj razširjena je metoda 5, metodi 3 in 4 se uporabljata v bolj specifičnih primerih. Metoda 3 se pretežno uporablja predvsem tam, kjer se zahtevajo zelo precizna merjenja, medtem ko je metoda 4 bolj razširjena v specifičnih okoljih, kot so zahteve po avtonomnem delovanju, velike obremenitve, agresivna in industrijska okolja.

Pri metodi 5 se najpogosteje uporablja princip merjenja spremembe električne upornosti zaradi spremembe dolžine merilnega elementa pod vplivom mehanske obremenitve. Merilni element pretvarja deformacijo (raztezek, skrček, upogib, itd) v električni signal. Deluje na principu piezouporovnega efekta električnih prevodnikov oz. uporov. Piezoupornost (Kelvin, 1857) je lastnost materialov, da pri mehanski deformaciji spremenijo električno upornost. Govorimo o uporovnih merilnih lističih, ki jih glede na material delimo na:

- kovinske (folijski, tankoplastni)
- polprevodniške
- debeloplastne (tudi keramične)

#### 4.1.1 Merilne celice s kovinskimi merilnimi lističi

Najbolj razširjene so merilne celice, ki imajo na vzmetnem kovinskem telesu nameščene folijske uporovne merilne lističe, kot smo že omenili. Uporabljajo princip redukcije obremenitve, kjer glavino obremenitve prevzame kovinski vzmetni element, ki je oblikovan tako, da se na enem ali več mestih koncentrirajo tlačne in/ali natezne mehanske napetosti. Kovinski vzmetni element je narejen iz posebnih vrst jekla ali aluminija z namenom zmanjšanja negativnih vplivov, kot so staranje, lezenje in korozija. Uporovni merilni lističi so nameščeni na mestih največjih mehanskih napetosti tako, da sta dva na mestu raztezka in dva na mestu skrčka in so običajno vezani v Wheatsonov mostič. Tako dosežemo linearen in ponovljiv odziv s kar največjo občutljivostjo za dani vhodni razpon obremenitev. Izhodna diferencialna napetost mostičnega vezja je poleg obremenitve vzmetnega elementa odvisna še od napajalne napetosti mostičnega vezja, temperature okolice, časa (staranja elementov) in še nekaterih drugih vplivov. Nekaj najbolj značilnih izvedb je prikazanih na sliki 10, pri vseh pa je uporabljena folijska izvedba uporovnih merilnih lističev, ki je tudi daleč najbolj razširjena.



Slika 10: Prikaz nekaj najbolj tipičnih izvedb merilnih celic s kovinskimi uporovnimi merilnimi lističi.

Prevladujejo kovinski uporovni merilni lističi v folijski izvedbi, ki so podrobno opisani v [13]. Namen tega dela ni poglobljeno obravnavanje te vrste merilnih celic, je pa zaradi njihove razširjenosti, različnih izvedb in namembnosti na razpolago veliko literature [4, 14, 15].

#### 4.1.2 Debeloplastna tehnologija

Debeloplastna tehnologija se intenzivno razvija in uveljavlja v elektronski industriji vse od konca 60-ih let prejšnjega stoletja. Uspešno se uveljavlja tudi na področju senzorskih elementov, zlasti senzorjev za merjenje tlaka. Zaradi relativno preprostega načina izdelave in razvite tehnologije lahko proizvajalci dosegajo nižje cene končnih izdelkov.

Spremembo upornosti v upor, ki je izpostavljen mehanski deformaciji, povzročata sprememba mehanskih dimenzij upora in sprememba specifične upornosti zaradi mikrostrukturnih sprememb. To opisuje enačba (14), kjer prvi del predstavlja prispevek zaradi spremembe geometrije, drugi del pa prispevek zaradi mikrostrukturnih sprememb [13].

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho}$$

$R$  – upornost

$\varepsilon$  – relativni raztezek ("strain")

$\nu$  – Poissonovo število

$\rho$  – specifična upornost

(14)

Faktor merilnika (GF) (ponekod omenjen tudi kot raztezna občutljivost ali faktor gauge) (angl. gauge factor) upora je podan kot razmerje med relativno spremembo upornosti ( $\Delta R/R$ ) in relativnim raztezkom ( $\Delta l/l$ ):

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}}$$

(15)

Sprememba v geometriji prispeva k GF med 2 – 2,5. Višje vrednosti GF so posledica mikrostrukturnih sprememb, ki vplivajo na spremembe v specifični upornosti. GF pri uporih, narejenih z debeloplastno tehnologijo se v glavnem giblje od 3 do 15 [16]. Debeloplastni upori imajo zaradi dobre stabilnosti, nizkega temperaturnega koeficienta upornosti (TKR) pod  $100 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  in relativno nizke cene določene prednosti tako pred mataloplastnimi (nizek GF, nizek TKR, visoka cena) in polprevodniškimi upori (velik GF, visok TKR, nizka cena) – kar je povzeto v tabeli 4.

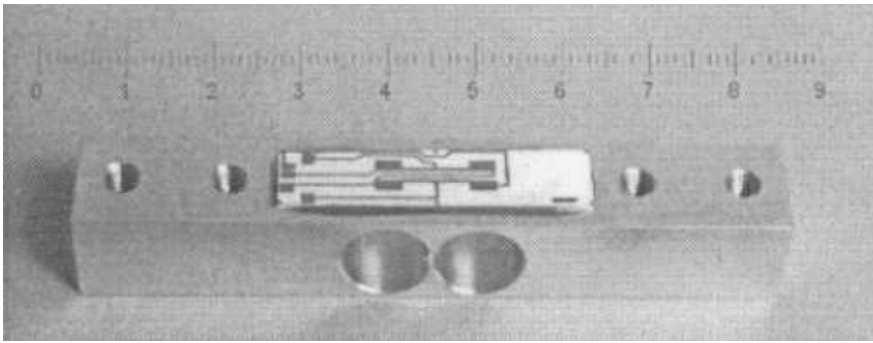
Tabela 4: Primerjava osnovnih značilnosti za uporabne merilne lističe različnih izvedb [17, 18].

tehnologija	folijska	debeloplastna	polprevodniška
GF	2	od 2 do 20	od 50 do 150
TKR ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	10	50(100)	1500
TKGF* ( $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	100	300	2000
dolgoročna stabilnost	odlična	zelo dobra	dobra
cena	visoka	nizka	nizka**

\* TKGF – temperaturni koeficient GF

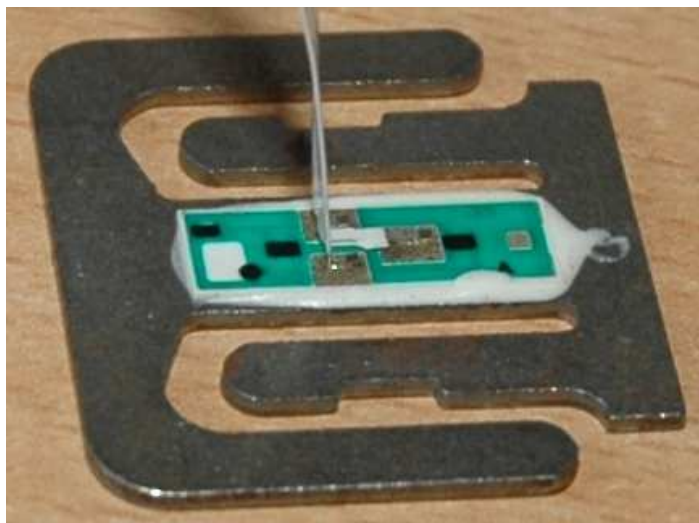
\*\* proizvodnja velikega obsega

Debeloplastna tehnologija je v določenih primerih ugodna, saj zagotavlja dober kompromis med ceno in lastnostmi senzorjev mehanskih deformacij. Prav tako je v [17] omenjena tudi merilna celica za kuhinjsko tehtnico. Merilna celica je narejena za merilno območje 10 g do 3000 g s točnostjo 2 % polnega obsega. Debeloplastni senzorski element mehanskih deformacij je prilepljen na kovinski nosilec z dvojnim upogibom. Slika 11 prikazuje prototipen izdelek [17]. Kolikor nam je poznano, ta izdelek ni v serijski proizvodnji, ker je bil njen razvoj ustavljen pred dokončanjem zaradi poslovnih razlogov naročnika.



Slika 11: Merilna celica s senzorjem mehanskih deformacij, narejenim z debeloplastno tehnologijo.

Obstaja precej patentov, ki opisujejo merilne celice, katerih elastični nosilni element je izrezan ali izsekan iz kovinske plošče [19-21] – govorimo o planarni merilni celici. Pri proizvajalcu Krups že komercialno uporabljajo merilne celice, ki so izsekane iz jeklene plošče debeline 1,2 mm. Na kovinski nosilec je pritrjena ploščica iz korunda dimenzij 18x6 mm. Na keramični podlagi sta natisnjena dva debeloplastna upora, ki sta vezana v polovičen Wheatsonov mostič. Posamezen upor ima vrednost 10 k $\Omega$ . Takšna cenena izvedba je vgrajena v komercialno dostopne kuhinjske aparate z integrirano tehtnico, vendar so rezultati primerjalnega testa med najslabšimi, kot je razvidno iz tabele 6, kjer v poglavju 4.4.4 primerjamo lastnosti komercialno dostopnih aparatov z vgrajeno funkcijo tehtnice. Planarna merilna celica izsekana iz pločevine je prikazana na sliki 12.



Slika 12: Merilna celica aparata proizvajalca Krups. Na korundni podlagi sta natisnjena dva debeloplastna upora (dva črna pravokotnika). Korundna podlaga je nalepljena na kovinski nosilec.

Da bi se izognili lepljenju korundnega elementa na kovinski vzmetni element, je težnja, da se debeloplastni uporovni mostič natisne neposredno na kovinski vzmetni element. V [16] avtorji obravnavajo tiskanje debeloplastnih uporov na kovinski vzmetni nosilec. Ker je jeklo električno prevoden material, je potrebno najprej nanesti izolacijsko plast. Izolacijsko plast se lahko nanese s tiskanjem dielektričnih past – tako imenovan postopek DOS (angl. Dielectric-on-Steel) ali pa z namestitvijo folij LTCC (angl. Low-Temperature Cofired Ceramic) na jeklo (TOS-Tape-on-Steel). Pri uporabi DOS postopka so najprej natisnili dielektrik na jeklenem vzmetnem nosilcu in ga žgali pri 850 °C, nato so natisnili prevodnik in upore ter jih ponovno žgali na 850 °C.

Problem pri postopku DOS je v tem, da je potrebno dielektrik, kot tudi upore, žgati pri 850 °C. S tem se jeklenim materialom, ki se uporabljajo kot vzmetni nosilec za merilne celice, drastično poslabšajo mehanske lastnosti. Vsekakor je postopek zanimiv, zato se iščejo načini

in materiali za uporovne in prevodne paste, ki bi jih lahko žgali pri nižjih temperaturah (500 °C – 700 °C).

Preučili smo možnost izdelave merilne celice, kjer bi kot vzmeten element uporabili kar keramičen substrat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – Rubalit 709) [22]. Simulacije smo izvedli s programskim paketom ANSYS za različne načine vpetja in debeline substrata ter obremenjevanja. Simulacije kot tudi preliminarni testi so pokazali, da keramičen substrat kot nosilni element v zamišljeni izvedbi 25,4 mm × 25,4 mm ni mogoče uporabiti. Zaradi nizke upogibne trdnosti keramičnega substrata bi nosilni element počil. Pri manjših dimenzijah pa je vprašljiva občutljivost sensorja. V nadaljevanju smo to idejo opustili.

V zadnjem času se zelo hitro razvija tudi tehnologija LTCC, saj se veliko truda vlaga v raziskave in razvoj 3D struktur za različne produkte kot tudi za različne vrste sensorje. Na področju merilnih celic je objavljenih nekaj člankov o merilnih celicah izvedenih s pomočjo LTCC, vendar gre zaenkrat v vseh primerih za miniaturne celice z območjem merjenja sil od nekaj mN do nekje 15 N, kar pa za naše potrebe ne zadošča.

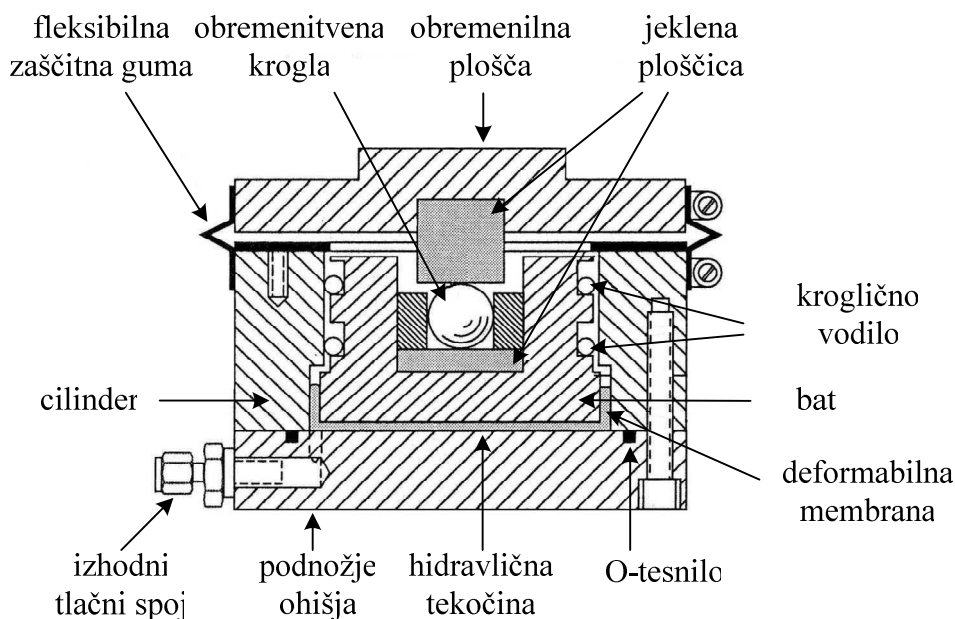
## 4.2 Merilna celica, ki deluje na principu pretvorbe sile v tlak tekočine

### 4.2.1 Hidravlične merilne celice

Hidravlične merilne celice delujejo na principu izenačitve sil, kar predstavlja pretvorbo obremenitve s silo teže v tlak fluida. Kot fluid se običajno uporablja hidravlično olje, ki z določenim nadtlakom zapolnjuje notranjost hidravlične merilne celice. Včasih lahko za to vrsto merilnih celic zasledimo tudi izraz hidrostatična merilna celica. Tlak fluida je soracionalen masi, s katero obremenjujemo merilno celico. Tlak fluida lahko merimo na različne načine, z mehanskim manometrom z Bourdonovo cevjo pa vse do najsodobnejših elektronskih tlačnih sensorjev. V primeru uporabe mehanskega manometra zagotovimo popolnoma avtonomno delovanje merilne celice brez potrebe po dodatnem napajanju in s tem tudi možnost uporabe v eksplozijsko nevarnih okoljih, oziroma v okoljih, kjer uporaba električnega napajanja ni mogoča ali zaželeno.

Za praktično uporabo morajo hidravlične merilne celice delovati brez puščanja fluida s čim manjšim notranjim trenjem, da so točne in da je njihov odziv linearen. Ker so odporne na statične in dinamične preobremenitve, se najpogosteje uporabljajo v industrijskih okoljih in eksplozijsko nevarnih okoljih. Odporne so na vlago, kondenzacijo, čiščenje z visokotlačnimi parnimi čistilci, delujejo lahko celo pod vodo. Primerne so tako za merjenje tlačnih kot tudi nateznih obremenitev ob ustrezni konstrukcijski izvedbi. Njihova pglavitna slabost je visoka cena in v določenih primerih zapletena vgradnja.

Prevladujeta dve izvedbi hidravličnih merilnih celic. To sta izvedba z elastično deformabilno membrano in popolnoma kovinska izvedba [12], ki sta v nadaljevanju na kratko opisani.



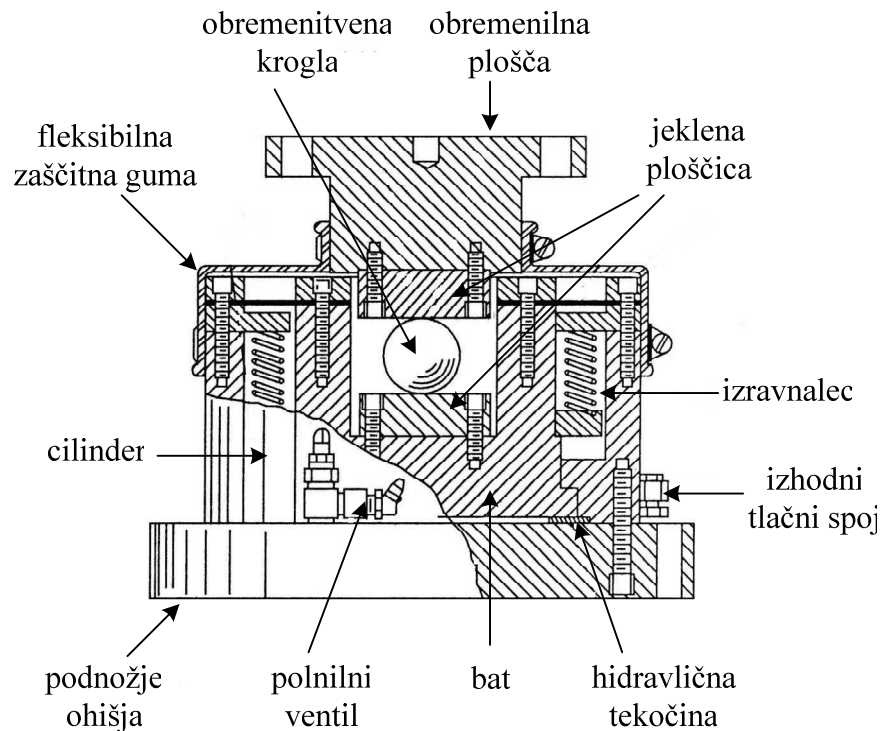
Slika 13: Prerez hidravlične merilne celice z elastično deformabilno membrano

Izvedba s tako imenovano elastično deformabilno membrano se je izkazala kot zelo popularen in uspešen koncept hidravlične merilne celice. Tipična zgradba v prerezu je prikazana na sliki 13. Pri takšni izvedbi je hidravlična tekočina zaprta v komori, ki jo tvorijo stene elastične deformabilne membrane, nameščene med batom in podnožjem ohišja. Da je trenje čim manjše, sta med batom in cilindrom nameščena dva seta kroglinčnih vodil. Takšna sestava dovoljuje gibanje bata le v smeri, paralelni z njegovo glavno osjo. Efektivna površina bata je enaka površini kroga, katerega premer je enak notranjemu premeru deformabilne membrane. Ta površina ostaja konstantna v širokem območju pomikov bata, kar je osnovni pogoj za linearnost, majhno napako histereze in točnost. Pomembna odlika te vrste hidravličnih merilnih celic je relativna neobčutljivost na količino hidravlične tekočine v sistemu, kar pomeni da lahko sistem za merjenje tlaka tekočine preko ustrezne visokotlačne cevi speljemo na oddaljeno lokacijo. Zaradi tega je takšna zasnova tudi relativno neobčutljiva na spremembo volumna hidravlične tekočine zaradi temperature.

Če je takšna hidravlična merilna celica pravilno instalirana in umerjena, je možno dosegati točnost do 0,25 % izhodnega obsega, v večini pa je bolj realistično pričakovati točnost 0,5 % ali 1 % izhodnega dosega, kar običajno zadostuje za izvajanje procesnih meritev v industriji. Običajno se izdelujejo za obremenitve med 50 kg in 20 tonami.

Glavna pomanjkljivost takšne izvedbe je omejitev najvišjega dovoljenega tlaka tekočine na 6,9 MPa zaradi elastične deformabilne membrane. To omejitev proizvajalci odpravljajo z večanjem premera, to je večanjem efektivne površine bata. Omejitev predstavlja deformabilna membrana, saj je ne moremo poljubno večati zaradi procesnih zmožnosti njene izdelave.

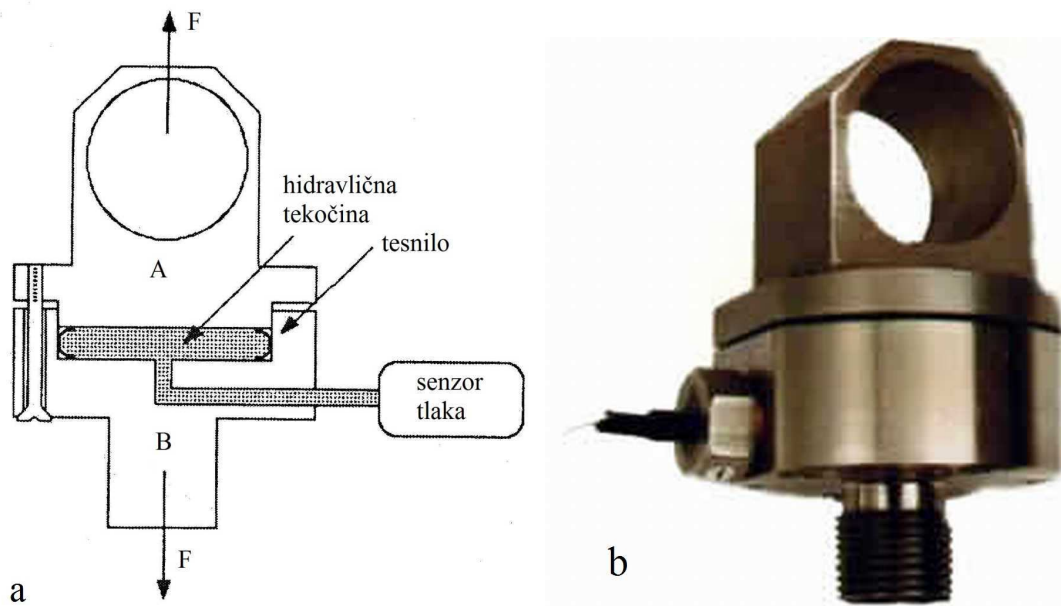
Bolj kompleksno zgradbo, brez elastično deformabilne membrane, ima popolnoma kovinska izvedba hidravlične merilne celice. Za popolnoma kovinsko izvedbo je značilno, da vsebuje zelo majhno količino hidravlične tekočine. Tipična zgradba v prerezu je prikazana na sliki 14. Izjemna lastnost tako narejenih hidravličnih merilnih celic je zmožnost prenašanja izjemno visokih obremenitev. Proizvajalci jih izdelujejo tudi v izvedbah z maksimalno zmogljivostjo do 5.500 ton [23]. Kljub velikim obremenitvam je sama merilna celica zelo toga, saj se pri maksimalni obremenitvi bat običajno ne poda za več kot 0,25 mm. Naravna frekvenca hidravlične merilne celice je visoka in običajno, tudi pri dinamičnih procesih tehtanja, lastna frekvenca ni problematična.



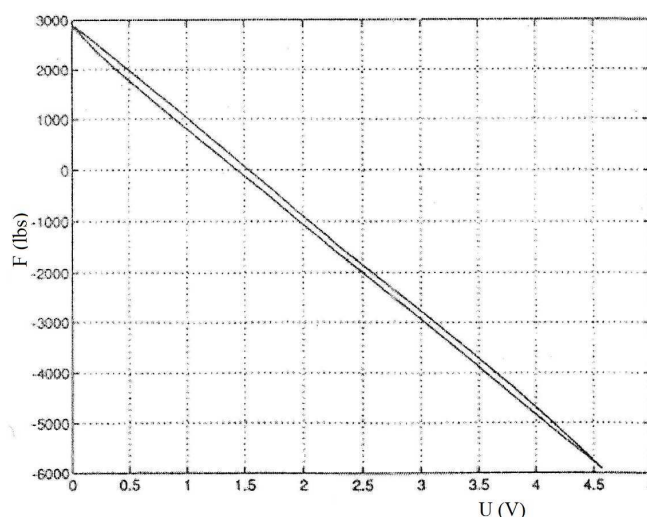
Slika 14: Prerez hidravlične merilne celice v popolnoma kovinski izvedbi.

O različnih izvedbah hidravličnih merilnih celicah obstaja le malo člankov [24-26]. V [24] avtorji predstavijo hidravlično merilno celico, namenjeno za robotske aplikacije, pri kateri je bat privijačen na cilinder. Slika 15 prikazuje shematski prikaz merilne celice v preseku in izdelan prototip. Na sliki 15a je bat označen z A, ohišje v katerem je cilinder, pa z B. Na sliki 15b pa je prikazan realiziran vzorec. Z vijaki so ustvarili potreben nadtlak v tekočini, ko je merilna celica neobremenjena. To omogoča merjenje tlačnih, kot tudi nateznih obremenitev. Teflonsko tesnilo in primerno obdelane površine bata ter cilindra zagotavljajo potrebno tesnjenje hidravlične tekočine. Efektivna površina je odvisna od modula stisljivosti tekočine in modula elastičnosti vijakov.

Avtor navaja, da dosežena občutljivost znaša 720 Pa/N, merilno območje je od 1400 kg natezne obremenitve do 2700 kg tlačne obremenitve. Izmerjena napaka histereze znaša 1,8 % izhodnega dosega. Tako veliko napako histereze povzročata dejstvo, da se volumen tekočine lahko spreminja zaradi deformacije gumijastega tesnila, ki je izpostavljen velikemu tlaku tekočine. Zaradi tega postane razmerje tlak-sila odvisno tudi od modula elastičnosti tesnila. Prav tako pa je vzrok za napako histereze verjetno tudi v tem, da je razmerje tlak-sila odvisno od elastičnih lastnosti vijakov, ki spajajo oba dela hidravlične merilne celice. Na sliki 16 je prikazan odziv polnega vhodnega obsega tako realizirane merilne celice, kjer je napaka histereze dobro vidna.



Slika 15: Shematičen prikaz hidrostatične merilne celice (a) in izdelan vzorec (b).



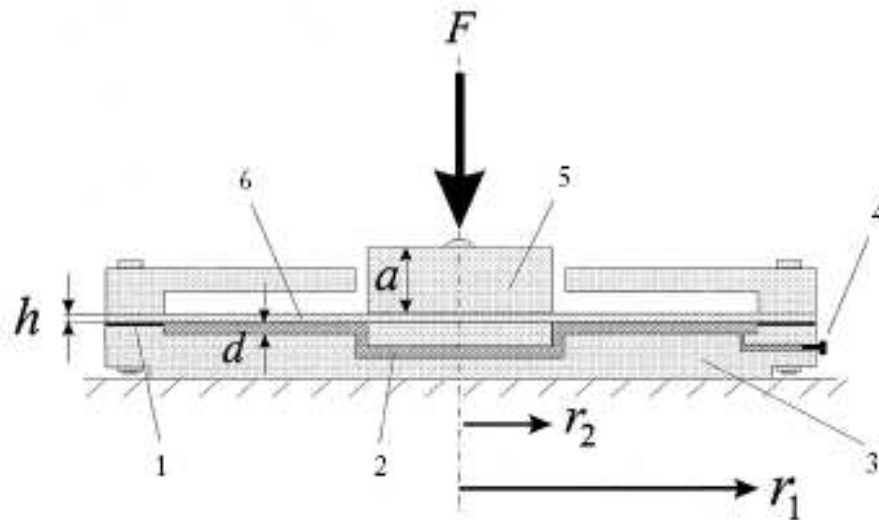
Slika 16: Grafičen prikaz odziva hidravlične merilne celice za robotske aplikacije, [24].

V [25] avtor predlaga izdelavo hidravlične merilne celice s posebno oblikovano tanko kovinsko membrano, kar naj bi odpravilo slabosti zgoraj opisane merilne celice, torej veliko napako histereze. V ta namen so merilno celico načrtovali tako, da so lahko opustili teflonsko tesnilo. Tako načrtovana hidravlična merilna celica naj bi izpolnjevala naslednje zastavljene cilje:

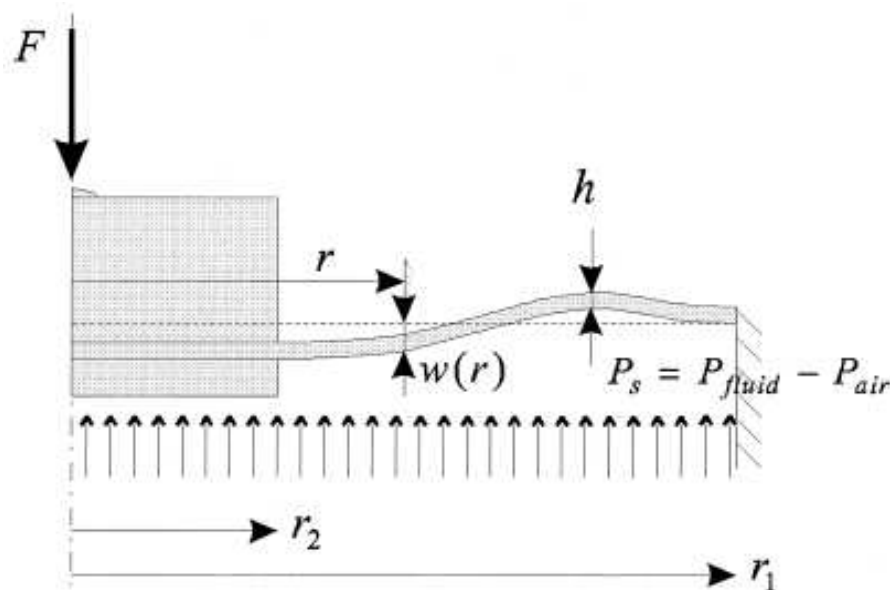
- merilno območje: 1000 kg
- točnost: 0,03 % = 0,3 kg polnega merilnega dosega
- temperaturno območje: -10 °C do 50 °C
- zanemarljiva napaka histereze in lezenje
- kalibracija: na dve leti

Merilna celica, kot jo prikazuje slika 17, je sestavljena iz spodnjega dela v obliki vedra (3), na zgornji strani zatesnjene s membrano (6), med njima pa je tesnilo (1), ki preprečuje

odtekanje hidravličnega olja (6). Tlak v hidravličnem olju merimo s senzorjem tlaka (4). Merilno celico obremenjujemo s silo teže na kovinskem čepu (5), ki je pritrjena v središču membrane. Pod obremenitvijo se kovinski čep pomakne navzdol, kar povzroči, da se hidravlična tekočina pod membrano prerazporedi. Ker je hidravlična tekočina ujeta v zaprtem sistemu, ne more odteči, zato tlak naraste. Tlak na membrano in strižna sila  $T$  med membrano in kovinskim čepom so v ravnovesju s silo teže  $F$ , ki obremenjuje kovinski čep. Na sliki 18 je prikazana deformacija membrane, ko merilno celico obremenimo s silo teže. Zunanji polmer membrane je označen z  $r_1$  notranji polmer membrane pa z  $r_2$ . Izdelani vzorec je imel sledeče dimenzije:  $h = 0,5$  mm,  $r_1 = 10$  cm,  $r_2 = 6,21$  cm,  $d = 1$  mm,  $a = 2,5$  cm; glej sliko 17.



Slika 17: Merilna celica z membrano (6) in kovinskim čepom (5), nameščenim na sredini membrane. S pomočjo senzorja (4) merimo tlak v hidravlični tekočini (2).



Slika 18: Ko merilno celico obremenimo s silo teže  $F$  se le ta deformira.

Ravnovesje sil za kovinski čep podamo z:

$$\begin{aligned} T &= F - P_s \pi r_2^2 \\ F &= mg \end{aligned} \quad (16)$$

Pri tem velja, da je  $P_s$  tlak, ki deluje na membrano razlika med tlakom v tekočini in atmosferskim tlakom.

$$P_s = P_{\text{fluid}} - P_{\text{air}} \quad (17)$$

Potek deformacije membrane  $w(r)$  mora izpolniti sledeče začetne pogoje:

$$w(r_1) = 0; \quad \frac{dw}{dr}(r_1) = \frac{dw}{dr}(r_2) = 0 \quad (18)$$

Potek deformacije membrane  $w(r)$  v odvisnosti od polmera  $r$  dobimo s pomočjo enačb (16) in (18) ter enačbe za deformacijo takšne membrane, ki je povzeta iz [27]. Enačba (19) podaja potek deformacije membrane v območju notranjega polmera membrane  $r_2$  do zunanjšega polmera membrane  $r_1$ .

$$w(r) = \frac{F(1-\nu^2)}{Eh^3} g_1(r, r_1, r_2) + \frac{P_s(1-\nu^2)}{Eh^3} g_2(r, r_1, r_2)$$

$E$  – modul elastičnosti za membrano  
 $\nu$  – Poissonovo število za membrano  
 $h$  – debelina membrane  
 $g_1$  in  $g_2$  – funkcije odvisne od  $r$ ,  $r_1$  in  $r_2$

(19)

Ob predpostavki, da je tekočina nestisljiva, je volumen pod membrano konstanten, kljub dejstvu, da se membrana deformira. To zapišemo z enačbo:

$$\pi r_2^2 w(r) + \int_{r=r_2}^{r_1} 2\pi r w(r) dr = 0 \quad (20)$$

Razmerje med obremenitvijo s silo teže in tlakom dobimo iz enačb (19) in (20) kjer velja še:

$$P_s = \frac{F}{A_{\text{ef}}} \quad (21)$$

$A_{\text{ef}}$  – efektivna površina membrane (upoštevamo, da se deformira)

$$A_{\text{ef}} = \frac{\pi r_2^2}{\pi} \frac{(1 - 4s^2 + 6s^4 - 4s^6 + s^8)}{((3,8 \ln(s)(s^2 - s^4) + 0,95(1 - s^2 - s^4 + s^6)))}$$

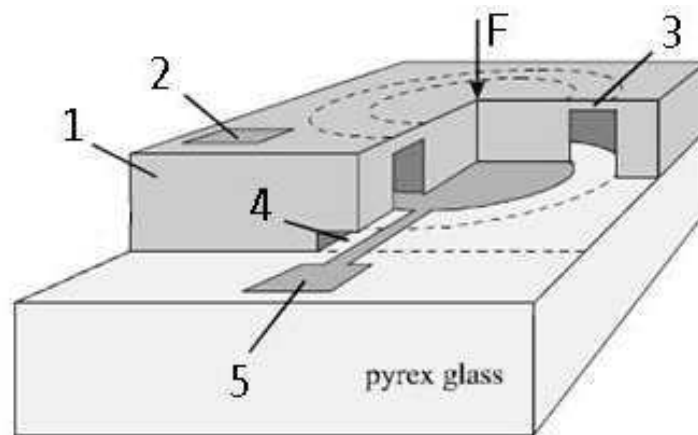
$$s = \frac{r_1}{r_2} \quad (22)$$

$s$  – razmerje med zunanjim in notranjim polmerom membrane

Iz enačbe (22) je razvidno, da je razmerje med tlakom in obremenitvijo s silo teže odvisno le od geometrije. Modul elastičnosti membrane v enačbi izpade. Seveda to velja le, dokler smo v področju linearnih deformacij. Zato avtorji pričakujejo da je pri takšni konstrukciji hidravlična merilna celica neobčutljiva na pojav lezenja in nima histereze – ob predpostavki, da je hidravlična tekočina popolnoma nestisljiva.

Glede na opravljene meritve in izračune [25] avtorji zaključujejo, da je želena natančnost 0,03 % s takšno konstrukcijo merilne celice mogoče doseči. Odziv hidravlične merilne celice je linearen, eksperimentalno določena občutljivost pa znaša 48,1 Pa/N. Vpliv temperature povzroča spremembo aktivne površine  $A_{ef}$ , kar povzroča 0,07 % napako v temperaturnem območju 30 °C. Za zmanjšanje negativnega temperaturnega vpliva avtorji predlagajo možnost kompenzacije te napake s pomočjo merjenja temperature.

Isti avtorji v [26] tudi podajajo podoben način izvedbe hidravlične merilne celice, narejene s polprevodniško monolitno tehnologijo. Slika 19 prikazuje predlagano izvedbo. V tem primeru je membrana (3) jedkana iz silicija (1), tudi čep na sredini je delno jedkan, da se ne dotika dna merilne celice (4). Skozi odprtino (4) to merilno celico napolnimo s tekočino. Ko čep obremenimo s silo teže, se le ta premakne, kar spremeni razdaljo in s tem kapacitivnost med čepom in dnom merilne celice. Kapacitivnost odčitavamo na kontaktnih (5) in (2). Prav tako pa bi bilo mogoče deformacijo membrane meriti z implementiranimi piezouporovnimi senzorskimi elementi. Avtorji nikjer ne omenja dejanske realizacije in preizkušanja ter karakteristik takšne merilne celice.



Slika 19: Predlog izvedbe silicijeve hidravlične merilne celice.

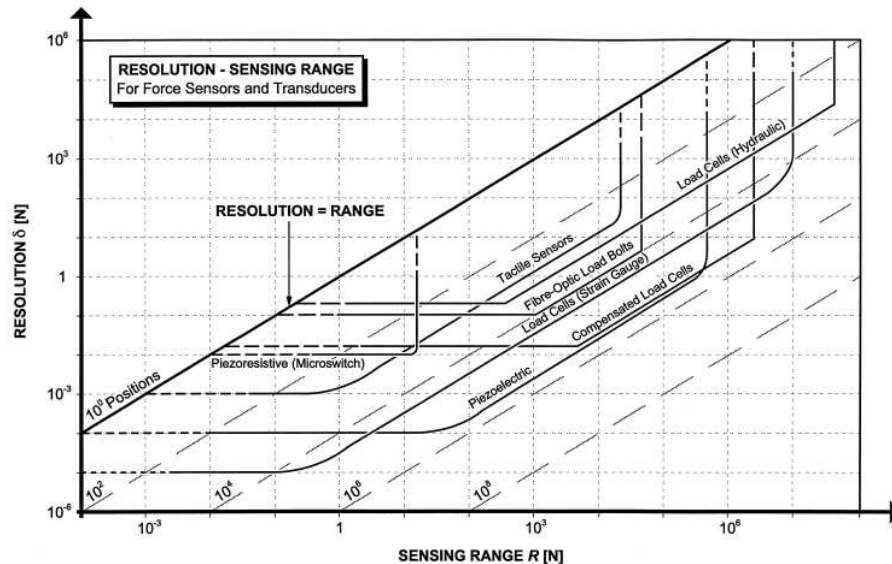
### 4.3 Splošne značilnosti najbolj razširjenih vrst merilnih celic

V tabeli 5 je podan pregled najbolj razširjenih vrst merilnih celic in njihove tipične značilnosti [28]. Nekatere izmed njih smo na kratko opisali spodaj.

Tabela 5: Splošne značilnosti najbolj razširjenih tipov merilnih celic [28].

tip merilne celice	merilno območje	točnost % FS	prednosti	slabosti
<b>mehanske izvedbe</b>				
hidravlične merilne celice	od 50 kg do 4500 ton	do 0,25 % (0,5 - 1) %	velike preobremenitve avtonomno delovanje	kompleksna zgradba cena
pnevmatske merilne celice	široko	visoka	izjemno varne ne vsebuje tekočin	počasen odziv potrebujejo čist in suh zrak
<b>izvedbe z uporovnimi merilni lističi</b>				
upogibne merilne celice	od 5 kg do 2500 kg	0,03 %	nizka cena enostavna konstrukcija	izpostavljenost merilnih lističev rabijo zaščito
strižne merilne celice	od 5 kg do 2500 kg	0,03 %	odporna na stranske obremenitve, boljša zaščita	
tlačne merilne celice	do 250 ton	0,05 %	odporne na premikanje bremena	ni horizontalno zaščiten
obročaste in ploščate MC	od 2,5 kg do 250 ton			premikanje bremena ni dovoljeno
nizkoprofilne in tlačne MC	do 100 kg (do tipično 25 ton)	1 %	majhne, nizka cena	centrirana obremenitev brez premikanja bremena
<b>ostale izvedbe</b>				
spiralne MC	0 – 15 ton	0,2 %	odporne na izven-osne obremenitve, šok	
optična vlakna		0,1 %	imune na RF in EM polja visoke temperature izjemno varne	
piezoelektrične		0,03 %	velika občutljivost, hiter odziv	visoka cena nelinearen odziv

Na sliki 20 je prikazana resolucija v odvisnosti od merilnega območja za značilne vrste merilnih celic [29]. Najširši vhodni razpon, to je od področja nekaj mg pa do nekje 1000 ton, pokrivajo merilne celice z folijskimi uporovnimi merilnimi lističi. Hidravlične merilne celice jih prekosijo le v območju največjih obremenitev



Slika 20: Resolucija v odvisnosti od merilnega območja za značilne vrste merilnih celic.

#### 4.4 Načini uporabe merilnih celic v univerzalnih kuhinjskih aparatih

Pregledali smo bazo javno dostopnih patentnih dokumentov [30] za obdobje zadnjih 20 let in članke, ki se navezujejo na kuhinjske aparate z motornim pogonom z vgrajenimi merilnimi celicami. Pregledali smo patentne prijave v treh področjih, kot jih klasificira IPC (International Patent Classification) in patentne prijave koncernu B/S/H/ (Bosch and Siemens Home Appliances Group) konkurenčnih podjetij v svetovnem merilu. Pregledali smo sledeča področja IPC.

A47J – kuhinjski aparati, kavni mlini, aparati za napitke

G01G – področje tehtanja

G01L – področje meritev sile, navora, mehanskih obremenitev, tlak v tekočinah

Na trgu je moč najti nekaj kuhinjskih aparatov z vgrajenimi merilnimi celicami, ki imajo realizirano funkcijo tehtanja. Pri pregledu patentne literature in trenutnega stanja na trgu lahko ugotovimo, da prevladujejo trije načini vgradnje merilnih celic v kuhinjske aparate.

##### 4.4.1 Vgradnja merilnih celic med posodo aparata in ohišjem aparata

Vgradnja merilnih celic med posodo aparata in ohišjem aparata je podana v nekaterih patentnih prijavih, vendar na našem trgu še nismo zasledil aparata s takšno vgradnjo merilne celice. Merilna celica (ena ali več) je vgrajena med posodo aparata in ohišjem aparata oziroma nosilno strukturo aparata, [31] ali pa je v primerno oblikovano dno posode vgrajenih več merilnih celic [32]. Platforma tehtanja je v takšnem primeru posoda aparata, kar je ugodno, ker je merilna celica med tehtanjem obremenjena z manjšo mrtvo težo.

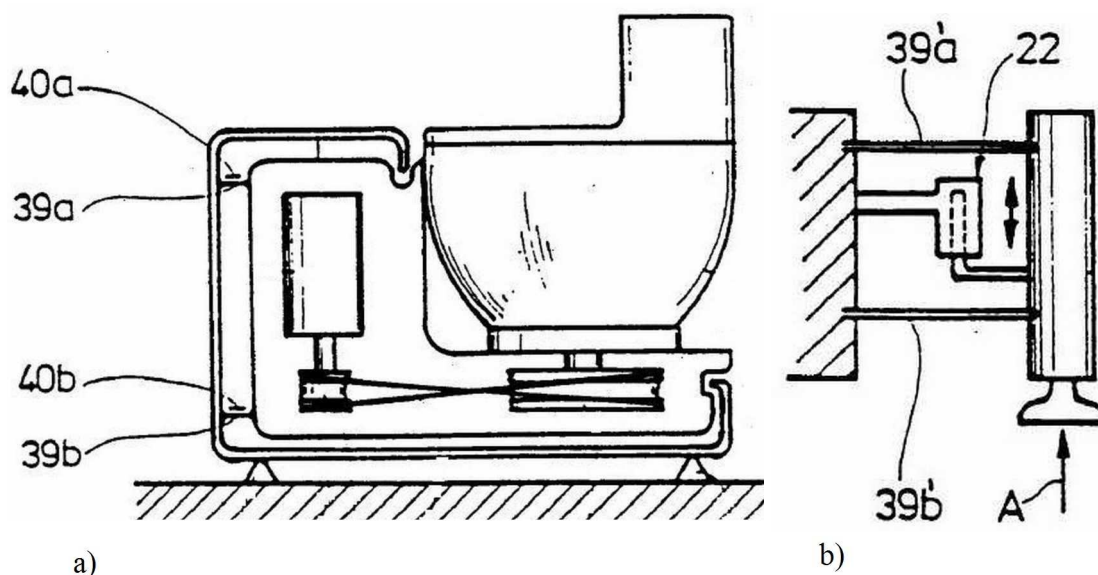
Pri takšnem načinu vgradnje merilnih celic se neizogibno srečamo z določenimi omejitvami, ki veljajo tako pri tehtanju kot med delovanjem aparata. Pred tehtanjem je potrebno odstraniti priključke za obdelavo živil v posodi, ki bi lahko ovirali proces tehtanja. Med delovanjem aparata pa poseben mehanizem skrbi za namestitev posode na aparat in varuje merilno celico pred morebitnimi poškodbami zaradi preobremenitev.

#### 4.4.2 Vgradnja merilnih celic v podnožje aparata

Aparat ali del njegove nosilne konstrukcija je pritrjen na eno ali več merilnih celic. Pri takšni izvedbi je platforma tehtanja celoten aparat oziroma večji del aparata. Potrebna nosilnost merilnih celic mora biti dimenzionirana skladno z načinom vgradnje za maso ki jo tehtamo, ter težo celotnega pogonskega mehanizma oziroma aparata, ki stalno obremenjujejo merilne celice.

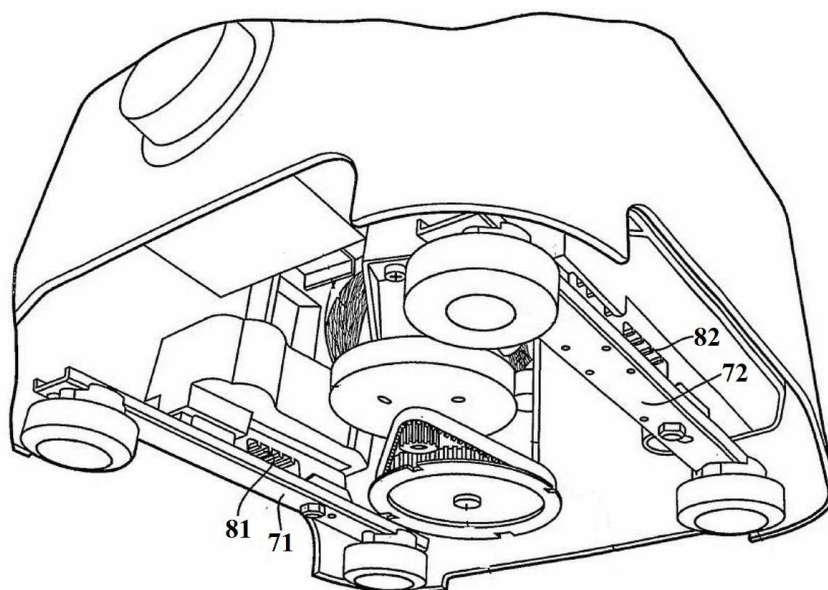
Podjetje Ronic Industries je podalo patentno prijavo za kuhinjski aparat z eno vgrajeno merilno celico, ki je nameščena med dvojnimi dnom aparata [33]. Podobno izvedbo so v patentni prijavi zaščitili tudi pri podjetju Vorwerk. Takšna izvedba je v aparatu Vorwerk Thermomix TM21, kjer je merilna celica vgrajena med ohišjem aparata in pogonskim mehanizmom, na katerega je nameščena tudi posoda aparata [34].

Možna je tudi izvedba z vgradnjo posebnih stranskih konzolnih nosilcev [35]. Slika 21a prikazuje način vpetja notranje konstrukcije na ohišje aparata preko posebno oblikovanih konzolnih nosilcev (39a, 39b). Na konzolna nosilca (39a, 39b) so nameščeni uporovni merilni lističi (40a, 40b). Na ta dva nosilca je pritrjena celotna notranja konstrukcija aparata, ki pri obremenitvi povzroča mehansko deformacijo konzolnih nosilcev. Kot alternativa uporovnim merilnim mostičem je predvidena tudi možnost uporabe LVDT (Linear Variable Differential Transformer) senzorja za merjenje pomikov (22), detajl takšne izvedbe je prikazan na sliki 21b.



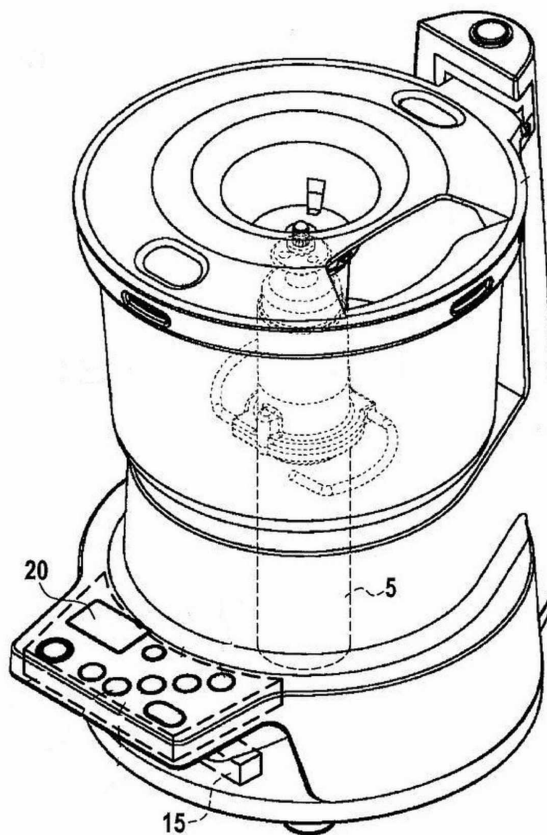
Slika 21: Notranja konstrukcija aparata je na zunanje ohišje pritrjena preko dveh konzolnih nosilcev (39a, 39b), ki se pri obremenitvi elastično deformirata.

Na trgu kuhinjskih aparatov z vgrajeno funkcijo tehtanja prevladuje izvedba vgradnje merilnih celic v dno aparata. Takšne izvedbe imajo, odvisno od konstrukcije in izvedbe, vgrajene 2, 3 ali 4 merilne celice. Podjetje Kenwood ima patentiran sistem izvedbe z dvema merilnima celicama in s posebno kovinsko konzolo [36]. Na sliki 22 je viden prikaz takšne konstrukcijske izvedbe in vgradnje merilnih celic. Merilna celica (81, 82) je pritrjena na ohišje aparata in posebno kovinska konzola (71, 72). Na kovinski konzoli (71, 72) so nameščene gumijaste nogice, ki služijo za postavitvev aparata obenem pa zmanjšujejo tudi vibracije in hrup.



Slika 22: Kenwood-ov sistem z uporabo samo dveh merilnih celic (81, 82) (Multipro Libra).

Aparate s tremi oziroma štirimi merilnimi celicami, vgrajenimi v dno aparata, izdeluje tudi Krups [37], ki v svojem patentu poleg sistema za tehtanje izkorišča te senzorje tudi za nadzor nad stabilnostjo aparata. Slika 23 prikazuje vgradnjo merilnih celic (15) v dno aparata.



Slika 23: V aparatu proizvajalca Krups merilne celice (15) poleg tehtanja izrabljajo tudi za nadzor stabilnosti aparata, [37].

Tehtamo v posodi, nameščeni na aparatu, rezultat tehtanja pa se prikazuje na

prikazovalniku (20). Med tehtanjem je pogonska enota (5) izklopljena. Podoben način vgradnje štirih merilnih celic v dno aparata je patentiral tudi Guandong Xinbao Electrical EQ [38]. Merilna celica je na eni strani pritrjena na dno aparata, na drugi strani pa je nanjo pritrjen plastičen element, namenjen za pritrditev gumijaste nogice. Skoraj identičen način vgradnje treh merilnih celic, simetrično razporejenih glede na os pogonske enote in posode, v aparatu Thermomix TM31 uporablja Vorwerk. Njihovega patenta za takšno izvedbo nismo zasledili.

#### 4.4.3 Samostojna tehtnica kot dodaten del kuhinjskega aparata

Tehtnica je lahko vgrajena v aparat in se preko vodila ali podobnega mehanizma v primeru uporabe izvleče iz ohišja aparata [39]. Takšna vgrajena tehtnica je lahko popolnoma mehanska ali pa elektronska tehtnica. Elektronska tehtnica lahko ima baterijsko napajanje in lahko deluje popolnoma avtonomno. Takšen način vgradnje se pojavlja predvsem pri cenejših kuhinjskih aparatih, pogosto narejenih na daljnem vzhodu. Podoben sistem ima patentiran tudi Phillips [40], kjer je tehtnica izvedena v posebno oblikovani posodi aparata, ki se namesti na aparat, lahko pa se uporablja tudi kot samostojna kuhinjska tehtnica.

#### 4.4.4 Povzetek

Prikazani so trije značilni načini vgradnje tehtnic v kuhinjske aparate. Ti trije načini so:

- vgradnja merilne celice med posodo aparata in ohišjem aparata,
- vgradnja merilnih celic v podnožje aparata,
- samostojna tehtnica kot del kuhinjskega aparata.

Vsak izmed teh treh možnih načinov vgradnje ima svoje prednosti in slabosti. Če je pri vgradnji merilne celice med posodo in ohišjem aparata ugodno to, da imamo majhno mrtvo težo platforme tehtanja, je tak način vgradnje zelo neugoden v primeru, ko v posodi aparata gnetemo testo. Pri gnetenju testa se pojavljajo velike obremenitve posode aparata in posledično obremenitve merilnih celic. V teh primerih skoraj vedno rabimo dodaten mehanski varovalni sistem, da se med delovanjem aparata ne poškoduje merilnih celic. Uporaba takšnih dodatnih varovalnih sistemov pa je največkrat uporabniku neprijazna zaradi rokovanja in možnosti napačnega tehtanja.

Večina kuhinjskih aparatov, ki jih izdeluje BSH hišni aparati d. o. o., ima več posod, ki se namestijo na aparat oz. več priključnih mest, kamor lahko namestimo različne posode. Če želimo imeti univerzalen sistem za tehtanje, je potrebno vgraditi merilne celice v podnožje aparata. Takšen način vgradnje podpira tudi želja, da bi v kuhinjske aparate poleg funkcije tehtanja, vgradili še funkcije nadzora nad delovanjem aparata med gnetenjem in pripravo testa.

V nadaljevanju se bomo omejili le na izvedbo kuhinjskega aparata, ki ima v podnožju aparata vgrajene merilne celice, s katerimi lahko realiziramo naše zastavljene cilje glede tehtanja in dodatne napredne funkcije aparata oziroma algoritem za napredno vodenje in nadzor aparata. Člankov na temo integracije funkcije tehtanja v kuhinjski aparat nismo zasledili.

V tabeli 6 so prikazani komercialno dostopni aparati z vgrajeno funkcijo tehtnice [41]. Prikazani so podatki za lastnosti vgrajene tehtnice, kot jih je deklariral proizvajalec. Podatki so povzeti iz spremne dokumentacije za posamezen aparat. Aparate smo testirali pri sobni temperaturi. Z vsakim aparatom smo izvedli dve vrsti meritev: tehtanje do 100 g in tehtanje v polnem deklariranem merilnem dosegu. V območju od 0 g do 100 g smo točnost preverjali v 8 merilnih točkah -- obremenitvah (0 g, 17 g, 33 g, 50 g, 66 g, 83 g, 99 g in 116 g) v območju od 0 g do polnega vhodnega merilnega dosega pa v 7 oziroma več merilnih točkah (0 g, 480 g, 979 g, 1473 g, 1970 g, 2467 g, 2958 g, 3454 g, 949 g, 445 g, 4941 g, 5455 g in

5969 g).

Vsako meritev smo ponovili trikrat, pred izvedbo vsake meritve smo vrednost na tehtnici postavili na 0 (tariranje tehtnice). V tabeli 6 so povzete deklarirane in izmerjene vrednosti odstopanja za posamezen kuhinjski aparat z vgrajeno funkcijo tehtanja.

Med vsemi primerjanimi aparati z vgrajeno tehtnico po svoji točnosti izstopa edino Kenwood Multipro Libra FP950, kjer je absolutna napaka pri polnem merilnem dosegu nekje do  $\pm 0,85$  %. Oba aparata, ki ju proizvaja KRUPS, pa sta glede parametrov tehtanja precej slabša kot to deklarira sam proizvajalec, saj napaka pri polnem merilnem dosegu znaša 4,3 % oziroma 2,6 %. Ker takšna izvedba tehtnice ni za javno uporabo zanje ni zakonskih regulativ glede točnosti in umerjanja na mestu uporabe, so takšna odstopanja možna in se jih ponavadi niti ne zavedamo.

Sama točnost kuhinjskih aparatov z vgrajeno tehtnico je slabša kot pri cenениh kuhinjskih tehtnicah, ki se pretežno uporabljajo za tehtanje živil. Glede na način tehtanja, mase kuhinjskega aparata in nenazadnje velikega cenovnega pritiska na tem segmentu proizvodov, lahko trenutno kuhinjske aparate z vgrajeno tehtnico, ki dosegajo točnost  $\pm 35$  g ( $\pm 0,7$  %) v območju tehtanja do 5 kg, smatramo kot zadovoljivo točne.

Tabela 6: Nekateri izmed komercialno dostopnih aparatov s funkcijo tehtanja. Pri vseh so merilne celice vgrajene v podnožje aparata. Podatki izvirajo iz proizvajalčevih katalogov.

Proizvajalec	Tip aparata	območje tehtanja (deklarirano)	točnost (deklarirana)	slika
<b>Vorwerk</b>	<b>Thermomix TM21</b>	<b>10 g – 7500 g</b>	<b>ni podatka</b>	
		Izmerjeno odstopanje do 100 g: -20 g do 10 g Izmerjeno odstopanje polni merilni doseg: -75 g do 25 g		
<b>Vorwerk</b>	<b>Thermomix TM31</b>	<b>5 g –100 g</b> <b>100 g – 6 kg</b>	<b>ni podatka</b> <b>±30 g (pri 2 kg)</b>	
		Izmerjeno odstopanje do 100 g: -20 g do 5 g Izmerjeno odstopanje polni merilni doseg: -15 g do 40 g		
<b>Kenwood</b>	<b>FP950 Multipro Libra</b>	<b>3 kg</b>	<b>ni podatka</b>	
		Izmerjeno odstopanje do 100 g: -10 g do 0 g Izmerjeno odstopanje polni merilni doseg: -25 g do 15 g		
<b>Krups</b>	<b>KA 9027</b>	<b>3 kg</b>	<b>±25 g</b>	
		Izmerjeno odstopanje do 100 g: -31 g do 8 g Izmerjeno odstopanje polni merilni doseg: -19 g do 127 g		
<b>Krups</b>	<b>KA 8027</b>	<b>5 kg</b>	<b>±10 g</b>	
		Izmerjeno odstopanje do 100 g: -30 g do 5 g Izmerjeno odstopanje polni merilni doseg: -33 g do 130 g		

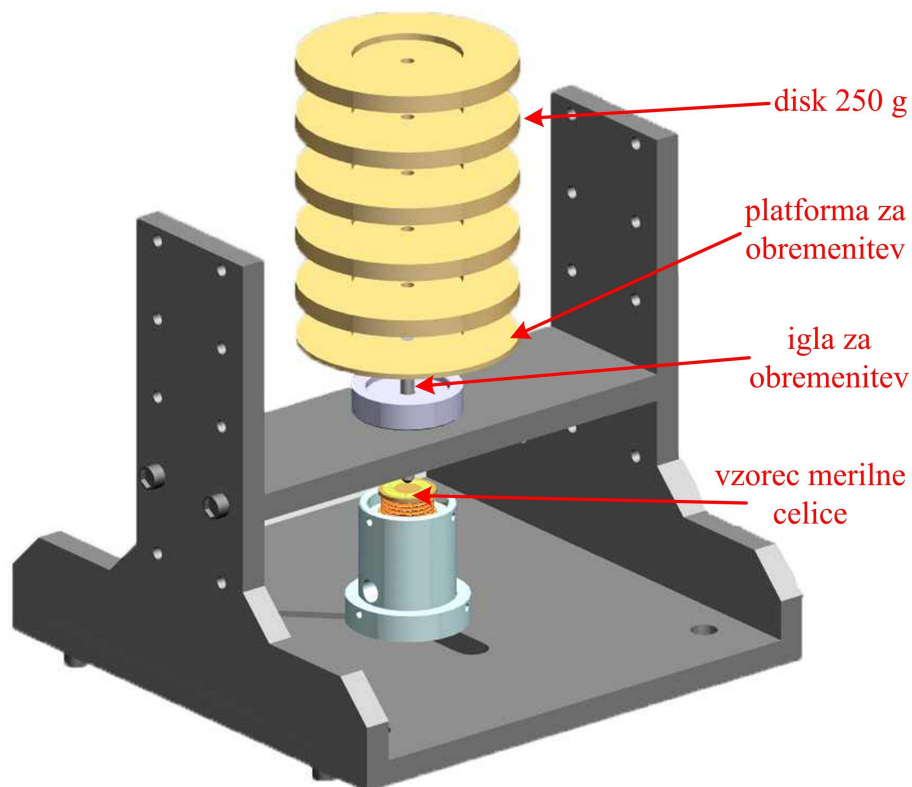
## 5 Priprava merilnega okolja

Da bi lahko uspešno okarakterizirali razvite merilne celice je bilo potrebno pripraviti ustrezno merilno okolje, ki je opisano v tem poglavju.

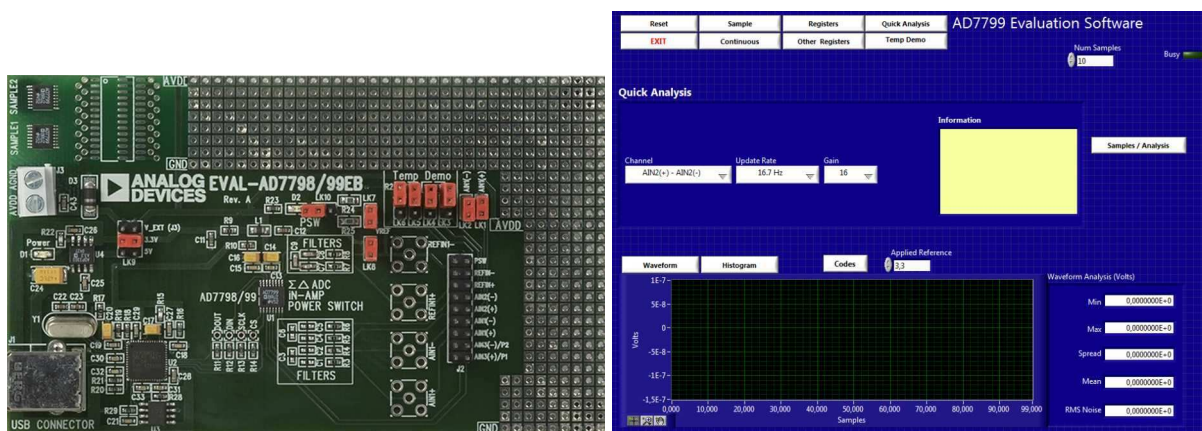
### 5.1 Priprava za ročno dodajanje in odvzemanje bremena

Priprava za ročno dodajanje in odvzemanje bremena, s katerim obremenjujemo merilno celico je prikazana na sliki 24. Zasnovali in izvedli smo jo na podlagi podobne manjše priprave, ki je bila namenjena meritvam faktorja merilnika (angl. gauge factor - GF) tiskanih debeloplastnih uporov, na različnih keramičnih substratih. V dnu priprave sta dva utora, ki omogoča univerzalno namestitev in pritrditev merilnih celic različnih izvedb. Za dodajanje bremena smo izdelali tako oblikovane kovinske diske, da je zagotovljena samodejna poravnava pri vertikalnem zlaganju. Naredili smo 15 diskov z maso 100 g in 20 diskov z maso 250 g. Med merjenjem parametrov merilnih celic diske polagamo enega vrh drugega na platformo za obremenitev. Sestavni del obremenitvene platforme je tudi igla premera 5 mm, za točkovno obremenitev merilne celice. Igla, s katero obremenjujemo testirane vzorce merilnih celic, je vodena skozi dobro prilegajočo se odprtino, ki zagotavlja enoosno obremenitev. Za doseganje zadovoljivih in primerljivih rezultatov meritev je potrebno konstantno dodajanje ali odvzemanje kovinskih diskov za obremenitev merilne celice na enak način, brez nenadnih sunkovitih obremenitev ali razbremenitev. Takšna priprava zagotavlja obremenjevanje merilnih celic vedno le v navpični osi, kar je tudi namen te priprave.

Da lahko s takšno pripravo izvajamo avtonomne meritve, smo uporabili razvojno kartico proizvajalca Analog Devices AD7799EV, ki je namensko narejena za testiranje in razvoj aplikacij z merilnimi celicami [42]. Srce razvojnega orodja je integrirano vezje AD7799 s trikanalnim multipleksnim vezjem, programsko določljivo ojačanje in 24-bitni analogno-digitalni pretvornik. Razvojna kartica, prikazana na sliki 25a, je opremljena tudi s preciznim napajalnim vezjem, namenjenim napajanju merilne celice. Razvojna kartica AD7799EV se napaja in komunicira z osebnim računalnikom preko USB vodila. Vse nastavitve parametrov razvojne kartice, kot tudi zajem in obdelava izmerjenih vrednosti, se izvajajo preko namenskega programa narejenega s programskim orodjem LabVIEW, ki ga proizvajalec prilaga v kompletu. Na sliki 25b je prikazana nadzorna plošča, s katero nastavljamo vse parametre razvojne kartice in v živo spremljamo potek meritve. Po končani meritvi je podatke meritve mogoče shraniti v tekstovno datoteko za potrebe kasnejše obdelave.



Slika 24: Prikaz priprave za ročno dodajanje in odzemanje obremenitve za karakterizacijo merilnih celic.



Slika 25: Razvojna kartica AD7799 (a) in programski vmesnik narejen s programskim paketom LabVIEW (b).

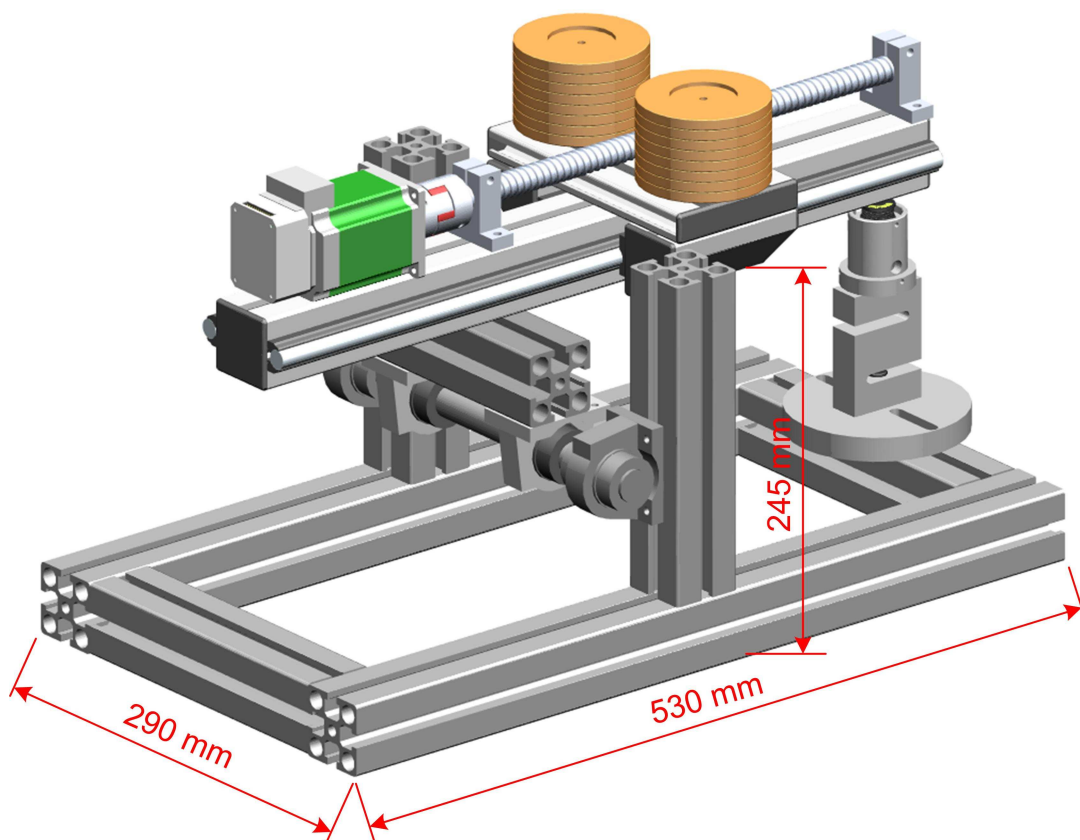
## 5.2 Priprava za avtomatično karakterizacijo merilnih celic

Zaradi ponavljajočih in dolgotrajnih meritev, še posebej v okoljski klimatski komori, smo naredili pripravo, ki nam omogoča popolnoma samodejno in avtomatično izvedbo meritev merilnih celic. Pri načrtovanju priprave smo bili omejeni z dimenzijami klimatske komore, v kateri bo priprava nameščena med izvajanjem meritev.

Ogrodje priprave, prikazano na sliki 26, je narejeno iz aluminijastih profilov 45 mm × 45 mm. Vzдолžna vrtljiva roka, ki je sestavljena kot linearno vodilo, je preko uležajene osi pritrjena na stranska stebrna nosilca. Za pogon smo uporabili koračni motor Reliance Cool Muscle [43] z integriranim servo krmilnikom. Takšna kompaktna izvedba koračnega motorja omogoča enostavno nastavljanje hitrosti in položaja koračnega motorja brez potrebnega

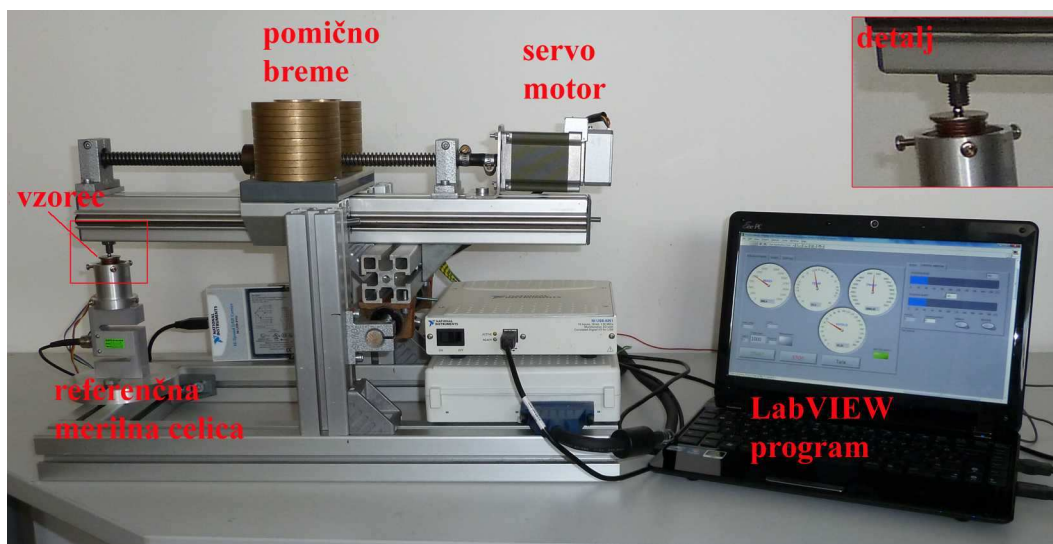
dodatnega zunanjskega krmilnika. Na pogon je pritrjeno navojno vreteno, ki rotacijsko gibanje pogskega motorja spreminja v linearni pomik obremenitvene ploščadi. Obremenitvena ploščad ima 215 mm hoda, nanjo pa je mogoče namestiti različne uteži do maksimalne skupne mase 10 kg. Tako narejena priprava omogoča najmanjši možni linearni pomik do 0,01 mm, kar pomeni, da lahko večamo ali manjšamo obremenitev z natančnostjo 1 grama. Testna priprava ima tudi referenčno merilno celico, ki je nameščena pod testiranim vzorcem. Uporabljena je tlačna merilna celica proizvajalca Ahlborn messtecnik Type K25 [44] nazivne zmogljivosti 5 kg. Merilna celica je bila kupljena in dostavljena skupaj z overjenim metrološkim certifikatom. Tako konstruirana merilna avtomatska merilna priprava je bila narejena posebej za merjenje karakteristik hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev.

Za napajanje referenčne merilne celice in zajem njene izhodne napetosti smo uporabili 24-bitno DAQ merilni kartico proizvajalca National Instruments NI937 v ohišju NI USB-9162 [45]. NI937 je namenska precizna merilna kartica, priporočena s strani proizvajalca za meritve z merilnimi celicami. Za potrebe krmiljena pogske enote, meritev vzorcev in meritev temperature pa je bila uporabljena 16-bitna multi-funkcijska DAQ merilna kartica NI USB-6251 skupaj s SCC-68.



Slika 26: Prikaz načrtovane avtomatizirane priprave za karakterizacijo hidravličnih merilnih celic

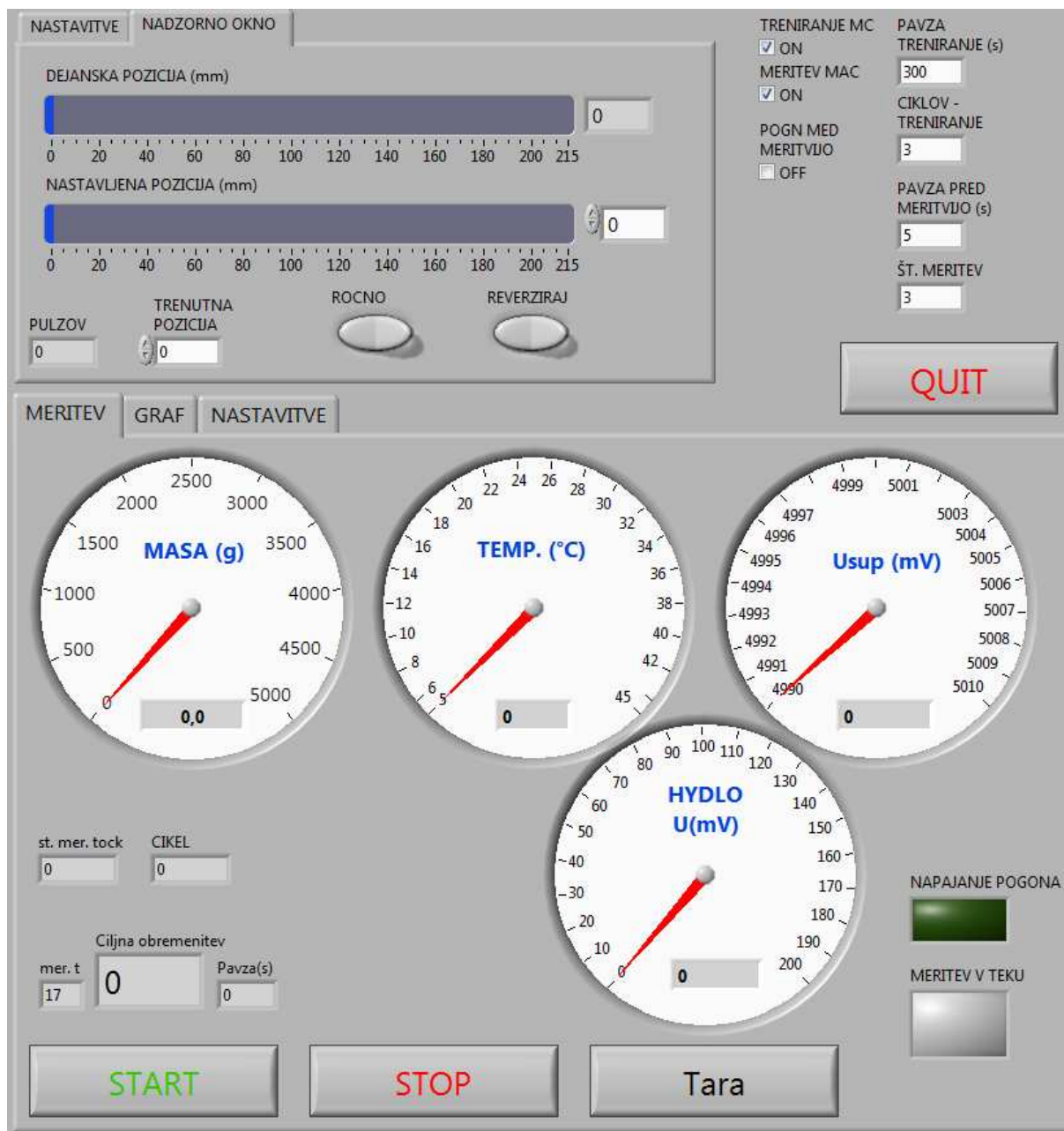
Za krmiljenje testne priprave, napajanje merilne celice in zajemanje podatkov meritev, smo uporabili programski paket LabVIEW, ki omogoča objektno-grafično programiranje. LabVIEW je zmogljiv programski paket, ki z obilico podprte strojne opreme in vključenimi funkcijami omogoča hitro in enostavno realizacijo zelenih funkcij. S pomočjo ustrezne literature [46-48], smo razvili celotno programsko aplikacijo potrebno za krmiljenje testne priprave in izvedbo meritev vzorcev hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev.



Slika 27: Avtomatizirano merilno mesto za karakterizacijo hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev.

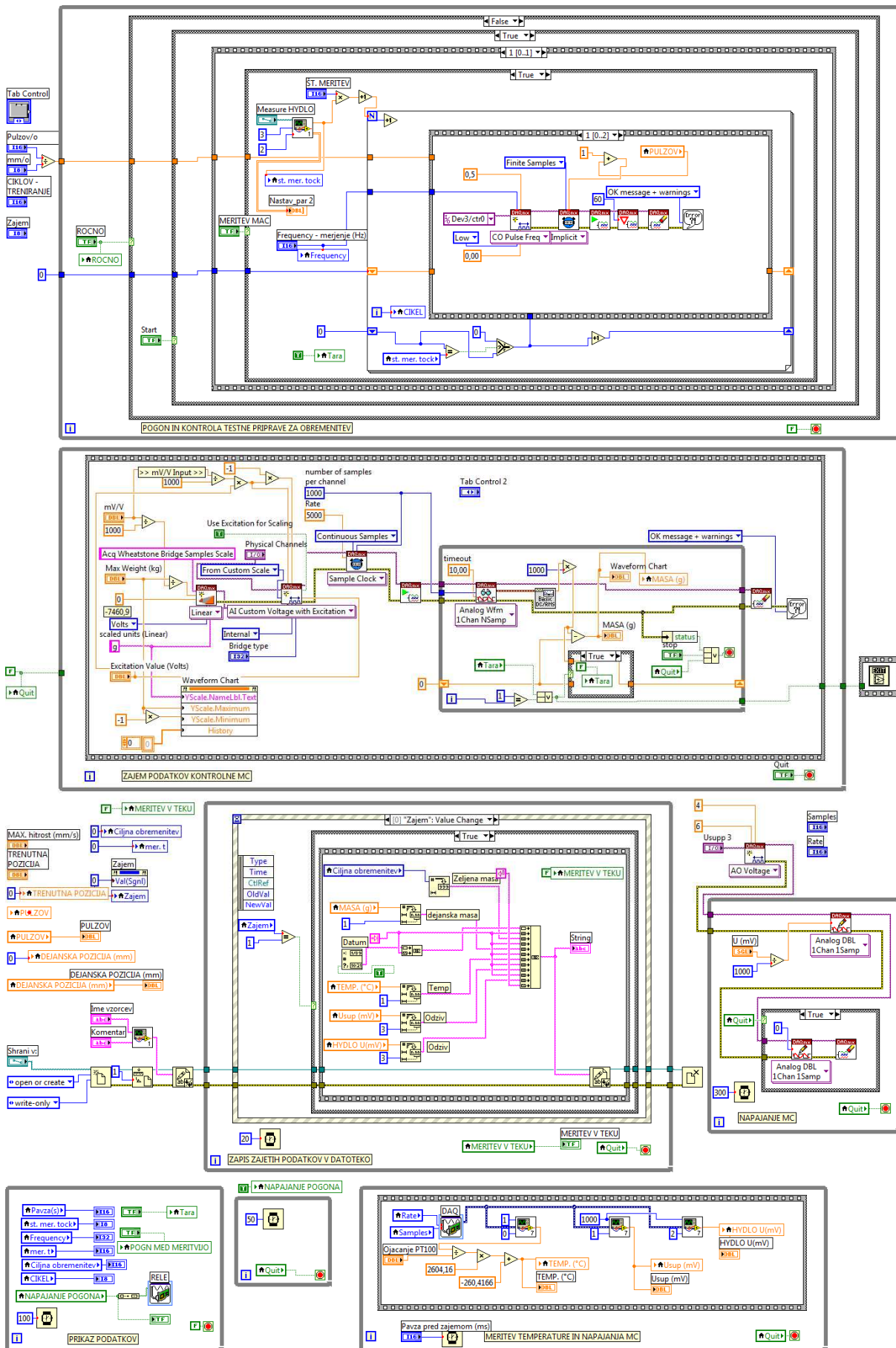
Parametri za potek testiranja hidravličnih merilnih celic se nastavijo na čelni plošči namensko izdelanega programa, oziroma se preberejo iz nastavitvenih datotek. Na čelni plošči, prikazani na sliki 28, sta prikazana glavna sklopa namenjena za nastavitve in prikaz poteka krmiljenje testne priprave in merilnega dela za prikaz in zajem izmerjenih parametrov.

V zgornjem delu čelne plošče določimo način in potek testiranja. V zavihku nastavitve podamo parametre za linearno os in pogonski motor (število pulzov na vrtljaj, pomik linearne osi, maksimalne hitrosti pomikov za ročno vodenje, treniranje merilne celice). Po želji lahko testiranje izvajamo v ročnem načinu s sprotnim vpisovanjem parametrov za pomik oziroma obremenitev. V spodnjem delu čelne plošče imamo ves čas na razpolago vse izmerjene vrednosti, ki jih lahko prikazujemo tudi v grafu. V zavihku nastavitve podamo potrebne parametre za zajem vseh veličin ki jih merimo. Prav tako določimo kam in kako se izmerjene vrednosti zapisujejo v tekstovno datoteko. Namen zapisa izmerjenih rezultatov v tekstovno datoteko je možnost njihove kasnejše analize.



Slika 28: Čelna plošča programa za avtomatično karakterizacijo hidravličnih merilnih celic.

Blokovni diagram, prikazan na sliki 29, podaja sestavo programa za avtomatično karakterizacijo hidravličnih merilnih celic. Program je sestavljen iz sedmih večjih sklopov, ki se lahko neodvisno izvajajo. Takšna modularna sestava omogoča večjo preglednost in lažje nadgrajevanje oz. spremembe v programski kodi. Program sestavljajo sledeči pomembnejši sklopi: upravljanje in kontrola testne priprave, sklop za napajanje in merjenje z referenčno merilno celico, napajanje vzorca hidravlične merilne celice, zajem izmerjenih parametrov testnega vzorca, prikaz podatkov na čelni plošči in zapis izmerjenih vrednosti v datoteko meritev. Zaradi prostorske omejenosti na sliki 29 ni mogoče prikazati vseh podprogramov, kode v vseh sekvenčnih oknih in vejanj v programski kodi.



Slika 29: Blokveni diagram programa za avtomatično karakterizacijo hidravličnih merilnih celic.

### 5.3 Laboratorijska oprema za karakterizacijo merilnih celic

V našem primeru potrebujemo za izvedbo potrebnih testov skladno s priporočili OIML R 60 sledečo minimalno opremo:

Sistem za dodajanje in odzemanje obremenitve na merilno celico.

Za potrebe testiranja smo naredili dva sistema za dodajanje in odzemanje bremena. Sistem za ročno dodajanje in odzemanje obremenitve je opisan v 5.1 Zaradi predvidenih zahtev po dolgotrajnejšem testiranju in testiranja v okoljski klimatski komori smo izdelali tudi avtomatiziran sistem za dodajanje in odzemanje bremena, ki je podrobneje opisan v 5.2 .

Instrument za merjenje odziva merilne celice.

Ker imamo opravka s mostičnimi vezji, ki na izhodu dajejo napetostni odziv odvisen od obremenitve merilne celice, za meritve uporabljamo precizne instrumente za merjenje napetosti. Uporabljali smo sledeče instrumente:

- Keithley Integra Series 2700
- DAQ merilno kartico National Instruments NI USB-6251 skupaj s SCC-68
- DAQ merilno kartico National Instruments NI9237 v ohišju NI USB-9162
- Namensko razvojno kartico za merilne celice AD7799-EVAL

Stabilen vir napajanja.

Za napajanje mostičnega vezja je potreben precizen in stabilen nizkonapetostni vir. Pri meritvah smo uporabljali sledeče napajalnike:

Hewlett-Packard system power supply 6034A 0 V– 60 V, 0 – 10 A, 200 W

DAQ merilno kartico National Instruments NI USB-6251 skupaj s SCC-68

Namensko razvojno kartico za merilne celice AD7799-EVAL

Klimatska okoljska komora.

Za meritve merilnih celic pri temperaturah različnih od sobne temperature, smo uporabljali klimatsko okoljsko komoro WEISS WKA1 180/40. Po stabilizaciji temperature smo zaradi zmanjšanja vpliva vibracij, med meritvijo dodajanja in odzemanja obremenitve merilne celice, klimatsko komoro izklopili.

Merilnik tlaka.

Za potrebe natančnega merjenja tlaka pri karakterizaciji silicijevih tlačnih tabletk in da ugotovimo kakšen je vpliv barometričnega tlak, smo uporabljali digitalni merilnik tlaka HEISE PM z natančnostjo merjenja  $\pm 0,05$  % v merilnem območju do 7 barov nadtlaka.

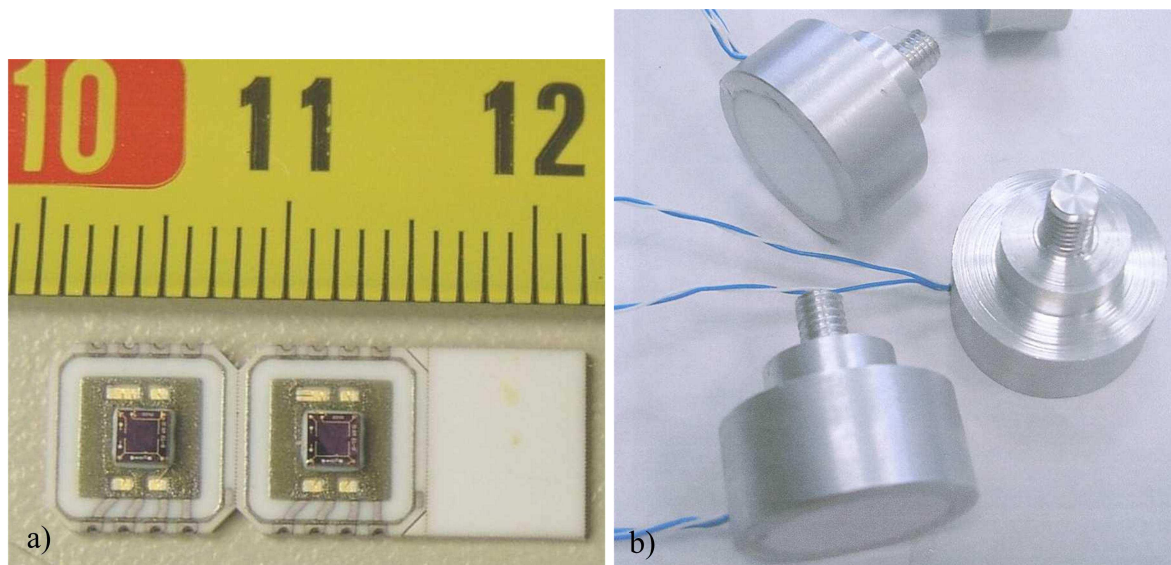


## 6 Razvoj hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev

### 6.1 Hidravlična merilna celica - BSH verzija 1

#### 6.1.1 Izdelava vzorcev

Prve laboratorijske prototipe merilnih celic, vgrajenih v nogico kuhinjskega aparata, smo naredili kot vzorčne primerke skupaj s podjetjem HYB d.o.o. Sestavljeni vzorci dimenzijsko bistveno ne odstopajo od klasičnih gumijastih nogic, uporabljenih v serijski proizvodnji. Na keramičen substrat velikosti  $7,6 \text{ mm} \times 7,6 \text{ mm}$  je nameščen silicijev senzor tlaka. Uporabljen je piezouporovni silicijev senzor za merjenje absolutnega tlaka nazivne vrednosti  $0,1 \text{ MPa}$ . Keramičen substrat služi kot nosilen element, na katerega smo mehansko pritrdili in bondirali silicijevo tabletko - senzor tlaka ter prispajkali štiri žice za povezavo z napajalno-merilnim sistemom. Na sliki 30a sta prikazani dve silicijevi senzorski tabletki tlaka nameščeni, vsaka na svojem keramičnem substratu. Na slika 30b pa so prikazani delno sestavljeni vzorci, kjer gumijasti del nogice kuhinjskega aparata še ni nameščen.

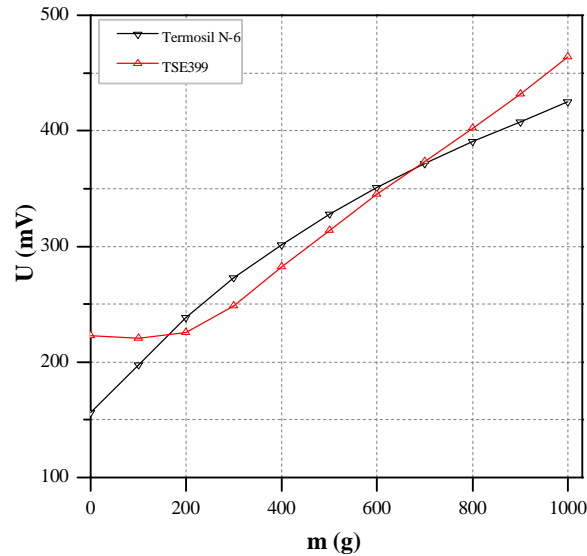


Slika 30: Senzorja tlaka na keramičnem substratu (a) in delno sestavljen prototip hidravlične merilne celice (b).

Prvi vzorci so bili sestavljeni v laboratoriju. Iz aluminija smo izstružili ohišje za hidravlično merilno celico. Na dno izvrtine ohišja smo pritrdili keramičen substrat z nameščenim silicijevim senzorjem tlaka. Štiri žice, ki so potrebne za napajanje in branje odziva Wheatstonovega mostiča implementiranega na silicijevem senzorju tlaka, smo prispajkali na kontakte na keramičnem substratu. Stransko odprtino za izvod napajalno-merilnih žic smo zatesnili z epoksidno tesnilno maso. Približno  $1/3$  volumna izvrtine smo zapolnili s silikonskim oljem tako, da je bil senzorski element za merjenje tlaka potopljen v silikonskem olju. Preostali volumen smo zapolnili s silikonsko tesnilno maso.

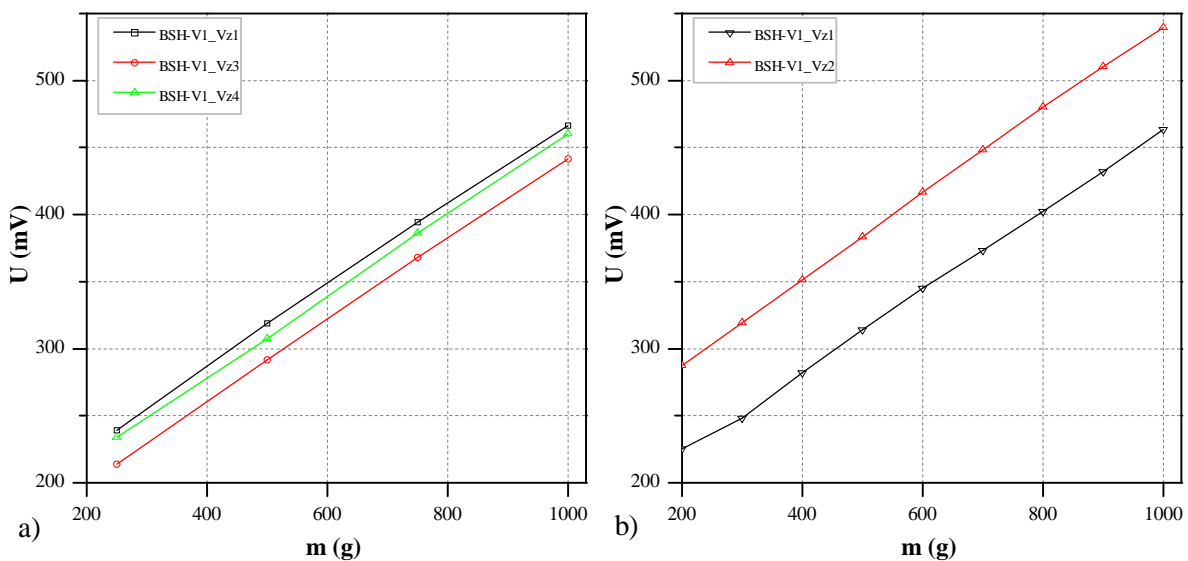
Pred dokončno izdelavo vzorcev smo najprej naredili vzorce z namenom preizkusa dveh

različnih enokomponentni silikonskih tesnilnih mas, to sta TSE399 in prozorna silikonska tesnilna masa termosil N-6. Meritvi odzivov obeh vzorcev, z različnima tesnilnima masama sta vidni na sliki 31. Pri tesnilni masi TSE399 [49] je v začetnem delu do približno 200 g odziv neznaten, nakar se krivulja odziva "prelomi" in je od tod naprej precej bolj linearna kot pri uporabi termosil N-6 silikonske tesnilne mase. Ker bodo vzorci po vgradnji obremenjeni s težo aparata in bo posamezen senzor obremenjen z več kot 300 g, ocenimo, da je silikonska tesnilna masa TSE399 primernejša in jo zato uporabimo za izdelavo nadaljnjih vzorcev.



Slika 31: Odziv vzorcev z različnima silikonskima zalivkama.

Prenosno funkcijo hidravličnih merilnih celic, za uporabo v kuhinjskih aparatih smo izmerili na štirih vzorcih – takšnih kot so prikazani na sliki 30b. Prenosno funkcijo treh vzorcev smo pomerili v 4 merilnih točkah – to je pri štirih različnih obremenitvah, dva senzorja pa bolj podrobno v 9 merilnih točkah, kar je razvidno s slike 32. Mostično vezje napajamo s 7 V, merimo direktno izhodno napetost Wheatstonovega mostičnega vezja na silicijevem senzorju tlaka brez uporabe kompenzacijskega vezja. Merilne celice imajo v območju obremenitve od 200 g do 1000 g dober linearen odziv, vrednost izhodne napetosti pa se giblje v območju od 210 mV do 540 mV.



Slika 32: Meritev dejanske prenosne funkcije v štirih (a) in devetih merilnih točkah (b).

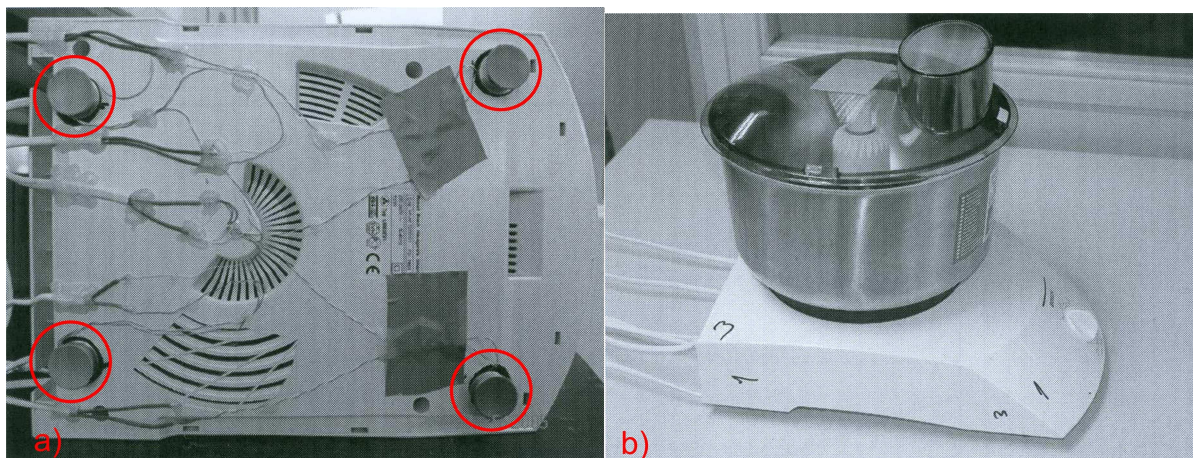
V nadaljevanju je potrebno na tako realizirano hidravlično merilno celico pritrčiti še spodnji del obstoječe gumijaste nogice kuhinjskega aparata. Vzorec hidravlične merilne celice, vgrajene v nogico kuhinjskega aparata ni bistveno večji od obstoječe gumijaste nogice, velikostna primerjava je vidna na sliki 33.



Slika 33: Hidravlične merilne celice vgrajena v nogico aparata v primerjavi z obstoječo gumijasto nogico.

### 6.1.2 Vgradnja v aparat in testiranje

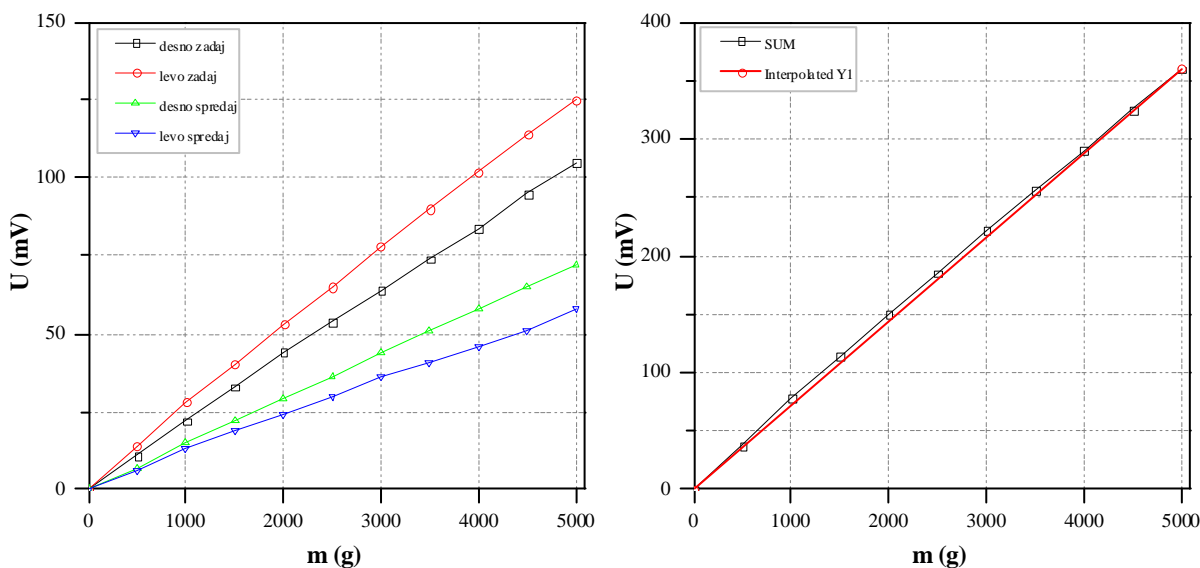
Po vgradnji štirih hidravličnih merilnih celic v nogico kuhinjskega aparata smo celoten sistem umerili in prilagodili za potrebe izvedbe funkcije tehtanja. Uporabili smo univerzalni kuhinjski aparat, tip MUM7200, ki je prvenstveno namenjen gnetenju testa. Izhode vseh štirih merilnih celic smo povezali direktno na merilni sistem DEWETRON, kjer smo merilne podatke zajemali s 16-bitno merilno kartico (NI PCI-6013).



Slika 34: Dno univerzalnega kuhinjskega aparata z vgrajenimi hidravličnimi merilnimi celicami, ki so označene (a) in aparat pripravljen za testne meritve (b).

Čeprav imajo vse štiri hidravlične merilne celice podobno občutljivost, je obremenitev in odziv posameznih hidravličnih merilnih celic v aparatu med tehtanjem različna.

Neenakomerna obremenitev je posledica nesimetričnosti aparata, kar je razvidno tudi s slike 35a. Hidravlični merilni celici, vgrajeni na zadnji strani aparata, sta precej bolj obremenjeni zaradi namestitve posode aparata, v katero dodajamo snov za tehtanje. Pri realizaciji funkcije tehtanja z vgrajenimi hidravličnimi merilnimi celicami smo hkrati zajemali odzive vseh štirih senzorjev. Programsko smo realizirali tudi funkcijo začetnega ničliranja tako, da smo vsaki zajeti vrednosti odšteli vrednost ničnega odziva. Tako dobljeno dejanske prenosne funkcije za posamezen senzor prikazuje slika 35a. Razberemo lahko, da je izhodni razpon tako realiziranih vzorcev od 54 mV pa do 125 mV, takšna razlika pa je predvsem zaradi nesimetrične obremenitve in je pogojena s konstrukcijo obstoječega kuhinjskega aparata. Če seštejemo odzive vseh štirih senzorjev, dobimo dejansko prenosno funkcijo za realiziran sistem vgrajene tehtnice. Na sliki 35b sta prikazani dejanska prenosna funkcija in njena linearna aproksimacija prenosne funkcije, razvidna pa je tudi napaka nelinearnosti.



Slika 35: Odziv posamezne hidravlične merilne celice v nogici aparata (a) in prikaz nelinearnosti vseh štirih (b).

### 6.1.3 Povzetek za hidravlično merilno celico - BSH verzija 1

Velikost in način vgradnje v aparat takšne izvedbe izpolnjuje naše prvotno zastavljene zahteve. Občutljivost tako realiziranih hidravličnih merilnih celic znaša okrog 18 mV/V, kar je ugodno s strani končnega vezja za zajem signala in ADC pretvorbe.

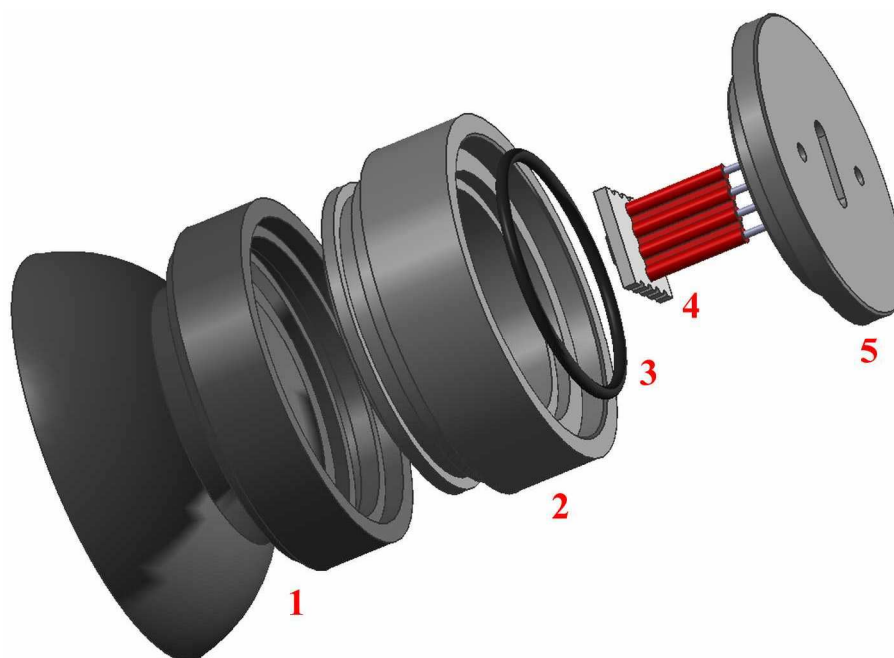
Napaka nelinearnosti tako realiziranega sistema znaša do  $\pm 100$  g ( $\pm 2$  %). Takšno napako smo potrdili tudi pri dejanskem preizkusu funkcije tehtanja takoj po umerjanju. Napake histereze nismo izmerili. Funkcija tehtanja z merilnimi celicami vgrajenimi v dno aparata je bila v celoti programsko realizirana. Merilne celice smo preizkusili tudi med delovanjem aparata in spremljali odzive vgrajenih hidravličnih merilnih celic. Po večkratni uporabi aparata smo opazili, da prihaja do poškodb na vzorcih hidravličnih merilnih celic zaradi preobremenitev. Glavni problem je predstavljalo tesnjenje silikonske zalivke in mehanske poškodbe na lepljenem spoju gumijastega dela nogice in silikonske zalivke. Prvi testi kažejo, da je še veliko prostora za izboljšave ter, da je možno tako zastavljen koncept miniaturnih hidravličnih merilnih celic še precej izboljšati.

## 6.2 Hidravlična merilna celica – BSH verzija 2

### 6.2.1 Načrtovanje in izdelava vzorcev

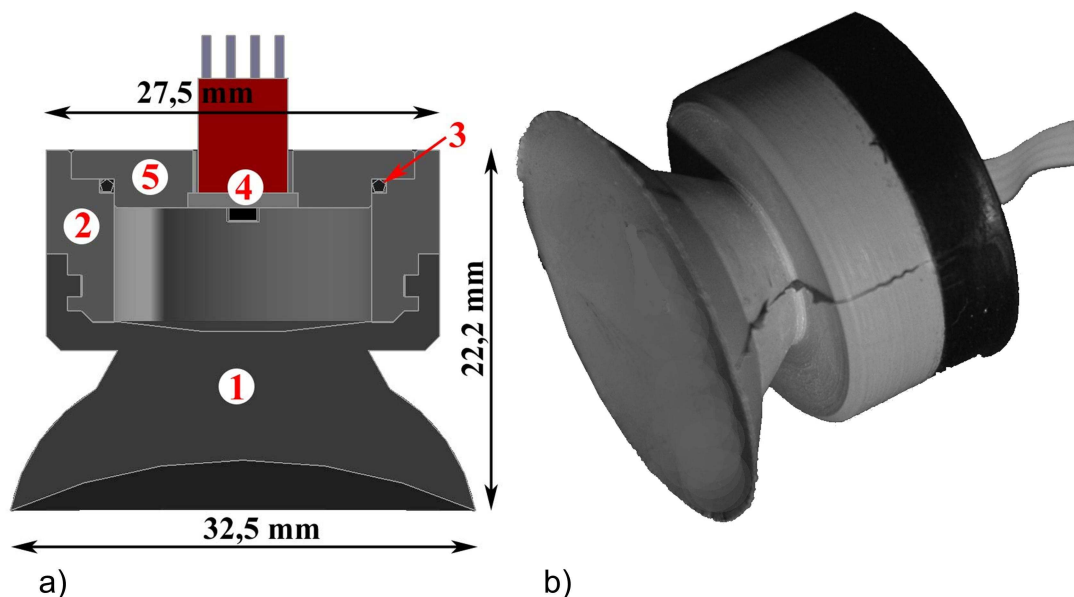
Ker v predhodnem primeru nismo uspeli zagotoviti zadostnega tesnjenja in zadovoljivega mehanskega spoja med gumijasto nogico in silikonsko zalivko, smo se odločili, da bomo gumijasti del nogice direktno vulkanizirali na ohišje merilne celice. V programskem paketu Unigraphics NX4 smo naredili 3D model hidravlične merilne celice. Dali smo izdelati namensko orodje za direktno brizganje gume na plastično ohišje merilne celice. Tako zastavljen koncept hidravlične merilne celice integrirane v nogici kuhinjskega aparata je sestavljen iz naslednjih delov, ki so prikazani na sliki 36.

- 1 – gumijasta nogica
- 2 – ohišje hidravlične merilne celice iz ojačanega poliamida (PA66-GF30)
- 3 – tesnilo
- 4 – senzor tlaka na keramičnem substratu
- 5 – pokrov senzorja



Slika 36: Prikaz komponent hidravlične merilne celice pred sestavo.

Slika 37a v prerezu prikazuje tako realizirane merilne celice. Ohišje merilne celice (2) ima zunanji premer 27,5 mm, na katerega je direktno nabrizgana in vulkanizirana gumijasta nogica (1). Gumijasta nogica je iz EPDM gume (Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber). Silicijev senzor absolutnega tlaka je nameščen na keramični podlagi s pritrjenim štirižičnim ploščatim vodnikom. Ta senzorski sklop (4) pritrdimo na pokrov senzorja (5) in zatesnimo mesto štirižičnega izvoda. Med pokrov senzorja in ohišjem senzorja je nameščeno tesnilo (3). Po namestitvi pokrova senzorja, le tega mehansko fiksiramo tako, da z dvokomponentnim lepilom zatesnimo spoj med ohišjem in pokrovom senzorja. Votlino v nogici v celoti zapolnimo s silikonskim oljem. V zadnjem koraku je potrebno zatesniti obe odprtini namenjeni za polnjenje s silikonskim oljem. Tako narejena merilna celica v prototipni izvedbi je prikazana na sliki 37b.

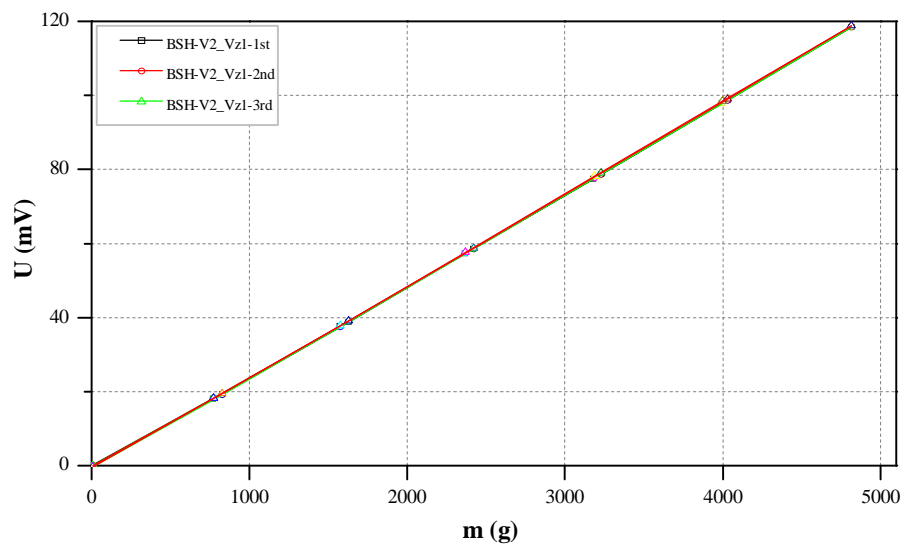


Slika 37: Shematski prikaz preseka hidravlične merilne celice (a) in realiziran vzorec (b). EPDM guma (1) je nabrizgan in vulkaniziran direktno na ohišje senzorja (2). Senzorski sklop (4) je nameščen na pokrov senzorja (5). Tesnilo (3) je nameščeno med ohišjem senzorja in pokrovom senzorja.

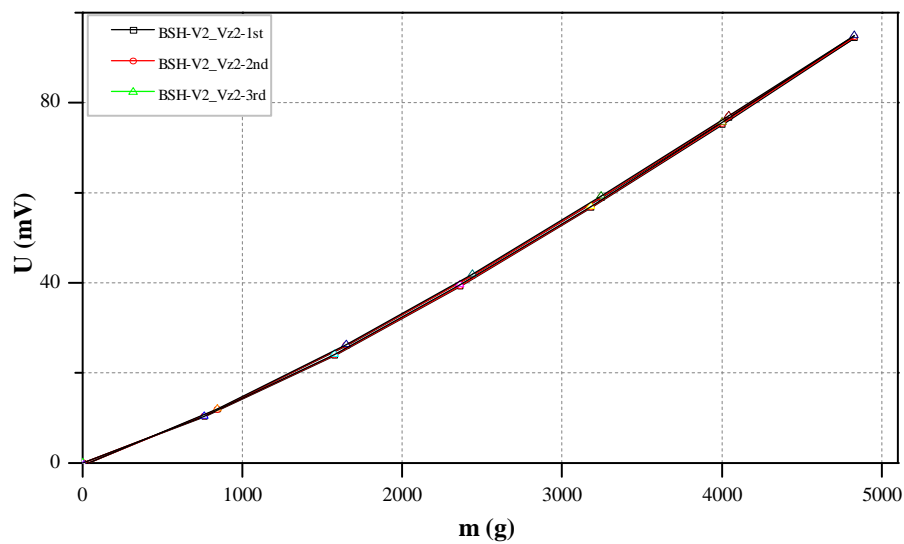
### 6.2.2 Karakterizacija hidravličnih merilnih celic

Za potrebe karakterizacije merilnih celic smo izdelali pripravo za merjenje merilnih celic, kot je opisana v poglavju 5.1. Izmerili smo karakteristike hidravličnih merilnih celic na štirih vzorcih (BSH-V2\_Vz1, BSH-V2\_Vz2, BSH-V2\_Vz3 in BSH-V2\_Vz4). Vsak vzorec smo pred meritvijo trikrat obremenili in razbremenili (tako imenovano treniranje merilne celice) v časovnih razmakih 5 minut. Temu sledi meritev, kjer smo v 7 naraščajočih in 7 padajočih merilnih točkah odčitali odziv hidravlične merilne celice. Meritev smo izvedli 3-krat zaporedoma v merilnem območju 200 g do 4800 g. Vse meritve smo izvajali pri temperaturi okolice  $19 \pm 0,1$  °C. Na slikah od 38 do 41 je prikazan odziv hidravličnih merilnih celic pri obremenjevanju in razbremenjevanju vsakega izmed merjenih vzorcev. Pred pričetkom meritve vrednost izhodne napetosti ničliramo.

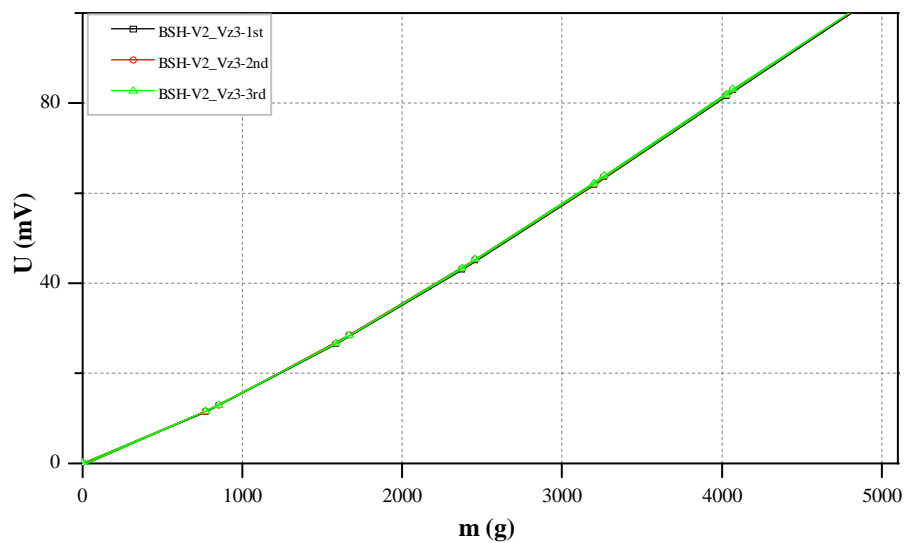
Na sliki 42 so povzete izmerjene karakteristike vzorcev BSH-V2\_Vz1, BSH-V2\_Vz2, BSH-V2\_Vz3 in BSH-V2\_Vz4. Pri merilnih celicah BSH-V2\_Vz1, BSH-V2\_Vz2, BSH-V2\_Vz3 znaša izhodni razpon okrog 100 mV, kar je skoraj 10x več kot pri klasičnih merilnih celicah s kovinskimi uporabnimi lističi. Linearno prenosno funkcijo smo določili po metodi najmanjših kvadratov. Parametri linearne prenosne funkcije so podani v tabeli 7. Za merilno celico BSH-V2\_Vz1, izmerjena napaka nelinearnosti znaša  $\pm 0,5$  % napaka histereze pa 0,3 %. Merilni celici BSH-V2\_Vz2 in BSH-V2\_Vz3 imata podobne karakteristike, napaka nelinearnosti znaša  $\sim \pm 4,5$  % in napaka histereze pa je manjša od 1 %. Najslabše karakteristike ima merilna celica BSH-V2\_Vz4 kjer je izmerjena napaka nelinearnosti  $\pm 6,5$  % napaka histereze pa skoraj 3 %. Vzorci BSH-V2\_Vz2, BSH-V2\_Vz3 in BSH-V2\_Vz4 imajo slabše merilne karakteristike delno tudi zato, ker nam notranjosti merilnih celic ni uspelo v celoti zapolniti z silikonskim oljem.



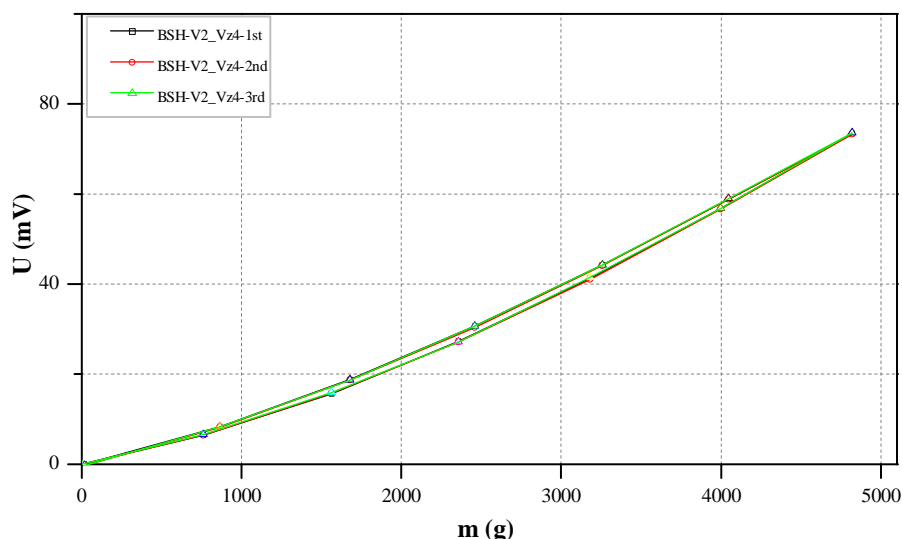
Slika 38: Vzorec BSH-V2\_Vz1, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.



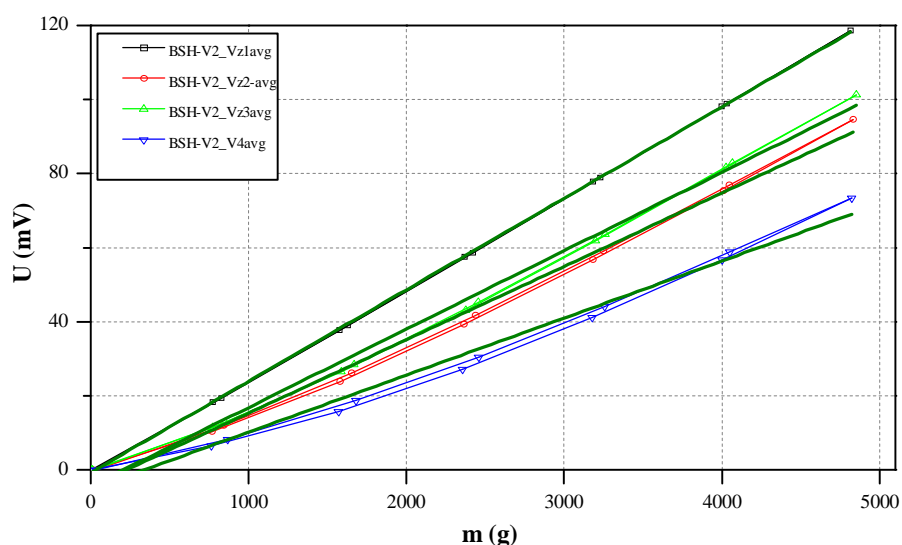
Slika 39: Vzorec BSH-V2\_Vz2, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.



Slika 40: Vzorec BSH-V2\_Vz3, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.



Slika 41: Vzorec BSH-V2\_Vz4, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.

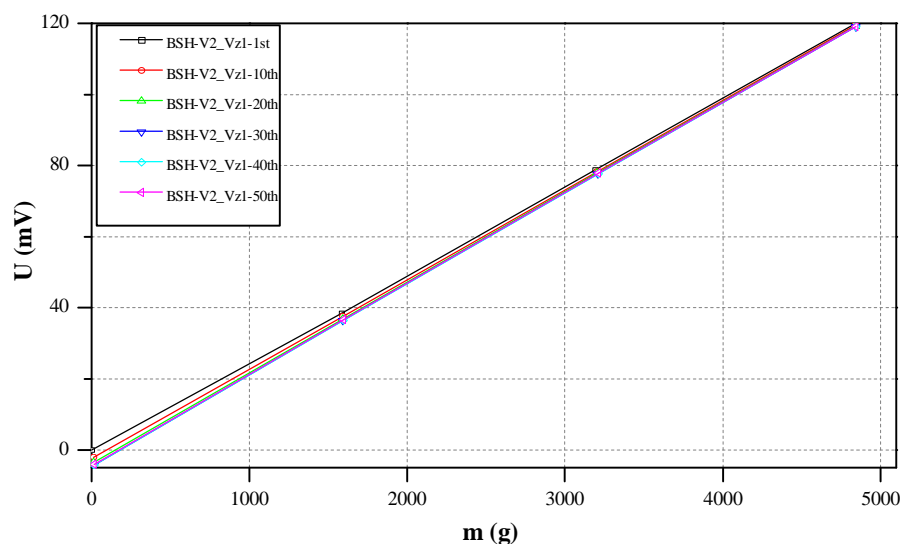


Slika 42: Povprečne vrednosti odziva 3x ponovljene meritve za vzorce BSH-V2\_Vz1, BSH-V2\_Vz2, BSH-V2\_Vz3 in BSH-V2\_Vz4. Vrisana je prenosna funkcija določena z metodo najmanjših kvadratov.

Tabela 7: Parametri linearne prenosne funkcije določene z metodo najmanjših kvadratov.

	BSH-V2_Vz1	BSH-V2_Vz2	BSH-V2_Vz3	BSH-V2_Vz4
$R^2=$	0,99992	0,99281	0,99462	0,98251
$b=$	0,0247	0,0198	0,0212	0,0154
$a=$	-0,767	-4,509	-4,351	-5,216

Na hidravlični merilni celici BSH-V2\_Vz1, pri katerem smo izmerili najmanjšo napako nelinearnosti, smo v nadaljevanju izvedli 50 zaporednih meritev. Merili smo odziv hidravlične merilne celice v 4 merilnih točkah tako pri dodajanju bremena, kot tudi pri odvzemanju bremena. Meritve smo izvedli pri temperaturi okolice  $19,8 \pm 0,1$  °C. Na sliki 43 je, zaradi preglednosti, vrisan le odziv vsake 10. meritve. Razlika med prvo in 50. meritvijo znaša 3,5 mV, kar pri dani začetni prenosni funkciji pomeni napako  $\sim 3$  %. Po približno 30 ciklih, se ponovljivost precej izboljša in posledično zmanjša napaka. Kljub veliki vrednosti vhodnega razpona, ki znaša do 120 mV, pa je napaka ponovljivosti prevelika, in nadaljnja testiranja takšne izvedbe hidravlične merilne celice opustimo.

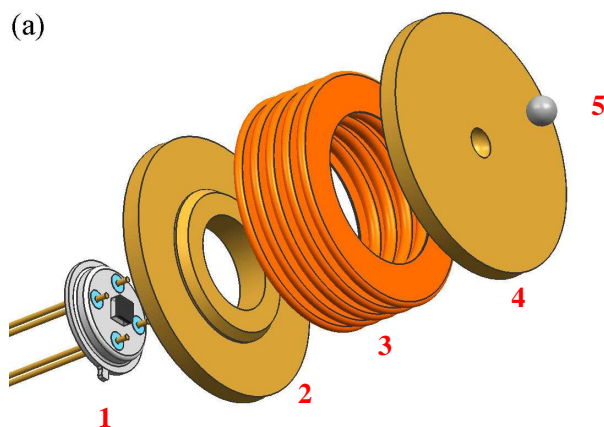


Slika 43: Prikaz odziva hidravlične merilne celice BSH-V2\_Vz1 pri 50 zaporednih meritvah.

### 6.3 Hidravlična merilna celica - BSH verzija 3

Ker meritve v obeh predhodno izdelanih in testiranih izvedbah hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev kažejo na precejšnjo napako nelinearnosti in histereze, smo se z namenom izboljšanja teh parametrov odločili za uporabo hiroformiranih kovinskih mehov. Takšni kovinski mehovi so izdelani iz tankih kovinskih cevi, ki ob izboru ustreznega materiala in oblikovanju reber zagotavljajo potrebno prožnost in življenjsko dobo. Postopek preoblikovanja cevi s pomočjo tekočega medija pod visokim tlakom v želeno obliko se imenuje hidroforming – hidroformirani kovinski mehovi. Ker v nadaljevanju govorimo le kovinskih mehovih, narejenih s tem postopkom, bomo izraz hidroformiran največkrat izpuščali. Najpogostejši materiali, iz katerih so narejeni ti kovinski mehovi, so nerjavno jeklo, berilijev bron, medenina, Monel in druge posebne zlitine. Na trgu je prisotnih večje število proizvajalcev, ki izdelujejo kovinske mehove najrazličnejših oblik in namembnosti. Izbrali smo kovinske mehove proizvajalca Hydroflex [50]. Za predviden namen uporabe je najprimernejši material berilijev bron (CuSn8), ker ima odlično korozijsko obstojnost in je priporočljiv za uporabo pri stiku z vodo, vlago, olji in v okoljih s povečano vlago. Kovinski mehovi, narejeni iz berilijevega brona, so zelo stabilni z malim lezenjem in histerezo, poleg tega pa je kovinske mehove iz berilijevega brona mogoče spajkati, kar je ugodno za izdelavo vzorcev.

Hidravlična merilna celica za merjenje majhnih obremenitev, ki je namenjena za vgradnjo v kuhinjske aparate, bo sestavljena iz sledečih komponent, prikazanih na sliki 44. Senzorska tabletko za merjenje absolutnega tlaka je pritrjena in bondirana na podnožje ohišja TO-39, in skupaj sestavljata senzorski sklop (1). Senzorski sklop pride nameščen v odprtino spodnje plošče (2). Med spodnjo in zgornjo ploščo (4) bo prispajkan kovinski meh (3) izdelan s postopkom hidroforminga. Spodnja plošča je po osnovnih zunanjih dimenzijah enaka kot zgornja s to razliko, da ima dodatno izvrtino za namestitev senzorskega sklopa. Zgornja plošča ima dodatno v središču nameščeno kovinsko kroglico, ki bo zagotavljala točkovno obremenitev hidravlične merilne celice. Za potrebe modeliranja naredimo več 3D modelov, kjer kot izhodišče vzamemo podatke za kovinske mehove iz kataloga zgoraj omenjenega proizvajalca z zunanjim premerom od 14,3 mm do 23,8 mm. Debeline sten kovinskih mehov iz kataloga so 1,0 mm, 1,127 mm in 1,5 mm, kar smo uporabili pri modeliranju in simulacijah. Zunanji premer zgornje in spodnje plošče pa naj bo 1 mm večji kot zunanji premer kovinskega mehu.



Slika 44: Eksplozijska risba, ki prikazuje sestav hidravlične merilne celice

### 6.3.1 Simulacija hidravlične merilne celice z metodo končnih elementov (MKE)

Pojavi v hidravlični merilni celici za merjenje malih mas pri obremenjevanju in vplivi okoljskih parametrov so odvisni od več spremenljivk in jih je zato v realnem okolju težko popisati in kontrolirati. Za pomoč pri raziskavah in vrednotenju le teh je smotrno uporabiti programske pakete, ki s pomočjo numeričnih izračunov na podlagi metode končnih elementov (MKE) simulirajo dogajanje pri različnih mehanskih in temperaturnih procesih.

Simulacije realnih modelov z metodo končnih elementov predstavljajo sodoben in učinkovit pristop k reševanju tako linearnih kot nelinearnih problemov, s katerimi se srečujemo v realnem okolju. Simulacije z MKE postajajo vedno bolj nepogrešljive pri snovanju novih izdelkov, saj z njihovo pomočjo problem prestavimo v navidezno računalniško okolje, ga tam preverimo in po potrebi optimiziramo. Največje prednosti uporabe analiz v digitalnem okolju so sledeče:

- že v fazi konstruiranja proizvoda je možno oceniti njegove lastnosti,
- MKE lahko uporabimo za predhodne napovedi težav pri končnem izdelku in s tem zmanjšamo število korakov 'poskus-napaka-poskus' na dejanskem sistemu,
- s pomočjo numeričnih simulacij lahko bistveno skrajšamo celoten čas potreben za razvoj novih izdelkov,
- optimiziramo tehnološke postopke in hkrati povečamo kvaliteto izdelkov,
- numerično simuliranje je pomembno orodje pri uvedbi sočasnega inženirstva.

Za izvedbo analize modela hidravlične merilne celice za merjenje majhnih mas z linearno-elastično parametrično analizo s pomočjo MKE si postavimo sledeče zahteve:

Geometrijo posameznih sestavnih delov se lahko izdela v poljubnem 3D programskem okolju in uvozi v programsko okolje ANSYS. Matematični model naj bo sestavljen tako, da je mogoče spreminjati snovno dimenzijske parametre modela za vsak posamezen del, ki sestavlja model hidravlične merilne celice. To pomeni, da je mogoče spreminjati minimalno vsaj:

- notranji in zunanji premer kovinskega mehu, debelino stene, notranji in zunanji radij ukrivljenosti reber,
- začetno in končno temperaturo simulacije,
- materialne lastnosti trdnih sestavnih delov, ki so popisane z linearnim zakonom (Hookov zakon),
- polnilni medij (fluid), ki je opisan kot »skoraj« nestisljiv (popolnoma nestisljiv polnilni medij vodi v numerično nestabilnost in bistveno oteži konvergenco simulacije),
- število vzmetnih reber kovinskega mehu je mogoče spremeniti z izdelavo nove

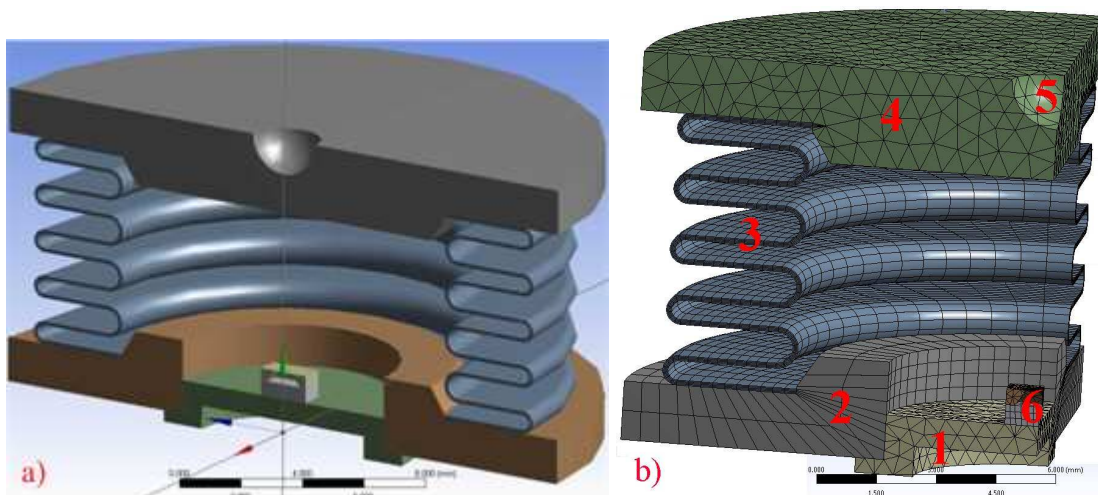
oziroma spremembo obstoječe geometrije modela. Numerična analiza je zaradi upoštevanja in lastnosti polnilnega medija nelinearna.

Kot rezultat analize matematičnega modela hidravličnega senzorja z MKE želimo dobiti:

- potek krivulje v F-P diagramu, ki podaja odvisnost tlaka ( $P$ ) v senzorju glede na delujočo zunanjo silo teže na senzor ( $F$ ),
- potek krivulje v T-P diagramu, ki podaja odvisnost tlaka ( $P$ ) v senzorju v odvisnosti od temperature ( $T$ ),
- napetost na izhodu hidravličnega senzorja v odvisnosti od temperature in delujoče sile na senzor,
- napetostno polje v sestavnih elementih senzorja,
- deformacijsko polje sestavnih elementov senzorja.

### 6.3.2 Izvedba analize z metodo končnih elementov

Geometrijski model hidravlične merilne celice za merjenje malih obremenitev prikazan na sliki 45a, je sestavljen iz 5 kosov. Geometrijski modeli so narejeni v naravni velikosti v programskem paketu Unigraphics NX4 in direktno uvoženi v okolje numeričnega programa ANSYS. Model moramo postaviti tako, da je postavljen osno simetrično glede na globalno z-os. Zaradi simetričnosti modela lahko le tega prerežemo v ravnini z-y, kot je prikazano na sliki 45a. V nadaljevanju ga prerežemo še v z-x ravnini in tako nam ostane za simulacijo le 1/4 modela, na katerem je mogoče izvesti enake izračune, kot na celotnem modelu ob bistvenem prihranku procesorske moči in potrebnem času za rešitev modela. Na obeh ravninah z-y in z-x določimo ustrezne robne pogoje zaradi simetričnosti. Prav tako smo z namenom poenostavitve modela in pohitritve izračunov naredili dve poenostavitvi, za kateri smatramo, da imata na končen izračun minimalen vpliv. Na modelu niso upoštevanji kontaktni izvodi TO-39 ohišja, vse spajkane spoje pa v modelu togo zlepimo. Na sliki 45b je prikaz 1/4 modela z naslednjimi označenimi komponentami: 1 - podnožje ohišja TO-39, 2 - spodnja plošča, 3 - hidroformiran kovinski meh, 4 - zgornja plošča, 5 – prostor predviden za kovinsko kroglico in 6 - senzorska tabletkita za merjenje tlaka.



Slika 45: Geometrija senzorja za merjenje sile v prerezu (a) in 1/4 modela z izdelano mrežo (b).

Model, ki ga želimo analizirati, je potrebno razdeliti na posamezne elemente različnih geometrijskih oblik (pravokotnik, trikotnik ...). Ti elementi so med seboj povezani preko vozlišč in tvorijo celoto. Vsak element ima polje in vozlišča, ki imajo v postavljenem koordinatnem sistemu spremenljive ali fiksne koordinate. Pod vplivom zunanje obremenitve, ki se prenaša preko vozlišč, se ti elementi deformirajo oziroma premikajo. Premiki in sile v

sosednjih elementih so med seboj povezane in soodvisne. Vsak element ima določene enačbe, s katerimi so pomiki posameznih točk znotraj elementa enolično določljivi s pomiki njegovih vozlišč. Z rešitvijo teh enačb dobimo simulacijo preoblikovanja modela pri danih obremenitvah in pomikih. Natančnost simulacije oziroma natančnost izračunov je v veliki meri odvisna od izbire oblike in velikosti elementov mreže ter drugih vhodnih podatkov.

Največji problem predstavlja izdelava primerne mreže končnih elementov, zlasti za tanke stene kovinskega mehu. Za kreiranje visoko kakovostne mreže, je potrebno uporabiti napredne metode generiranja mreže [51]. Stene kovinskega mehu so po debelini prekrte s štirimi elementi, in 15 elementi po 1/4 obsega, prav tako pa smo določili tudi število elementov na vodoravnih površinah in na polkrožnih delih reber kovinskega mehu. Mreža modela, prikazanega na sliki 45b, je tako sestavljena iz 19.346 elementov, ki imajo 66.331 vozlišč. Za izdelavo mreže so bili uporabljeni elementi višjega reda, SOLID186 in SOLID187. Vsakemu elementu modela smo določili tudi materialne lastnosti, ki so zbrane in podane v tabeli 8.

Tabela 8: Materialni podatki uporabljeni pri simulacijah hidravlične merilne celice [52, 53].

material	E (GP)	$\gamma$	$\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ /K)	K (GPa)	$\beta$ ( $\times 10^{-4}$ /K)
CuSn12	105	0,3	18	/	/
CuSn8	110	0,34	18,2	/	/
jeklo	200	0,3	10,4	/	/
silicij	165	0,22	3,5	/	/
silikonsko olje	/	/	/	1	9,4

Kjer je:

E —modul elastičnosti (Youngov modul)

$\gamma$  —Poissonovo razmerje

$\alpha$  —linearni koeficient termičnega raztezka

K —modul stisljivosti medija

$\beta$  —volumski koeficient razteznosti.

Izdelali smo namenski makro program, ki opisuje lastnosti tekočine, s katero je napolnjena notranjost hidravlične merilne celice, v programski kodi APDL, ki jo uporablja ANSYS (angl. Parametrični Design Language – APDL). Naloga narejenega makra je dvojna. V prvi vrsti poskrbi za izdelavo ustrezne mreže v tekočini. Pri tem upošteva, da se tekočina dotika vseh predhodno definiranih površin v notranjosti senzorja, to so vsi kovinski deli in silicijev senzor tlaka. V nadaljevanju pa izvaja izračune matematičnega modela. Dokončno rešitev dobimo po več zaporednih iteracijah, katerih maksimalno število lahko vnaprej omejimo. Praksa je pokazala, da lahko naš matematičen model rešimo v 15 iteracijah. Zaradi lažjega spreminjanja parametrov imamo možnost, da 8 osnovnih parametrov za makro podajamo v kontrolnem oknu programskega paketa za numerične analize ANSYS. Primer podanih parametrov za vzorčni model je podan v tabeli 9.

Tabela 9: Parametri, ki jih potrebuje makro pri reševanju matematičnega modela z MKE.

argument	vrednost	enota	komentar
Arg1	0		postavitev globalnega koordinatnega sistema
Arg2	1000	(MPa)	modul stisljivosti medija
Arg3	22	(°C)	začetna (izhodiščna) temperatura
Arg4	30	(°C)	končna temperatura
Arg5	940000	(1/°C)	volumski koeficient razteznosti ( $\times 10^{-9}$ )
Arg6	300	(kPa)	začetna (izhodiščna) vrednost tlaka v mediju
Arg7	40	(kPa)	dovoljeni korak spremembe tlaka v iteraciji
Arg8	30		število korakov iteracij za izračun modela

Kot že omenjeno, bo tekočina, ki zapolnjuje notranjost hidravlične merilne celice za merjenje malih mas, v stiku z vsemi kovinskimi deli in silicijevo tabletko za merjenje tlaka. Zato mora imeti izbrana tekočina visoko električno upornost, ne sme kemično reagirati z materiali s katerimi je v kontaktu, imeti mora dolgoročno stabilne fizikalne lastnosti v širokem temperaturnem območju. Vsem tem zahtevam ustrezajo silikonska olja, ki so lahko tudi v neposrednem stiku s silicijevim senzorjem tlaka, četudi ta ni v izvedbi za negostoljubna okolja. Predvideli smo uporabo silikonskega olja Wacker AK-100 [52].

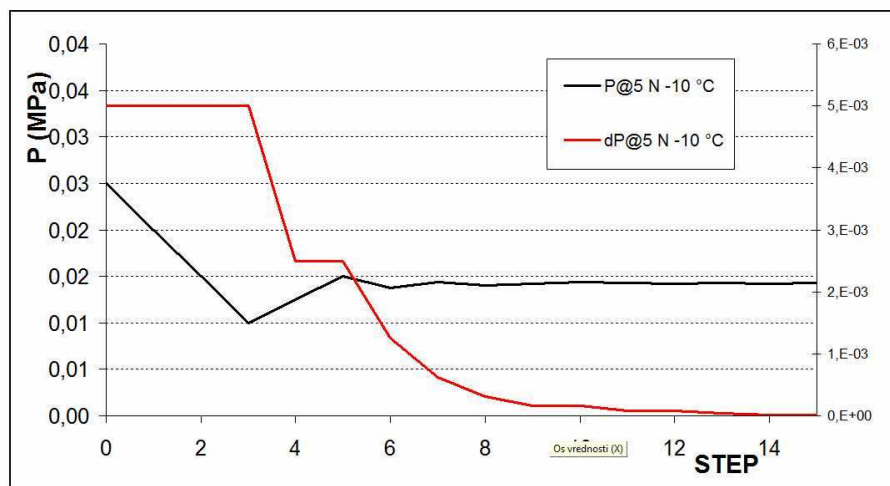
### 6.3.3 Rezultati simulacij z metodo končnih elementov

Z začetnimi simulacijami smo izbrali najprimernejšo velikost kovinskega mehu. Na podlagi preliminarnih izračunov za modele z različnimi dimenzijami kovinskih mehov smo se odločili za izvedbo z zunanjim premerom 19,1 mm. Kovinski meh takšne velikosti ustreza zastavljenim ciljem končne velikosti izdelane hidravlične merilne celice.

Rezultat analize modela hidravlične merilne celice z MKE nam omogoča vpogled v sledeče izračunane vrednosti:

- tabelaričen izračun vrednosti tlaka v senzorju v odvisnosti obremenitve hidravlične merilne celice,
- tabelaričen izračun vrednosti tlaka v senzorju v odvisnosti od spreminjajoče se temperature,
- tabelaričen izračun vrednosti tlaka v senzorju v odvisnosti od spreminjajoče se temperature in obremenitve,
- napetostno polje v sestavnih elementih senzorja,
- deformacijsko polje sestavnih elementov senzorja.

Kot smo že omenili, iskanje rešitve poteka iterativnih korakov, kjer izračunane vrednosti konvergirajo h končni rešitvi. Simulacija je končana, ko program izvede predpisano število iteracij oziroma, ko je napaka dveh zaporednih iteracij manjša od vrednosti, ki jo določimo. Slika 46 prikazuje potek izračuna tlaka v fluidu hidravlične merilne celice pri 10 °C in tlačni obremenitvi s silo 5 N. Črna krivulja prikazuje potek izračunanega tlaka v vsaki od 15-ih iteracij, rdeča krivulja pa napako med dvema zaporednima iteracijama.

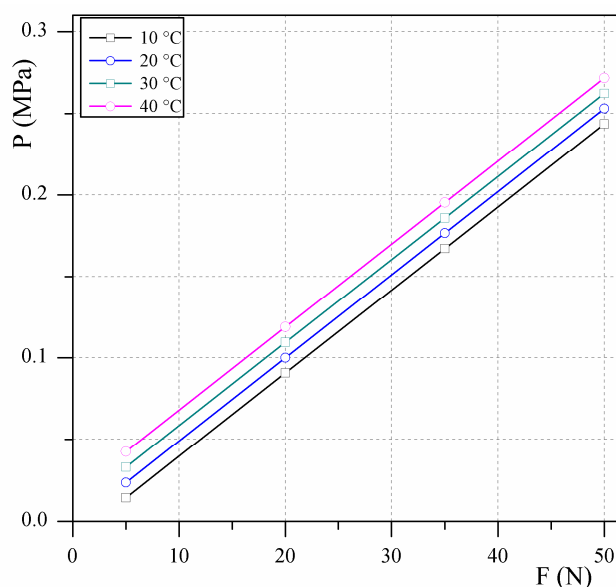


Slika 46: Primer poteka iterativnega reševanja in približevanja pravi vrednosti. Z rdečo je prikazana napaka dveh zaporednih iteracij.

Simulirali smo tri različne kovinske mehove iz berilijevega bronca CuSn8 z zunanjim premerom 19,2 mm, notranjim premerom 12,1 mm in debelino stene 0,1 mm, 0,127 mm in 0,15 mm. Za vsak model smo izvedli simulacijski izračun pri obremenitvi s silo 5 N, 20 N, 35 N in 50 N in pri temperaturah 10 °C, 20 °C, 30 °C in 40 °C.

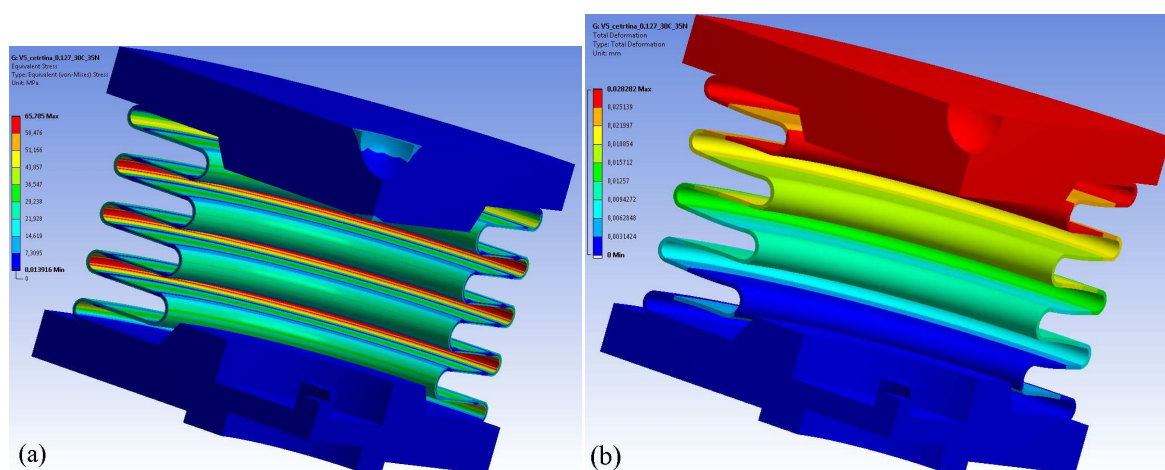
Zbrani rezultati simulacij z MKE za kovinski meh debeline 0,127 mm, so prikazani na sliki 47. Prikazan je tlak v hidravlični merilni celici in njegova odvisnost od različnih obremenitev pri različnih temperaturah. Viden je temperaturni vpliv na vrednost ničelnega tlaka, vendar pa simulacija kaže, da se občutljivost ne spremeni, zato lahko predvidevamo, da temperaturna kompenzacija ne bo prestavljala večjih problemov. Temperaturna odvisnost občutljivosti in temperaturnega ničelnega odziva silicijevega senzorja tlaka pri simulaciji ni upoštevana.

Simulacije kažejo, da je pri najbolj neugodnih pogojih, to je obremenitev pri maksimalni zmogljivosti ( $E_{max}$ ) in temperaturo okoli 40 °C, tlak v tekočini merilne celice 0,27 MPa. Pri predvideni obremenitvi v dejanskem merilnem območju ( $D_{max}$ ) pa tlak v tekočini merilne celice ne presega 0,18 MPa. Ker je hidroformiran kovinski meh izdelan za nazivno vrednost 0,35 MPa, imamo dovolj rezerve tudi ob morebitnih kratkotrajnih preobremenitvah.



Slika 47: Tlak v fluidu hidravlične merilne celice pri različnih obremenitvah. Simulacija za 0,127 mm debelo steno kovinskega mehu.

Simulirali smo ekvivalentne (von Mises) in posamezne komponente napetostnega polja, komponente polja relativnega raztezka in deformacijsko polje za vse komponente hidravlične merilne celice. Primer izračuna za hidravlično merilno celico s kovinskim mehom debeline 0,127 mm pri tlačne obremenitve 35 N in temperaturi 30 °C je podan v tabeli 10, kjer so zabeležene maksimalne vrednosti. Simulacije kažejo, da so napetosti in deformacije v zgornji in spodnji plošči hidravličnih merilne celice komaj zaznavne. To ponuja možnost naknadne optimizacije pri zmanjšanju porabe materiala in nižanje cene, ki pa je v tej fazi nismo izvajali zaradi ročne izdelave vzorcev. Ekvivalentno napetostno polje in ekvivalenten relativen raztezek v nobenem od elementov hidravlične merilne celice ne presegata dopustnih vrednosti. Tako narejena hidravlična merilna celica je zelo toga, deformacija pri mehanski obremenitvi ni večja od 0,025 mm. Ob upoštevanju vpliva temperature pa je pričakovana deformacija do 0,15 mm. Zaradi temperaturnega koeficienta razteznosti predvsem fluida, ki je, kot je razvidno iz tabele 8, približno 17 krat večji kot razteznostni koeficient ostalih materialov, ki sestavljajo hidravlično merilno celico.



Slika 48: (a) Porazdelitev ekvivalentnih (von Mises) napetosti v komponentah hidravlične merilne celice z 0,127 mm debelo steno hidroformiranega kovinskega mehu pri 30 °C in tlačni obremenitvi 35 N. Desno (b) pa je prikazana deformacija.

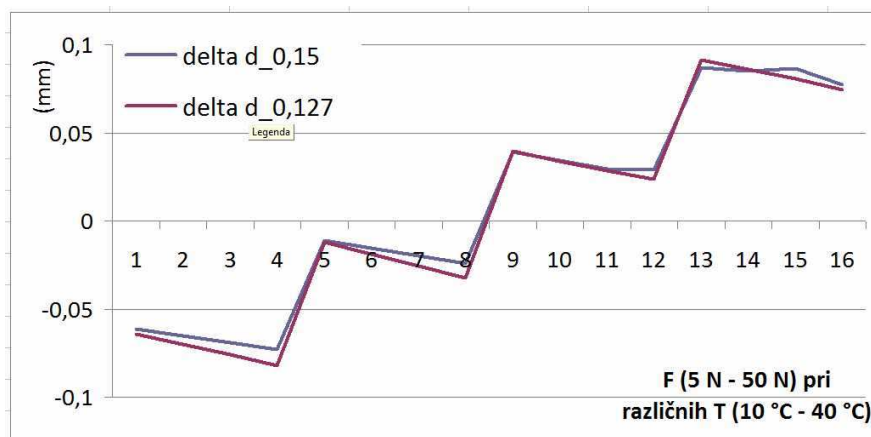
Na sliki 48a je prikazano ekvivalentno napetostno polje, na sliki 48b pa prikaz

deformacijskega polja za simuliran model hidravlične merilne celice. Deformacije pri 10 °C in 20 °C ima negativno vrednost (skrček), ker je izhodiščna vrednost za simulacije 22 °C.

Tabela 10: Simulirani rezultati za ekvivalentne (von Mises) napetosti in ekvivalenten relativen raztezek in deformacijo. Zapisane so maksimalne vrednosti.

F	T	mehanske napetosti (von Mises kriterij)	mehanska deformacija (von Mises kriterij)	sprememba višine merilne celice
(N)	(°C)	(MPa)	(mm/mm)	(mm)
5	10	30,4	$2,76 \times 10^{-4}$	$-6,41 \times 10^{-2}$
20	10	53,0	$4,82 \times 10^{-4}$	$-7,01 \times 10^{-2}$
35	10	75,6	$6,88 \times 10^{-4}$	$-7,61 \times 10^{-2}$
50	10	98,7	$8,97 \times 10^{-4}$	$-7,32 \times 10^{-2}$
5	20	11,3	$1,02 \times 10^{-4}$	$-1,22 \times 10^{-2}$
20	20	34,3	$2,77 \times 10^{-4}$	$-1,89 \times 10^{-2}$
35	20	57,4	$5,21 \times 10^{-4}$	$-2,56 \times 10^{-2}$
50	20	80,5	$7,32 \times 10^{-4}$	$-3,25 \times 10^{-2}$
5	30	25,5	$2,31 \times 10^{-4}$	$3,95 \times 10^{-2}$
20	30	45,1	$4,10 \times 10^{-4}$	$3,39 \times 10^{-2}$
35	30	65,8	$5,89 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-2}$
50	30	84,5	$7,68 \times 10^{-4}$	$2,35 \times 10^{-2}$
5	40	49,2	$4,48 \times 10^{-4}$	$9,15 \times 10^{-2}$
20	40	68,9	$6,26 \times 10^{-4}$	$8,58 \times 10^{-2}$
35	40	88,7	$8,06 \times 10^{-4}$	$8,06 \times 10^{-2}$
50	40	108,0	$9,83 \times 10^{-4}$	$7,46 \times 10^{-2}$

Slika 49 prikazuje rezultate simulacije za spremembo višine hidravlične merilne celice pri različnih obremenitvah in temperaturah. Vrisani sta spremembi višine hidravlične merilne celice za dve različni debelini kovinskega mehu, in sicer za 0,127 mm in 0,15 mm. Simulacije so izvedene za obremenitve 5 N, 20 N, 35 N in 50 N pri temperaturah okolice 10 °C, 20 °C, 30 °C in 40 °C.



Slika 49: Deformacija hidravlične merilne celice za debelini kovinskega mehu 0,127 mm in 0,15 mm pri različnih obremenitvah in temperaturah.

## 6.4 Prototipni vzorci hidravličnih merilnih celic – BSH-V3

### 6.4.1 Merjenje tlaka v hidravlični merilni celici

Meritev tlaka tekočine, ki zapolnjuje notranjost hidravlične merilne celice je potrebno izmeriti v notranjosti hidravlične merilne celice. Zaradi prostorskih omejitev in predvidenega načina vgradnje je najprimernejši izbor piezouporovnega silicijevega senzorja tlaka v izvedbi za merjenje absolutnega tlaka.

Kot primerne smo izbrali silicijeve senzorje tlaka MS7904A in MS7204A, proizvajalca Intersema Sensoric. Silicijev senzor tlaka MS7904A ima zelo majhno napako nelinearnosti in histereze, MS7204A pa je primeren za negostoljubna okolja, ima pa tudi implementirano diodo, ki je namenjena za meritev temperature. Nekatere izmed tipičnih vrednosti izbranega senzorskega obeh senzorskih elementov so prikazane v tabeli 11.

Tabela 11: Tipične karakteristike za MS7904A in MS7204A silicijevo tlačno tabletko [54, 55].

parameter (MS7904A /MS7204A)	min.	tipično	maks.
delovni tlak (MPa)	0/0		0,4/0,4
delovno temperaturno območje (°C)	-40/-40		125/150
upornost mostičnega vezja (kOhm)	3,0/3,0	3,4/3,4	3,8/3,8
polni izhodni razpon (FS) (mV)	120/120	150/150	180/180
ničelni odziv (mV)	-40/-40	0/0	40/40
napaka linearnost (% FS)		±0,05/±0,15	±0,15/±0,3
napaka histereza (% FS)	-/-0,2	±0,05/-	±0,15/0,2
temp. koef. ničnega odziva ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )-80/-80			80/80
diode forward voltage (V)		-/0,550	
temp.koef. diode (mV/°C)		-/-2,2	

Absoluten senzor tlaka, z merami  $1,58\text{ mm} \times 1,72\text{ mm} \times 0,91\text{ mm}$  smo pritrdili na podnožje ohišja TO-39 epoksidnim lepilom in ga bondirali na kontaktne izhode – slika 50 . Tako narejenemu senzorskemu delu pred dokončno vgradnjo izmerimo še linearno in histerezno karakteristiko.

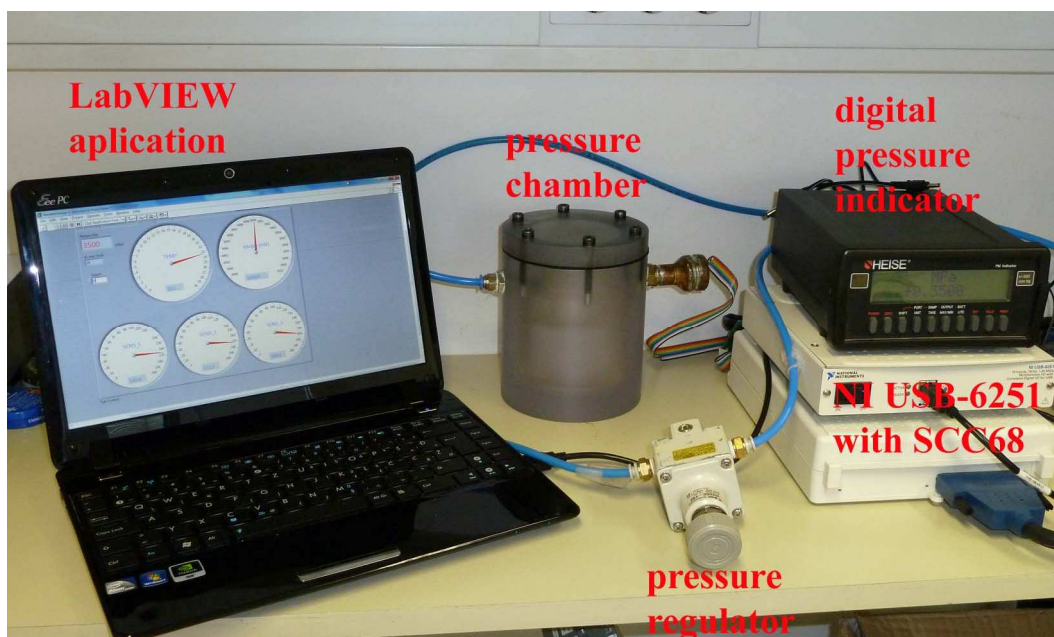
Senzorje tlake, nameščene na podnožju TO-39 ohišja, smo med meritvijo namestili v namensko izdelano tlačno komoro. Med meritvijo so bili vzorci potopljeni v silikonsko olje. Napako nelinearnosti in napako histereze smo izmerili v njihovem nazivnem merilnem območju, to je do 0,4 MPa nadtlaka. Sočasno smo merili tri vzorce. Nadtlak smo nastavljali z preciznim regulatorjem tlaka (SMC IR 2000-F02) in ga odčitavali z digitalnim merilnikom

tlaka (HEISE PM). Merilno okolje je prikazano na sliki 51. Izhodna napetost v odvisnosti od tlaka pa je prikazana na sliki 52. Vsak vzorec smo izmerili v 9 merilnih točkah – to je pri različnih tlačnih obremenitvah.

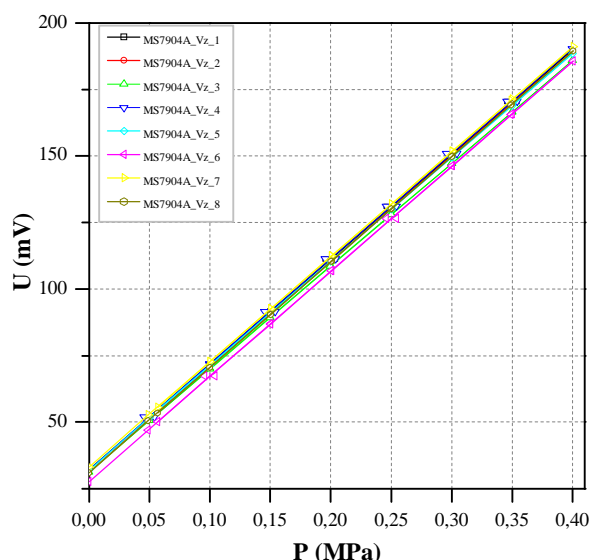


Sika 50: Silicijev senzor tlaka MS7204A nameščen na podnožju TO-39 ohišja.

Povprečna vrednost ničelne izhodne napetosti je 30,2 mV in izračuna občutljivost za senzorje je v povprečju 392,93 mV/MPa. Analiza meritev je pokazala, da je napaka nelinearnosti in histereze v nazivnem območju merjenja tlaka manjša kot 0,05 % kar je za našo aplikacijo povsem dovolj.



Slika 51: Merilno okolje za karakterizacijo senzorskih elementov pred dokončno vgradnjo.

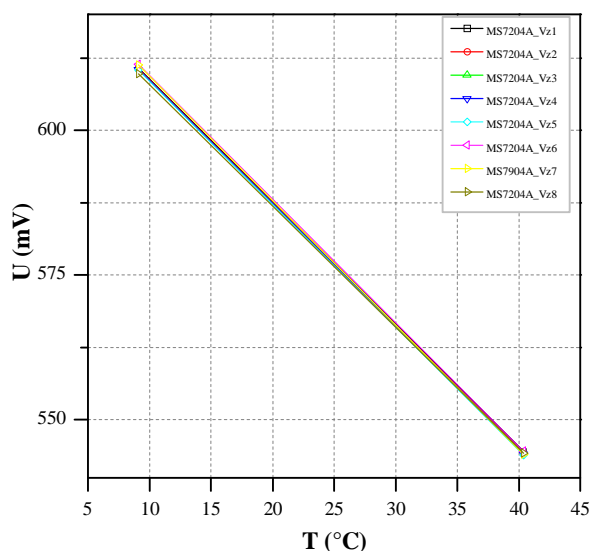


Slika 52: Izhodne napetost silicijevih senzorjev tlaka MS7904A. Napake nelinearnosti in histereze so pri vseh karakteriziranih vzorcih pod deklariranimi tipičnimi vrednostmi, ki jih podaja proizvajalec.

#### 6.4.2 Merjenje temperaturnega odziva:

Vsak senzor MS7204A pred vgradnjo še temperaturno karakteriziramo pri 10 °C in 40 °C vmes ni potrebno saj je temperaturni odziv dovolj linearen za naše potrebe. Za napajanje difundirane diode je potrebno narediti vezje s konstantnim napajanjem po priporočilih od 50  $\mu$ A do 100  $\mu$ A. Mi smo uporabili vezje REF200, ki je precizni napajalnik za 100  $\mu$ A.

Za vsak senzor tako določimo prenosno funkcijo za meritev temperature, s pomočjo integrirane diode na silicijevem senzorskem elementu.

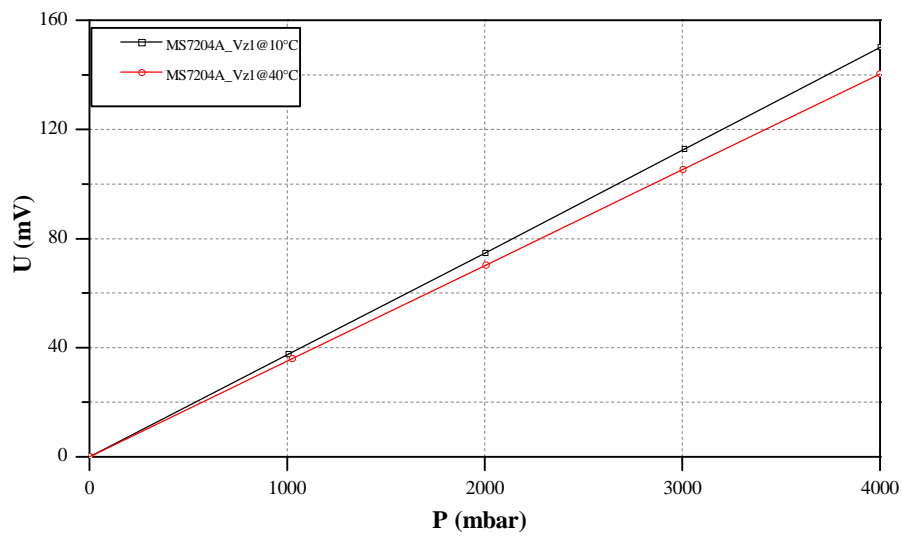


Slika 53: Izhodne napetost silicijevih senzorjev tlaka v odvisnosti od temperature.

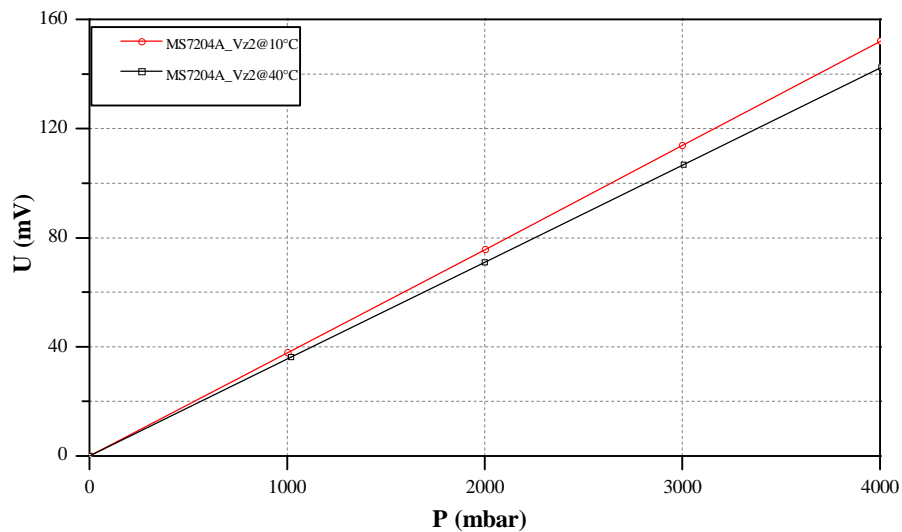
#### 6.4.3 Temperaturna odvisnost nične napetosti in občutljivosti silicijevega senzorja tlaka

Pred vgradnjo smo izmerili tri vzorce glede na temperaturno odvisnost parametrov silicijevega senzorja tlaka. Meritev je izvedena v zraku za MS7204A.

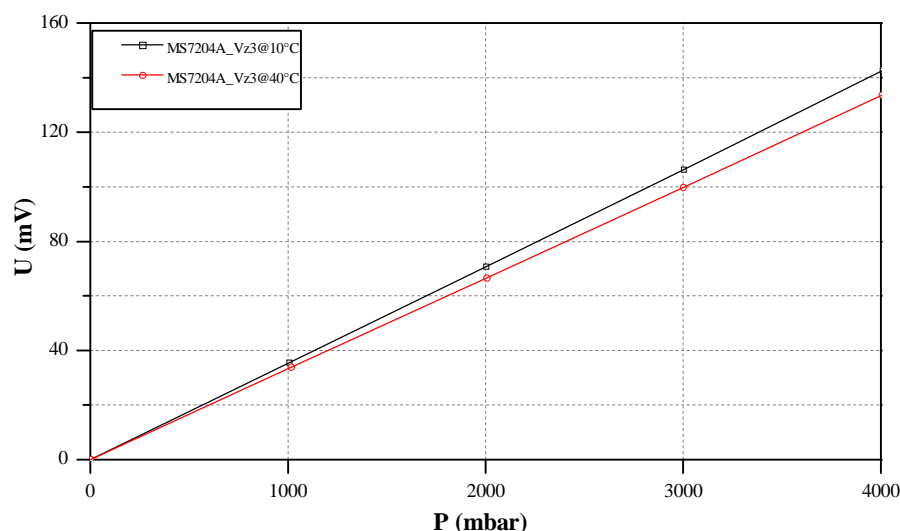
Ker še niso vgrajeni v senzor smo jih karakterizirali v tlačni komori v nazivnem območju, to je od 0 Mpa do 0,4 MPa.



Slika 54: MS7204A\_Vz1 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.



Slika 55: MS7204A\_Vz2 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.

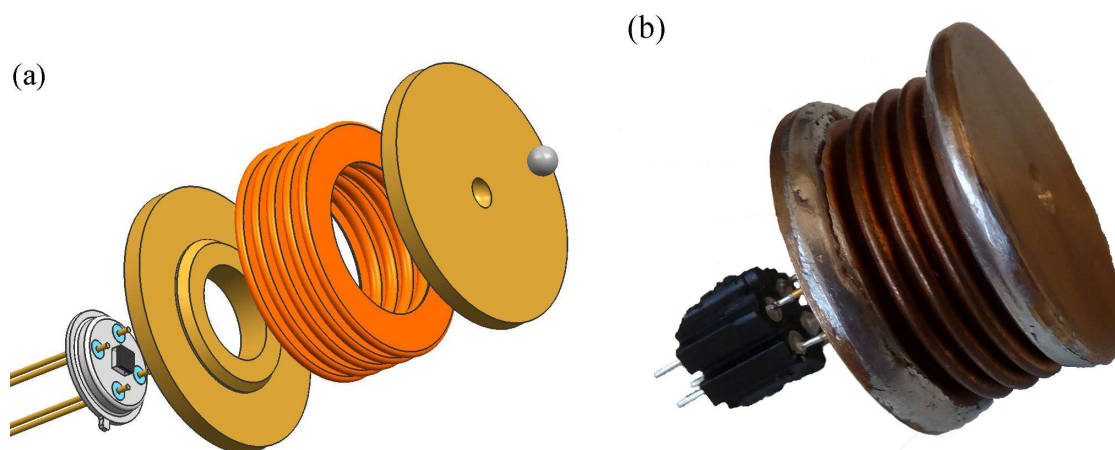


Slika 56: MS7204A\_Vz3 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.

Pri spremembi temperature za 30 °C (v območju 10 °C do 40 °C), se zmanjša občutljivost silicijeve senzorske tabletko med 6,5 % za MS7204A\_Vz1 in 6,3 % za MS7204A\_Vz2 in MS7204A\_Vz3.

#### 6.4.4 Izdelava vzorcev

Na podlagi izvedenih simulacij smo izbrali ustrezne komponente in naredili serijo 10 vzorcev. Ker smo vzorce izdelali v laboratoriju, so bili spoji komponent, ki sestavljajo ohišje hidravlične merilne celice, ročno spajkani. Posamezne komponente hidravlične merilne celice so prikazane na sliki 57a, sestavljene merilna celica pa je prikazana na sliki 57b, nameščena je tudi kontaktna letvica za lažjo izvedbo meritev. Pri izdelavi vzorcev smo uporabljali dva tipa silicijevega senzorja tlaka, MS7904A ima manjšo napako nelinearnosti, MS7204A pa je silicijev senzor tlaka, namenjen za uporabo v agresivnejših okoljih ter ima implementirano diodo, s pomočjo katere je mogoče meriti temperaturo silicijeve tabletko.



Slika 57: (a) Posamezne komponente in (b) izdelana hidravlična merilna celica.

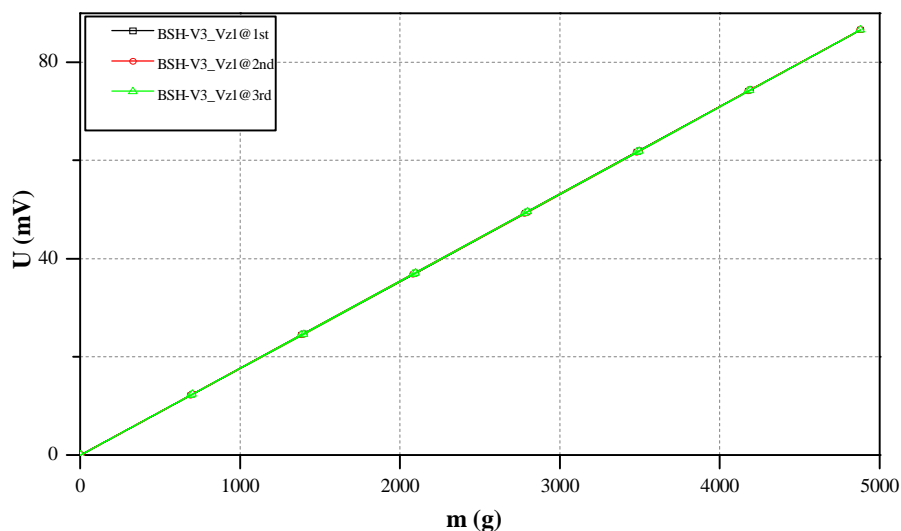
Hidravlična merilna celica je sestavljena na sledeč način. Zgornja in spodnja plošča sta narejeni iz CuSn12 palice premera 30 mm. V sredini spodnje plošče smo naredili izvrtino premera 7,7 mm, v katero kasneje namestimo podnožje ohišja TO-39 z nameščenim silicijevim senzorskim elementom tlaka. Dodatna odprtina s premerom 2 mm je namenjena polnjenju senzorja s silikonskim oljem. V sredini zgornje plošče je prostor za 2,4 mm jekla kroglico, namenjeno zmanjšanju stranskih obremenitev pri izvedbi meritev v testni pripravi..

Hidroformiran kovinski meh iz berilijevega bronu CuSn8 je vzet iz standardnega asortimana proizvajalca Hydroflex. Za naše vzorce smo uporabili takšnega z petimi rebri, z zunanjim premerom 19,1 mm, notranji premer 12,4 mm in deklarirano debelino stene 0,127 mm.

Notranjost hidravličnih merilne celice smo popolnoma napolnili z Wacker AK-100 silikonskim oljem. Vzorčke smo polnili z silikonskim oljem v vakuumski posodi, kjer smo z vakuumsko črpalko ustvarili absolutni tlak 0,01 Pa. Po polnjenju odprtino mehansko zatesnimo, da preprečimo iztekanje silikonskega olja.

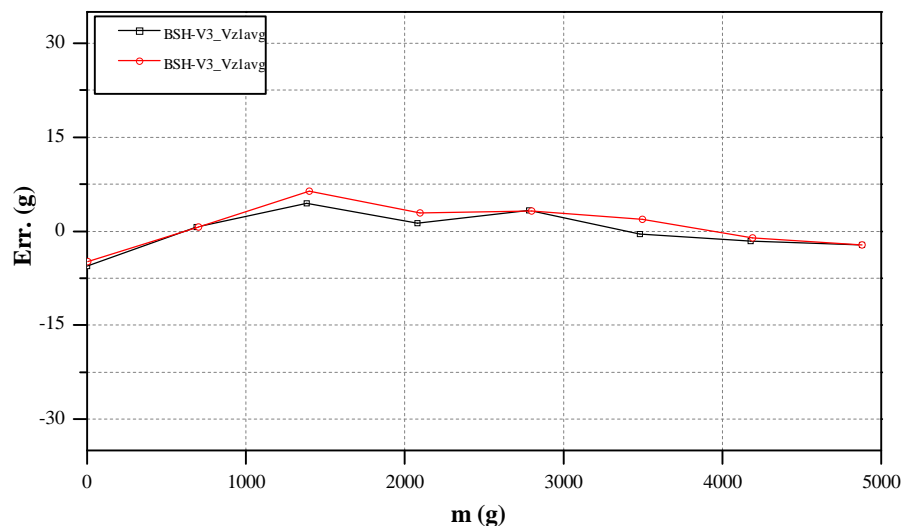
#### 6.4.5 Karakterizacija prototipov

Pri karakterizaciji smo izmerili najpomembnejše lastnosti realiziranih prototipov: to so napaka nelinearnost, napaka histereze, občutljivost in ponovljivost. Za napako nelinearnosti upoštevamo odstopanje od idealne prenosne funkcije, ki jo določimo po metodi najmanjših kvadratov. Občutljivost je razmerje med spremembo v odzivu merilne celice za podano spremembo vhodne veličine. Vsak vzorec najprej »treniramo« -- to pomeni, da hidravlično merilno celico 3-krat obremenimo in razbremenimo, vsak od teh ciklov pa traja 5 minut. Nato sledi meritev vzorca in sicer ga izmerimo trikrat zapored, kot je priporočeno v OIML R 60. Za izračun napake nelinearnosti in napake histereze vzamemo povprečje treh zaporedno izmerjenih meritev.



Slika 58: Vzorec BSH-V3\_Vz1, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.

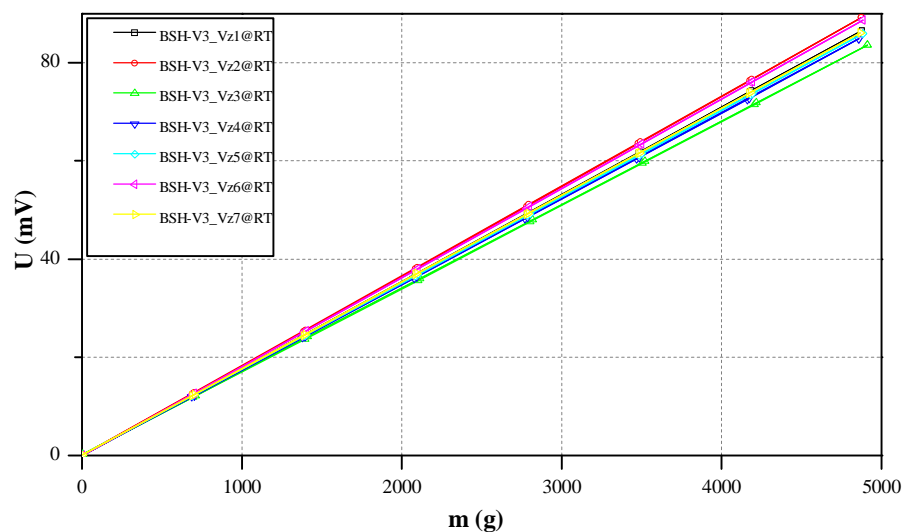
Na sliki 58 je so prikazane tipična karakteristika hidravlične merilne celice pri trikrat ponovljeni meritvi pri sobni temperaturi  $20,9 \pm 0,1$  °C. Na sliki 59 pa je grafično predstavljen potek napake nelinearnosti in histereze. Napaka nelinearnosti znaša  $\pm 7$  g, napaka histereze pa 3 g v maksimalnem merilnem območju – to je do 4,8 kg.



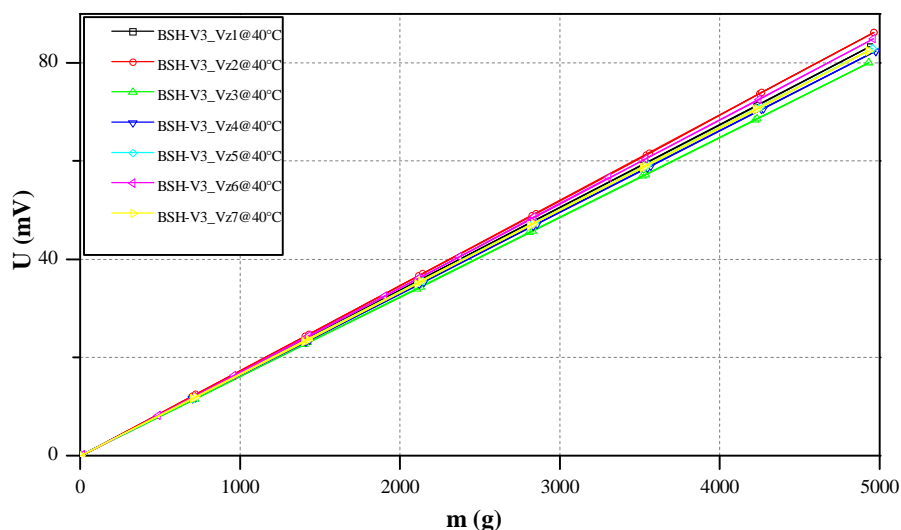
Slika 59: Vzorec BSH-V3\_Vz1, absolutna napaka izmerjene mase zaradi napaka nelinearnosti in histereze.

Na sliki 60 so prikazane karakteristike 7 vzorcev, ki smo jih izmerili pri sobni temperaturi. Prikazana karakteristika za vsak vzorec je povprečje treh zaporednih meritev.

Na sliki 61 pa so prikazani prikazane karakteristike 7 vzorcev, izmerjenih v klimatski okoljski komori pri 40 °C. Pri nobenem od izmerjenih vzorcev dejanska napaka v nobeni izmed merilnih točk ne preseže absolutne napake  $\pm 10$  g v maksimalnem merilnem območju.



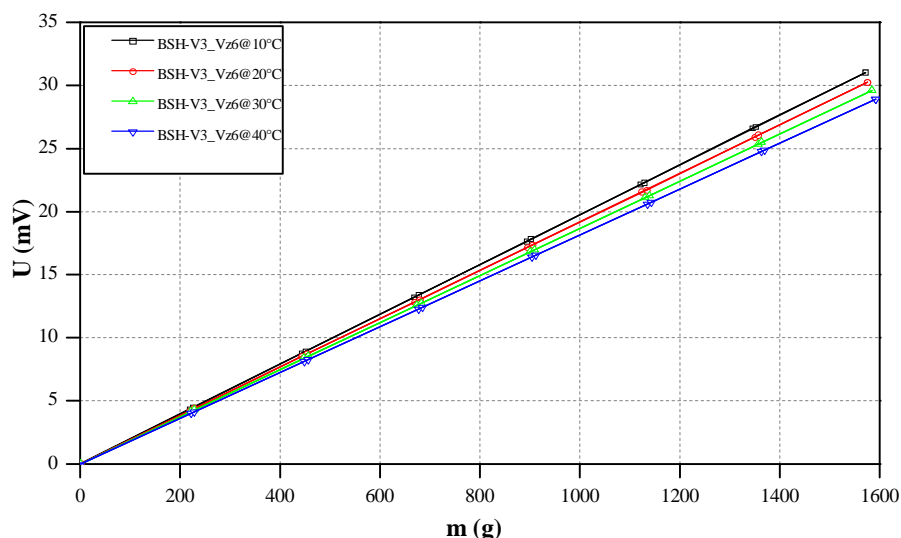
Slika 60: Vsi vzorci izmerjeni pri sobni temperaturi.



Slika 61: Vsi vzorci izmerjeni pri 40 °C v okoljski klimatski komori.

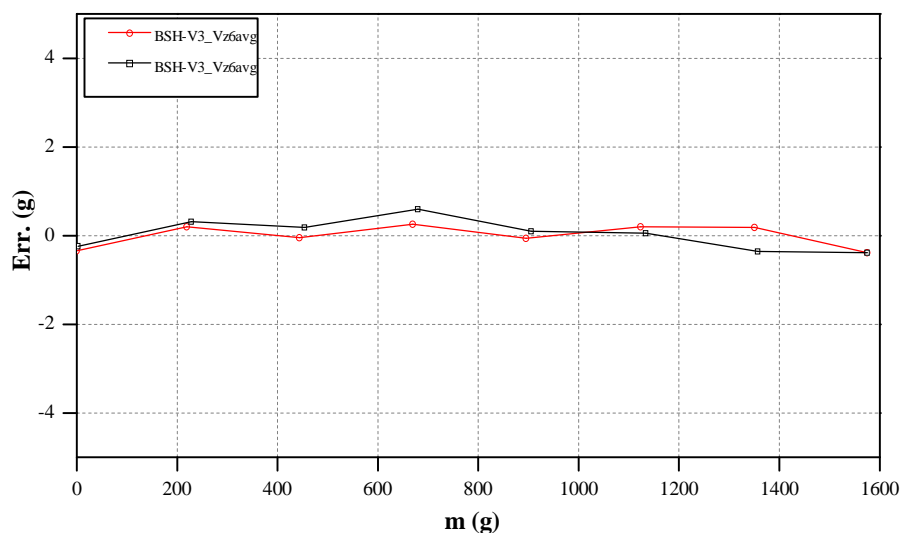
#### 6.4.6 Karakterizacija merilnih celic v dejanskem merilnem območju

Ker ima aparat maso 5 kg pomeni, da če to delimo na 4 senzorske elemente je vsak v osnovi obremenjen z izhodiščno obremenitvijo 1250 g. Maso ki jo želimo tehtati pa je 5 kg ki se porazdeli med te 4 merilne celice, zaokrožimo navzgor in predpostavimo da bo merilna celica obremenjena z 1600 g. Če predpostavimo, da bodo v aparatu vse hidravlične merilne celice simetrično obremenjene potem bo dejansko merilno območje znašalo od 1250 g do 2850 g. Na sliki spodaj je prikaz izmerjenih karakteristik za vzorec pri različnih temperaturah. Pri vsaki temperaturi je merilna celica trikrat izmerjena, v graf pa je vrisana povprečna vrednost treh zaporednih meritev. Pri zajemu podatkov meritev je programsko uporabljena funkcija tariranja za kontrolno merilno celico in ničliranja za testiran vzorec.



Slika 62: Vzorec BSH-V3\_Vz6 izmerjen pri temperaturi 10 °C, 20 °C, 30 °C in 40 °C.

Na sliki 63 je grafično predstavljen potek absolutne napake nelinearnosti in histereze za vzorec BSH-V3\_Vz6 pri 20 °C. Napaka nelinearnosti kot tudi histereze v dejanskem merilnem območju znaša pod  $\pm 1$  g. Potrebna funkcija temperaturne kompenzacije prenosnih funkcij pri teh meritvah še ni bila realizirana.

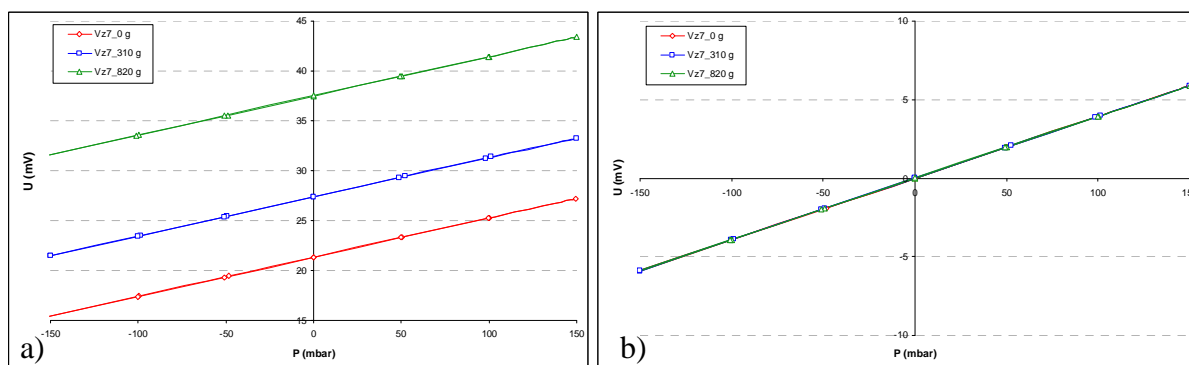


Slika 63: Prikaz napake nelinearnosti in histereze za vzorec BSH-V3\_Vz6 v dejanskem merilnem območju.

#### 6.4.7 Vpliv barometričnega tlaka

Vpliv zračnega tlaka na takšno izvedbo je večji kot pri klasičnih merilnih celicah. Meritev smo izvedli v hermetično zaprti komori prikazani na sliki 51, kjer lahko nastavljamo podtlak in nadtlak od -150 mbar do 150 mbar glede na okoliški zračni tlak. Zaradi omejitve prostora smo lahko obremenili največ z 8 malimi obremenilnimi diski to je do največ 820 g. Merili smo pri treh obremenitvah in sicer pri 0 g, 310 g in 820 g.

Na sliki 64a je prikazana izmerjena vrednost odziva pri različnih obremenitvah in različnih tlakih. V primeru, da izhodno vrednost hidravlične merilne celice ničliramo pred pričetkom meritve, se karakteristike izhodne vrednosti praktično pokrijejo ena preko druge. Napaka zaradi spremembe parametrov prenosne funkcije je minimalna in znaša manj kot  $\pm 0,5$  g absolutne napake, kar pa dejansko predstavlja napako merilnega sistema.



Slika 64: Povprečne vrednosti 3x izmerjenega vzorca pri obremenitvah 0 g, 310 g in 820 g in tlaku v preizkusni komori pri -150 mbar do 150 mbar glede na tlak okolice. Merjeno brez uporabe funkcije ničliranja (a) in z uporabo funkcije ničliranja (b)

Tabela 12: Parametri linearne prenosne funkcije določeni z metodo najmanjših kvadratov.

	BSH-V3_Vz7@0 g	BSH-V3_Vz7@310 g	BSH-V3_Vz7@820 g
$R^2=$	0,999994	0,999998	0,999999
$b=$	0,03936	0,03938	0,03937
$a=$	-0,0033	-0,0019	-0,0042

Vrednost  $R^2$  je enaka oziroma boljša kot 0,999994 kar pomeni da je praktično napaka nelinearnosti zanemarljiva oziroma v meji zmožnosti meritev. Vpliv barometričnega tlaka ni problematičen in ga z enostavno funkcijo ničliranja pred izvedbo meritve lahko v celoti odpravimo.

## 7 Zaključek

Zadani cilj doktorskega dela je bil razvoj majhnih, ustrezno konstruiranih hidravličnih merilnih celic, ki bodo dovolj robustne, zadovoljivo točne, z napako nelinearnosti ne večjo kot 0,7 %, temperaturno in časovno stabilne in kot take primerne za vgradnjo in uporabo v aparatih za namene tehtanja v merilnem območju do 5 kg. Doseganje navedenega cilja je pomembno s tržno razvojnega vidika za proizvajalca BSH Hišni aparati, d. o. o., pri iskanju ustrezne rešitve pa so bili doseženi tehtni raziskovalni rezultati predstavljeni v tej disertaciji.

V okviru doktorskega dela je bil narejen pregled objavljenih sorodnih rešitev, narejena je bila tudi primerjalna analiza obstoječih proizvodov na evropskem tržišču. Izdelana je bila analiza možnih tehnoloških rešitev, ki je pokazala, da je za izpolnitev danih zahtev najprimernejša hidravlična merilna celica.

Hidravlične merilne celice za merjenje mase z merilnim območjem do 50 kg v literaturi niso poznane, kot tudi ne konstrukcijski principi za manjše in poenostavljene (cenejše) izvedbe. Osnovne merilne karakteristike, kot npr. nelinearnost, histereza, časovna stabilnosti, dinamična odzivnost, vpliv staranja in utrujanja materiala pri izpostavljenosti dinamičnim obremenitvam v primeru vgradnje v podobne aparate v dostopni literaturi še niso bile obravnavane.

Med pomembnejše rezultate doktorskega dela izpostavljam:

- zasnovano modela merilne hidravlične celice, sestavljene iz standardnih, cenениh komponent, ki jih je možno dobiti na tržišču, ki zagotavlja ustrezno dovolj, majhno napako nelinearnosti in omogoča preliminarno študijo temperaturnega vpliva in analizo mehanskih lastnosti v odvisnosti od obremenitve,
- pridobljeno poglobljeno znanje (know-how) izdelave hidravlične merilne celice vključno z izbiro ustreznih komponent, materialov in postopkov, ki je rezultiralo v prototipni seriji merilnih celic z odličnimi karakteristikami, vključno z majhno napako nelinearnosti, majhno napako histereze in velikim izhodnim razponom,
- izvedbo hidravlične merilne celice za merilno območje do 5 kg, kar predstavlja pomembno razširitev spodnje meje merilnega območja hidravličnih merilnih celic, ki pa ima za posledico potencialno možnost njihove vgradnje v izdelke široke potrošnje. Posebej, ker takih merilnih celic ni na tržišču.

Pomembnost doseženih rešitev potrjuje objava članka v reviji *Sensors*, ki je uvrščena v zgornji kvartal faktorja vpliva. Opisane rešitve omogočajo izvedbo mreže merilnih celic za spremljanje dinamičnih lastnosti kuhinjskega aparata in njegov inteligentni nadzor.

V povezavi z raziskovalnimi dosežki sta bili vloženi in priznani dve mednarodni patentni prijavi, WO2010010144 (A1) in WO2010010125 (A1), ki se nanašata na izvedbo merilne celice, njihovo zgradbo in uporabo.



## 8 Zahvala

Najiskreneje se zahvaljujem prof. dr. Francu Novaku in prof. dr. Mariji Kosec za vso pomoč in usmerjanje pri mojem raziskovalnem delu.

Hvala doc. dr. Marku Hrovatu, Darku Belaviču, Marini Santo-Zarnik, Srečku Mačku in ostalim sodelavcem Odseka za elektronsko keramiko in Odseka za računalniške sisteme na Institutu "Jožef Stefan".

Zahvaljujem se podjetju BSH Hišni aparati, d. o. o. Nazarje, ki mi je omogočilo podiplomski študij. Tonetu Pogačarju za koristne napotke in razumevanje, kadar ni šlo vse po načrtih. Hvala sodelavcem v podjetju za njihovo vsestransko pomoč.

Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije je moj doktorski študij in raziskovanje finančno podprlo. Zato iskrena hvala.

Zahvala mojim najdražjim (Simoni, Sonji in Filipu) za njihovo podporo, spodbude in razumevanje zaradi številnih trenutkov, za katere so bili v času mojega raziskovanja prikrajšani.



## 9 Literatura in viri

1. International Bureau of Weights and Measures. *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*, 3rd edition: **2008**
2. International Bureau of Weights and Measures. *International Vocabulary of Terms in Legal Metrology (VIML)*: **2000**
3. Hönigsfeld Adamič, M., *Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja*. (Urad RS za standardizacijo in meroslovje, Ljubljana, 1999).
4. Fraden, J., *Handbook of modern sensors : physics, designs, and applications*. 3rd ed. (Springer, New York, 2004).
5. Amon, S.; Vrtacnik, D.; Resnik, D.; Aljancic, U.; Mozek, M., Introduction to sensors. *Informacije Midem-Journal of Microelectronics Electronic Components and Materials* **32**, 4 (2002).
6. Hing Kai, C., Rule-Based Data Tracking Scheme to Reduce the Effects of Creeping. *Sensors Journal, IEEE* **9**, 10 (2009).
7. Makabe, M.; Kohashi, T. Practical creep and hysteresis error compensation method for load cell, *SICE 2004 Annual Conference* (**2004**).
8. Makabe, M.; Kohashi, T. High accurate Creep compensation method for Load Cell, *SICE, 2007 Annual Conference* (**2007**).
9. OIML *International Organization of Legal Metrology*: OIML R 60: Metrological regulation for load cells, **2000**
10. WELMEC, *Evropsko združenje za legalno metrologijo*. <http://www.welmec.org/>, (november 2010).
11. Wikipedia, *Zemeljski težnostni pospešek*. [http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's\\_gravity](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth's_gravity) (junij 2010).
12. Lipták, B. G., *Instrument engineers' handbook. Volume 1, Process measurement and analysis*. 4th ed. (CRC Press, Boca Raton, Fla., 2003).
13. Hoffmann, K., *An introduction to measurements using strain gages*. (Hottinger Baldwin Messtechnik, Darmstadt, 1989).
14. Gopel, W.; Bau, H. H.; DeRoosij, N. F.; Kloeck, B., *Sensors : a comprehensive survey*. (VCH, Weinheim ; New York, 1994).
15. Muller, I.; de Brito, R. M.; Pereira, C. E.; Brusamarello, V., Load Cells in Force Sensing Analysis - Theory and a Novel Application. *Ieee Instrumentation & Measurement Magazine* **13**, 1 (2010).
16. Hrovat, M.; Belavic, D.; Bencan, A.; Holc, J.; Smetana, W.; Homolka, H.; Reicher, R., The characterization of thick-film resistors on dielectric-on-steel substrates for strain gage applications. *Sensors and Materials* **15**, 5 (2003).
17. Belavic, D., Debeloplastna tehnologija za senzorske aplikacije. *Informacije MIDEM* **33**, (2003).
18. Cattaneo, A.; Dell'acqua, R.; Dell'orto, G.; Pirozzi, L.; Canali, C. Practical Utilization of piezoresistive effect in thick film resistors: A low cost pressure sensor, *International Symposium on Microelectronics ISHM-80 Seattle*, (**1980**).
19. Linglin, B.; Bois, E. *Electronic Weighing scale*. SEB SA, WO 2008/009794,

## 24.1.2008.

20. Milhomme, D.; Pitaud, B.; Sarrazin, M. *Self-supporting weight sensor and scale incorporating sensors of this kind*. SEB S.A., US005847329, 08.12.1998.
21. Linglin, B.; Milhomme, D. *Weight sensor*. US20070186662, 16.8.2007.
22. Zarnik, M. *Preliminarne simulacije senzorja sile v nogici B.S.H. aparata*: IJS delovno poročilo, zaupno, 2005
23. Emerson\_Winslow, *Hidravlične merilne celice*. [http://www.emerywinslow.com/pro\\_customscales.html](http://www.emerywinslow.com/pro_customscales.html) (oktober 2010).
24. Kazerooni, H.; Evans, M. S.; Jones, J., Hydrostatic force sensor for robotic applications. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme* **119**, 1 (1997).
25. Zwijze, R. A. F.; Wiegerink, R. J.; Krijnen, G. J. M.; Lammerink, T. S. J.; Elwenspoek, M., Low creep and hysteresis load cell based on a force-to-fluid pressure transformation. *Sensors and Actuators a-Physical* **78**, 2-3 (1999).
26. Zwijze, R. A. F.; Wiegerink, R. J.; Lammerink, T. S. J.; Elwenspoek, M. Low creep and hysteresis load cell based on a force to liquid pressure transformation, *Dutch National Sensor Conference Delft, The Netherlands*, (1998).
27. Timoshenko, S.; Woinowsky-Krieger, S., *Theory of Plates and Shells*. 2nd ed. (McGraw-Hill Book Co.: New York, 1959).
28. Omega\_Press, *Transactions in measurement and control: Volume 3 - Force-related measurements*. (Putman Publishing Company, 1998).
29. Shieh, J.; Huber, J. E.; Fleck, N. A.; Ashby, M. F., The selection of sensors. *Progress in Materials Science* **46**, 3-4 (2001).
30. European, *Patent Office - online*. <http://ep.espacenet.com/> (december 2010).
31. Amsel, K.; Weller, A.; Koetterheinrich, K. *Food processor with weighing device*. Braun, EP0561259 (B1), 10.03.1996.
32. Goodrich-Meech, C.; Clark, S. *Food prepration arrangements*. Kenwood Limited, GB2440411 A, 23.01.2008.
33. Marriere, M. *Appliance for culinary preparation with weighing of the food*Ronic Industries. Ronic Industries, FR2651982 (A1), 18.9.1989.
34. Dorner, S. *Food processor with a mixing vessel and a drive mechanism for an agitator in the mixing vessel*. Vorwerk, US005799567A, 01.09.1998.
35. Geiger, P. *Food Processor*. BSG-schalttechnik GmbH, US005174403A, 29.12.1992.
36. Clark, S.; Goodrick-Meech, C. *Food processor arrangements*. Kenwood Limited, WO2007/091014 A2, 16.08.2007.
37. Leterrier, T.; Herrada, J. L.; beule, M.; Gerard, E. *Food preparation device equipped with means for detecting unbalance and for weighing*. SEB SA, EP1834560, 13.3.2007.
38. JIANGANG, G. H., C. *Food processor with electronic weighing scale*. Guangdong Xinbao Electrical EQ, CN201094087, 2008.
39. Zhiming, D. *A food treating apparatus with a weighing scale*. EP1685783, 05.7.2006.
40. Thackray, D. *Kitchen appliance having a housing and having an add-on unit which can be accommodated in the kitchen appliance and whose functionality is independent of the kitchen appliance*. Philips Corporation, US2002078834, 27.6.2002.
41. Pačnik, R.; Hrovat, M.; Kosec, M. *Točnost tehtnic vgrajenih v male gospodinjske aparate*: IJS delovno poročilo, 10360, zaupno, 2010
42. Analog\_Devices, *AD7799 Evaluation board*. [http://www.analog.com/static/imported-files/eval\\_boards/EVAL-AD7799.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/eval_boards/EVAL-AD7799.pdf) (november 2010).
43. Cool\_Muscle, *Users manual*.

- [http://en.kolektorindutec.com/sitedata/581/upload/File/Cool\\_Muscle\\_Users\\_Manual\\_new.pdf](http://en.kolektorindutec.com/sitedata/581/upload/File/Cool_Muscle_Users_Manual_new.pdf) (september 2010).
44. Ahlborn, *Force sensors*. <http://www.ahlborn.com/getfile.php?1247.pdf> (november 2009).
45. National\_Instruments, *NI USB-9237*. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/204069> (september 2010).
46. Bishop, R., *Learning with LabVIEW 8*. (Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, 2007).
47. Gorup, Ž., *Uvod v Labview*. (Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2006).
48. Travis, J., *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. 3rd ed. (Upper Saddle River, Prentice Hall, New York, 2007).
49. MG\_Chemical, *TSE399C - podatkovni list*. <http://www.mgchemicals.com/products/399.html#> (junij 2009).
50. Hydroflex, *Precision bellows & assembly catalog*. <http://www.hydroflex.co.uk/downloads.htm> (december 2010).
51. Moaveni, S., *Finite element analysis : theory and application with ANSYS*. 3rd ed. (Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2008).
52. Wacker, *Wacker AK-100 - podatkovni list*. <http://www.wacker.com/cms/en/products-markets/products/product.jsp?product=9493> (julij 2010).
53. Matweb, *Material property data*. <http://www.matweb.com/index.aspx> (avgust 2010).
54. Measurement\_Specialities, *MS7904A - podatkovni list*. <http://www.meas-spec.com> (junij 2010).
55. Measurement\_Specialities, *MS7204A - podatkovni list*. <http://www.meas-spec.com> (junij 2010).



## Izjava

Podpisani Roman Pačnik izjavljam, da:

- je bila predložena doktorska disertacija napisana samostojno na podlagi lastnih spoznanj in ob virih, ki so navedeni,  
pod mentorstvom prof. dr. Franca Novaka  
in somentorstvom prof. dr. Marije Kosec;

- predloženo delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev katerekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;

- sem osebno odgovoren za zagotovitev, da je predhodno avtorsko zaščiteno gradivo, uporabljeno v tem delu, uporabljeno pošteno in reproducirano s pisnim dovoljenjem lastnika avtorskih pravic;

- soglašam z javno dostopnostjo tega dela v specializiranih knjižnicah in na spletnih straneh MPŠ.

V Ljubljani, dne 17.01.2011

Podpis kandidata:

Podpis mentorjev:



## Kazalo slik

Slika 1: Splošna predstavitev - vhodno veličino $s$ (stimulus) senzor pretvori v izhodni signal $S$ .	14
Slika 2: Splošna predstavitev s podanimi mejami točnosti, za linearno (a) in nelinearno (b) prenosno funkcijo.	15
Slika 3: Prikazani trije različni možni načini linearne aproksimacija prenosne funkcije.	17
Slika 4: Prikazani napaka nelinearnosti in napaka histereze.	17
Slika 5: Napaka ponovljivosti, ki se pojavi pri dveh zaporednih kalibracijskih ciklih.	19
Slika 6: Grafičen prikaz nekaterih definicij. Z merilno celico dejansko merimo v območju med $D_{\min}$ in $D_{\max}$ .	20
Slika 7: Primer prikaza standardnih klasifikacij za merilno celico. Ostali podatki (točka 6) niso prikazani.	22
Slika 8: Težnostni pospešek $g$ v odvisnosti od geografske širine in nadmorske višine za posamezna večja mesta pa so izmerjene vrednosti gravitacijskega pospeška podane v tabeli 3.	24
Slika 9: Priporočen potek za testiranje merilnih celic, testna procedura po OIML R 60 – za vsako temperaturo. Grafično je pokazan potek obremenjevanja merilne celice v času izvedbe meritve.	25
Slika 10: Prikaz nekaj najbolj tipičnih izvedb merilnih celic s kovinskimi uporovnimi merilnimi lističi.	30
Slika 11: Merilna celica s senzorjem mehanskih deformacij, narejenim z debeloplastno tehnologijo.	32
Slika 12: Merilna celica aparata proizvajalca Krups. Na korundni podlagi sta natisnjena dva debeloplastna upora (dva črna pravokotnika). Korundna podlaga je nalepljena na kovinski nosilec.	32
Slika 13: Prerez hidravlične merilne celice z elastično deformabilno membrano	34
Slika 14: Prerez hidravlične merilne celice v popolnoma kovinski izvedbi.	35
Slika 15: Shematičen prikaz hidrostaične merilne celice (a) in izdelan vzorec (b).	36
Slika 16: Grafičen prikaz odziva hidravlične merilne celice za robotske aplikacije, [24].	36
Slika 17: Merilna celica z membrano (6) in kovinskim čepom (5), nameščenim na sredini membrane. S pomočjo senzorja (4) merimo tlak v hidravlični tekočini (2).	37
Slika 18: Ko merilno celico obremenimo s silo teže $F$ se le ta deformira.	37
Slika 19: Predlog izvedbe silicijeve hidravlične merilne celice.	39
Slika 20: Resolucija v odvisnosti od merilnega območja za značilne vrste merilnih celic.	41
Slika 21: Notranja konstrukcija aparata je na zunanje ohišje pritrjena preko dveh konzolnih nosilcev (39a, 39b), ki se pri obremenitvi elastično deformirata.	42
Slika 22: Kenwood-ov sistem z uporabo samo dveh merilnih celic (81, 82) (Multipro Libra).	43
Slika 23: V aparatu proizvajalca Krups merilne celice (15) poleg tehtanja izrabljajo tudi za nadzor stabilnosti aparata, [37].	43

Slika 24: Prikaz priprave za ročno dodajanje in odvzemanje obremenitve za karakterizacijo merilnih celic. ....	48
Slika 25: Razvojna kartica AD7799 (a) in programski vmesnik narejen s programskim paketom LabVIEW (b). ....	48
Slika 26: Prikaz načrtovane avtomatizirane priprave za karakterizacijo hidravličnih merilnih celic .....	49
Slika 27: Avtomatizirano merilno mesto za karakterizacijo hidravličnih merilnih celic za merjenje majhnih obremenitev. ....	50
Slika 28: Čelna plošča programa za avtomatično karakterizacijo hidravličnih merilnih celic.....	51
Slika 29: Blokovni diagram programa za avtomatično karakterizacijo hidravličnih merilnih celic. ....	52
Slika 30: Senzorja tlaka na keramičnem substratu (a) in delno sestavljen prototip hidravlične merilne celice (b). ....	55
Slika 31: Odziv vzorcev z različnima silikonskima zalivkama. ....	56
Slika 32: Meritev dejanske prenosne funkcije v štirih (a) in devetih merilnih točkah (b).....	56
Slika 33: Hidravlične merilne celice vgrajena v nogico aparata v primerjavi z obstoječo gumijasto nogico.....	57
Slika 34: Dno univerzalnega kuhinjskega aparata z vgrajenimi hidravličnimi merilnimi celicami, ki so označene (a) in aparat pripravljen za testne meritve (b). ....	57
Slika 35: Odziv posamezne hidravlične merilne celice v nogici aparata (a) in prikaz nelinearnosti vseh štirih (b). ....	58
Slika 36: Prikaz komponent hidravlične merilne celice pred sestavo.....	59
Slika 37: Shematski prikaz preseka hidravlične merilne celice (a) in realiziran vzorec (b). EPDM guma (1) je nabrizgan in vulkaniziran direktno na ohišje senzorja (2). Senzorski sklop (4) je nameščen na pokrov senzorja (5). Tesnilo (3) je nameščeno med ohišjem senzorja in pokrovom senzorja. ....	60
Slika 38: Vzorec BSH-V2_Vz1, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.....	61
Slika 39: Vzorec BSH-V2_Vz2, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.....	61
Slika 40: Vzorec BSH-V2_Vz3, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.....	61
Slika 41: Vzorec BSH-V2_Vz4, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja.....	62
Slika 42: Povprečne vrednost odziva 3x ponovljene meritve za vzorce BSH-V2_Vz1, BSH-V2_Vz2, BSH-V2_Vz3 in BSH-V2_Vz4. Vrisana je prenosna funkcija določena z metodo najmanjših kvadratov. ....	62
Slika 43: Prikaz odziva hidravlične merilne celice BSH-V2_Vz1 pri 50 zaporednih meritvah. ....	63
Slika 44: Eksplozijska risba, ki prikazuje sestav hidravlične merilne celice.....	64
Slika 45: Geometrija senzorja za merjenje sile v prerezu (a) in ¼ modela z izdelano mrežo (b).....	65
Slika 46: Primer poteka iterativnega reševanja in približevanja pravi vrednosti. Z rdečo je prikazana napaka dveh zaporednih iteracij.....	68
Slika 47: Tlak v fluidu hidravlične merilne celice pri različnih obremenitvah. Simulacija za 0,127 mm debelo steno kovinskega mehu. ....	69

Slika 48: (a) Porazdelitev ekvivalentnih (von Mises) napetosti v komponentah hidravlične merilne celice z 0,127 mm debelo steno hidroformiranega kovinskega mehu pri 30 °C in tlačni obremenitvi 35 N. Desno (b) pa je prikazana deformacija.....	69
Slika 49: Deformacija hidravlične merilne celice za debelini kovinskega mehu 0,127 mm in 0,15 mm pri različnih obremenitvah in temperaturah.....	71
Slika 50: Silicijev senzor tlaka MS7204A nameščen na podnožju TO-39 ohišja.....	72
Slika 51: Merilno okolje za karakterizacijo senzorskih elementov pred dokončno vgradnjo.....	72
Slika 52: Izhodne napetost silicijevih senzorjev tlaka MS7904A. Napake nelinearnosti in histereze so pri vseh karakteriziranih vzorcih pod deklariranimi tipičnimi vrednostmi, ki jih podaja proizvajalec. ....	73
Slika 53: Izhodne napetost silicijevih senzorjev tlaka v odvisnosti od temperature. ....	73
Slika 54: MS7204A_Vz1 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.....	74
Slika 55: MS7204A_Vz2 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.....	74
Slika 56: MS7204A_Vz3 izhodna napetost v odvisnosti od obremenitve in temperature.....	75
Slika 57: (a) Posamezne komponente in (b) izdelana hidravlična merilna celica. ....	75
Slika 58: Vzorec BSH-V3_Vz1, 3x ponovljena meritev obremenjevanja in razbremenjevanja. ....	76
Slika 59: Vzorec BSH-V3_Vz1, absolutna napaka izmerjene mase zaradi napaka nelinearnosti in histereze.....	77
Slika 60: Vsi vzorci izmerjeni pri sobni temperaturi.....	77
Slika 61: Vsi vzorci izmerjeni pri 40 °C v okoljski klimatski komori. ....	78
Slika 62: Vzorec BSH-V3_Vz6 izmerjen pri temperaturi 10 °C, 20 °C, 30 °C in 40 °C.....	78
Slika 63: Prikaz napake nelinearnosti in histereze za vzorec BSH-V3_Vz6 v dejanskem merilnem območju. ....	79
Slika 64: Povprečne vrednosti 3x izmerjenega vzorca pri obremenitvah 0 g, 310 g in 820 g in tlaku v preizkusni komori pri -150 mbar do 150 mbar glede na tlak okolice. Merjeno brez uporabe funkcije ničliranja (a) in z uporabo funkcije ničliranja (b).....	79



**Kazalo tabel**

Tabela 1: Maksimalno število kontrolnih intervalov merilne celice ( $n_{\max}$ ) glede na razred točnosti. ....	21
Tabela 2: Standardizirani simboli za označevanje dovoljene vrste obremenitev za merilno celico. ....	21
Tabela 3: Vrednost težnostnega pospeška $g$ v večjih svetovnih mestih [11]. ....	24
Tabela 4: Primerjava osnovnih značilnosti za uporabne merilne lističe različnih izvedb [17, 18] . ....	31
Tabela 5: Splošne značilnosti najbolj razširjenih tipov merilnih celic [28]. ....	40
Tabela 6: Nekateri izmed komercialno dostopnih aparatov s funkcijo tehtanja. Pri vseh so merilne celice vgrajene v podnožje aparata. Podatki izvirajo iz proizvajalčevih katalogov. ....	46
Tabela 7: Parametri linearne prenosne funkcije določene z metodo najmanjših kvadratov. ....	62
Tabela 8: Materialni podatki uporabljeni pri simulacijah hidravlične merilne celice [52, 53]. ....	66
Tabela 9: Parametri, ki jih potrebuje makro pri reševanju matematičnega modela z MKE. ....	67
Tabela 10: Simulirani rezultati za ekvivalentne (von Mises) napetosti in ekvivalenten relativen raztezek in deformacijo. Zapisane so maksimalne vrednosti. ....	70
Tabela 11: Tipične karakteristike za MS7904A in MS7204A silicijevo tlačno tabletko [54, 55]. ....	71
Tabela 12: Parametri linearne prenosne funkcije določeni z metodo najmanjših kvadratov. ....	79



## Priloge

Pačnik, R.; Novak, F., A High-Sensitivity Hydraulic Load Cell for Small Kitchen Appliances. *Sensors* **2010**, 10, (9), 8452-8465.

Pačnik, R.; Pogačar, T., Kitchen appliance with a scale device and method for operating a kitchen appliance : patentna prijava WO2010010125 (A1). München: European Patent Office, **2010**, Priložena naslovna stran.

Pačnik, R.; Pogačar, T., Kitchen appliance with a base unit having several feet : patentna prijava, WO 2010010144 (A1), München: European Patent Office, **2010**, Priložena naslovna stran

Article

## A High-Sensitivity Hydraulic Load Cell for Small Kitchen Appliances

Roman Pačnik <sup>1,\*</sup> and Franc Novak <sup>2</sup>

<sup>1</sup> BSH Hišni aparati d.o.o., Savinjska cesta 30, 3331 Nazarje, Slovenia

<sup>2</sup> Jožef Stefan Institute, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenia; E-Mail: franc.novak@ijs.si

\* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: roman.pacnik@bshg.com;  
Tel.: +386-1-4773-264; Fax: +386-1-2519-385.

Received: 13 July 2010; in revised form: 18 August 2010 / Accepted: 6 September 2010 /

Published: 9 September 2010

---

**Abstract:** In this paper we present a hydraulic load cell made from hydroformed metallic bellows. The load cell was designed for a small kitchen appliance with the weighing function integrated into the composite control and protection of the appliance. It is a simple, low-cost solution with small dimensions and represents an alternative to the existing hydraulic load cells in industrial use. A good non-linearity and a small hysteresis were achieved. The influence of temperature leads to an error of 7.5%, which can be compensated for by software to meet the requirements of the target application.

**Keywords:** Hydraulic load cell; FEM, sensor; weighing

---

### 1. Introduction

Load cells or force sensors are the heart of a weighing instrument. They are, in fact, force transducers that convert a load or a force into an electrical signal. The words “load” and “force” can be regarded as synonyms and are both used in industry and academia. There are various methods for measuring force [1]. However, among modern force sensors (load cells), by far the most commonly used method is to measure the strain produced in an elastic member by the unknown force. Typical representatives include strain-gauge-based load cells of various designs, *i.e.*, bending beam, shear beam, S-beam, canister, ring, button and others. In general, they cover a typical sensing range from 0.1 N to over  $10^6$  N and their inaccuracy over the full scale (FS) is 0.003% to 1% [2,3].

Occasionally, the method of balancing the force against an electromagnetically developed force is used. These types of load cells are used when the highest accuracy is demanded, e.g., scales in special accuracy classes for precise weighing and laboratory use. Also, the method of converting the force to a liquid pressure and measuring that pressure is used in specific applications. Hydraulic load cells are force-balance devices, measuring weight as a change in the pressure of the internal filling fluid. In a rolling-diaphragm-type hydraulic load cell, a load or force acting on a loading head is transferred to a piston that, in turn, compresses a filling fluid confined within an elastomeric diaphragm chamber. Generally, they cover the sensing range from 50 N up to  $5 \times 10^7$  N and their inaccuracy over the full scale (FS) can be as low as 0.25% [2-4]. They are mainly used in industrial environments since they are compact, robust and reliable, even in the most hostile environments. With proper design of the hydraulic load cell the construction can be simplified, the inaccuracy improved and the creeping effect reduced [5].

The results presented in this paper stem from the design of a small kitchen appliance with a weighing function integrated into a control loop in order to prevent unbalanced movement of the appliance during operation. In this particular case, the weighing should be appropriate for larger amounts (up to 5 kg) of ingredients, e.g., flour. The size and shape of the load cells should be small, similar to the existing rubber feet of the appliance. In our case, four load cells will be used and integrated into the bottom of the appliance. The integrated load cells are loaded with the mass of the appliance (the dead load) as well as with the mass being weighed. On occasions, this dead load may be even greater than the actual load to be measured. Consequently, load cells for a higher measuring range must be used. Another requirement related to the target application is that small, low-cost load cells with high electrical output signals are employed. The goal was to develop a hydraulic load cell with a simple construction to cut down the costs. In addition, the load cell should be composed of standard components that can be easily assembled using environment-friendly technologies.

In fact it was the lack of devices complying with these requirements that fostered the development of the load cell reported in this paper. In particular, the following key parameters were considered in the analysis of the existing products: dimensions, sensitivity, robustness vs. device size and cost. A set of possible candidates were included in the comparison study. The results are summarised in a table in Section 4.

In this paper the developed hydraulic load cell made from hydroformed metallic bellows is presented. It has been implemented in a series of prototypes, the characteristics of which fulfill the requirements in such a manner that with some minor additional software corrections the desired functionality can be achieved.

## **2. Finite Element Method (FEM) Modelling and Simulation**

### *2.1. Preliminary considerations*

As mentioned above, we deal with four load cells integrated into the bottom of an appliance that weighs about 5 kg (dead load). During normal use the appliance is likely to be subjected to different shock loads imposed by the user. Consequently, the required load-cell capacity should be designed for the expected dynamic shock impact and can be calculated [3] with the following expression:

$$C = 1.25K \frac{W_T + W_N}{N} = 1.25 \cdot 1.25 \frac{5 \text{ kg} + 5 \text{ kg}}{4} = 4.68 \text{ kg}$$

where:

$C$  = required load-cell capacity (kg)

$W_T$  = tare weight (dead load) (kg)

$W_N$  = net weight of projected vessel content (live load) (kg)

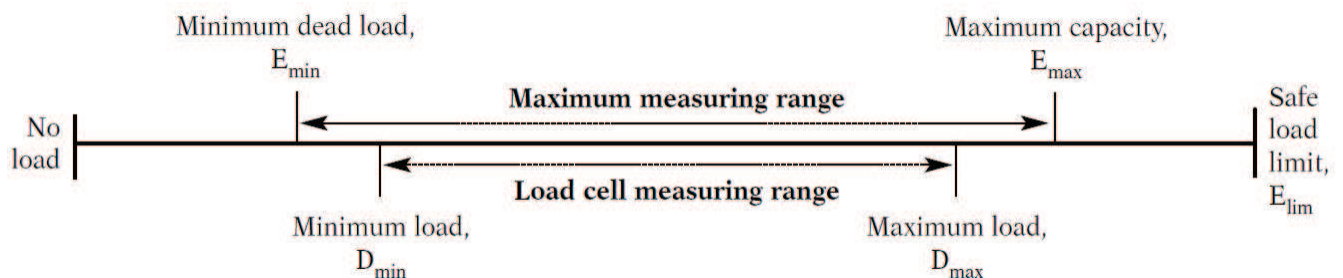
$N$  = number of load cells

$K$  = dynamic factor (in our case  $K=1.25$ )

For the purpose of the simulations the required load-cell capacity was taken to be 5 kg, which corresponds to the maximum capacity  $E_{\max}$ , as defined by recommendation of International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Métrologie Légale, OIML) [6]. The 5 kg of dead load divided by 4 (since we are dealing with 4 load cells) determines the minimum dead load  $E_{\min}$  (*i.e.*, 1.25 kg). The situation is illustrated in Figure 1. In our case, the minimum dead load is equal to the minimum load ( $E_{\min} = D_{\min}$ ). The actual load-cell measuring range will be from 1.25 kg to 2.85 kg. A total of 1.6 kg of live load per load cell is taken because of a slight non-symmetry in the appliance's construction.

In addition, the size of the load cell should not exceed 25 mm × 25 mm × 25 mm; the non-linearity and hysteresis error should not exceed 0.5%; and the sensitivity should be at least 5 times greater than in the case of a load cell with a strain-gauge element, *i.e.*, 2 mV/V on FS [7].

**Figure 1.** Graphical representation of the defined items.



## 2.2. FEM simulations of the hydraulic load cell

A hydraulic load cell complying with the above requirements was conceived and modelled with the FEM prior to assembly and testing the samples in order to select the most suitable components and their dimensions. The requirements of a simple construction and standard components that can be easily assembled led to the decision to use hydroformed metallic bellows, which are usually made of a variety of materials, like stainless steel, phosphor bronze, brass, and Monel (nickel-copper alloy). In our case phosphor bronze (CuSn8) was selected. This material has excellent resistance to corrosion and is relatively free from creep, drift and hysteresis, and can be easily soldered. The fluid that fills the internal space of the hydraulic load cell is in contact with all the metallic parts and the membrane of the silicon pressure sensor. Therefore, the fluid must have good dielectric properties; it must be chemically unreactive and non-abrasive; and it must have stable physical properties over a broad temperature range. A silicon fluid was chosen because of the direct contact with the unprotected silicon

pressure-sensor die, in spite of the fluid's high volumetric coefficient of thermal expansion (CTE). Table 1 contains the material data used in the FEM.

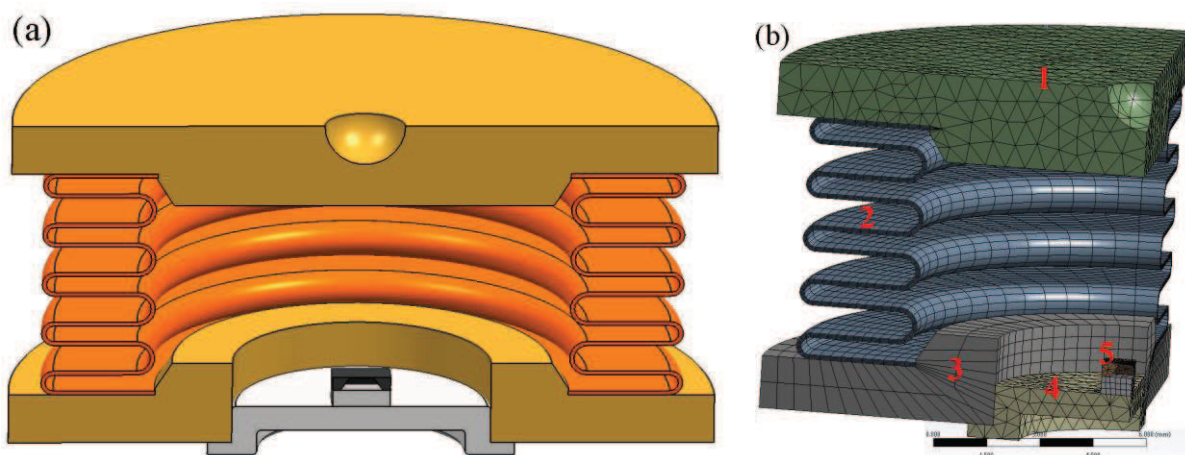
**Table 1.** Material data used in the simulations of the hydraulic load cell.

Material	$E$ (GPa)	$\gamma$	$\alpha (\times 10^{-6} / \text{K})$	$K$ (GPa)	$\beta (\times 10^{-4} / \text{K})$
CuSn12	105	0.3	18	/	/
CuSn8	110	0.34	18.2	/	/
Steel	200	0.3	10.4	/	/
Silicon	165	0.22	3.5	/	/
Silicone fluid	/	/	/	1	9.4

$E$ —Young's modulus;  $\gamma$ —Poisson's ratio;  $\alpha$ —linear coefficients of thermal expansion;  $K$ —bulk modulus;  $\beta$ —volumetric coefficients of thermal expansion.

A 3D model of the hydraulic load cell was created in the desired size and shape. A 3D cross-section view of the modelled hydraulic load sensor is shown in Figure 2a. Since the hydraulic load sensor is symmetrical a simulation can be made based on  $\frac{1}{4}$  of the complete sensor. The situation is shown in Figure 2b with the following parts indicated: 1—upper plate, 2—hydroformed metal bellows, 3—base plate of hydraulic load, 4—T039 housing, and 5—silicon pressure sensor.

**Figure 2.** (a) A 3D cross-section view of the modelled hydraulic load cell. (b) FEM model.



The most critical issue was to generate the mesh of finite elements, especially for the thin walls of the hydroformed metallic bellows. Some details that have no significant effect on the final result were simplified (*i.e.*, the leads of the TO-39) in order to reduce the simulation time. All the parts except the fluid were imported as a 3D model and meshed in the ANSYS Workbench environment. To create a high-quality mesh, an advanced method for meshing with imposed restrictions was used [8]. The hydroformed metallic bellows was meshed with four elements across the thickness of the wall. A  $\frac{1}{4}$  of such a model consists of 19,346 elements that have 66,331 nodes.

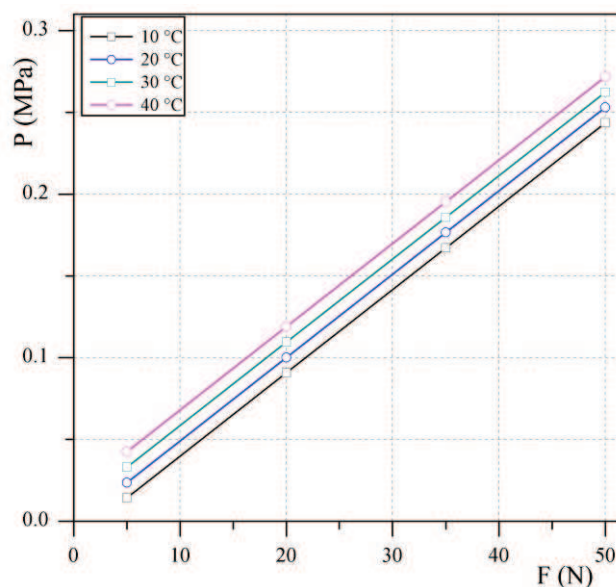
A complementary macro describing the behaviour of the sensor filled with fluid was implemented in the ANSYS Parametric Design Language (APDL). The corresponding mesh is created with the following input parameters: thermal expansion of the fluid, the bulk modulus and the known dimensions. The resulting model enables us to calculate the mechanical deformation of the hydraulic

load cell when a load is applied, the pressure change in the fluid and the output voltage of the developed sensor. Simulations of the mechanical loads at different temperatures can be performed.

We simulated three different hydroformed metal bellows made from beryllium copper CuSn8 with an outside diameter of 19.2 mm, an inside diameter 12.1 mm and wall thicknesses of 0.1 mm, 0.127 mm and 0.15 mm. Each model was loaded with a simulated 5 N, 20 N, 35 N and 50 N and at 10 °C, 20 °C, 30 °C and 40 °C. The FEM simulation results for the 0.127-mm-thick metal bellows are shown in Figure 3. The pressure inside the hydraulic load cell and its dependence on various loads at various temperatures is presented. The influence of the temperature on the internal offset pressure is significant. However, since the characteristic curves are parallel the effect of the temperature can be compensated for by software.

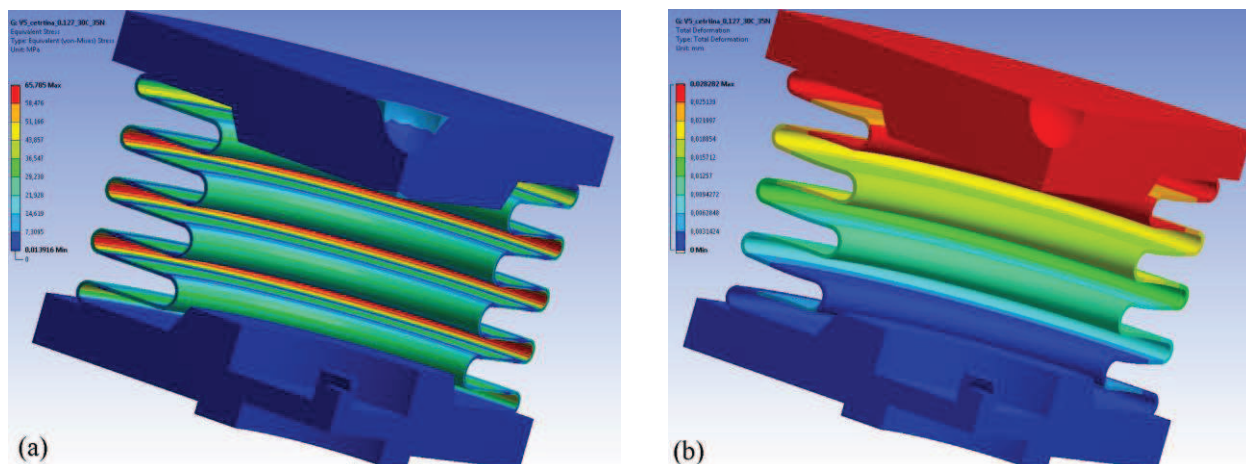
Simulations show that for the maximum measuring range ( $D_{\max}$ ) the internal pressure does not exceed 0.18 MPa. Since the hydroformed metal bellows is designed for 0.25 MPa a short loading at the maximum capacity  $E_{\max}$  is not expected to cause problems.

**Figure 3.** Pressure inside the hydraulic load cell at various loads and temperatures for a metallic bellows of wall thickness 0.127 mm.



The stress, the strain and the deformation in the components of the hydraulic load cell were also simulated; the results are presented in Table 2. The simulations show that the stress in the upper plate and the base plate of the hydraulic load cell can be neglected. This means that further optimization of these two elements is possible in order to save material and reduce costs. However, this optimisation remains as a subject for future research. The stress and strain in the hydroformed metal bellows are no greater than 108 MPa and  $0.98 \times 10^{-3}$  mm/mm, respectively. The hydraulic load cell is also very stiff, which means that a deformation of no more than 0.092 mm can be expected. In Figure 4a the equivalent Von Mises stress is presented for a selected metal bellows, and the deformation is shown in Figure 4b. Deformations at 10 °C and 20 °C are negative since the reference temperature is 22 °C.

**Figure 4.** (a) Stress on the components of the hydraulic load cell at 30 °C and a 35 N compressive forces, with a 0.127-mm-thick wall for the hydroformed bellows, (b) and the corresponding deformation.



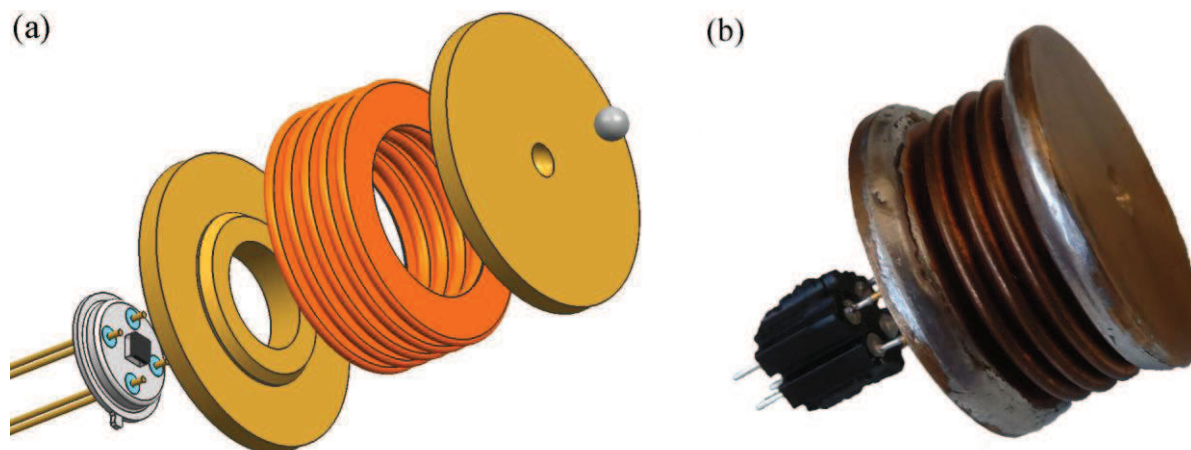
**Table 2.** Simulated data for the von Mises stress, von Mises strain and the total deformation.

F (N)	T (°C)	Stress (MPa)	Strain (mm/mm)	Deformation (mm)
5	10	30.4	2.76E-04	-6.41E-02
20	10	53.0	4.82E-04	-7.01E-02
35	10	75.6	6.88E-04	-7.61E-02
50	10	98.7	8.97E-04	-7.32E-02
5	20	11.3	1.02E-04	-1.22E-02
20	20	34.3	2.77E-04	-1.89E-02
35	20	57.4	5.21E-04	-2.56E-02
50	20	80.5	7.32E-04	-3.25E-02
5	30	25.5	2.31E-04	3.95E-02
20	30	45.1	4.10E-04	3.39E-02
35	30	65.8	5.89E-04	2.83E-02
50	30	84.5	7.68E-04	2.35E-02
5	40	49.2	4.48E-04	9.15E-02
20	40	68.9	6.26E-04	8.58E-02
35	40	88.7	8.06E-04	8.06E-02
50	40	108.0	9.83E-04	7.46E-02

### 3. Prototypes of the Hydraulic Load Cell

#### 3.1. Implementation of the prototypes

Based on the performed simulations, a series of prototypes was implemented. In the prototype phase, the metallic parts were hand soldered. The components of the hydraulic load cell are presented in Figure 5a and a sample photograph of the implemented hydraulic load cell is presented in Figure 5b.

**Figure 5.** (a) Components of the load-cell assembly, and (b) implemented hydraulic load cell.

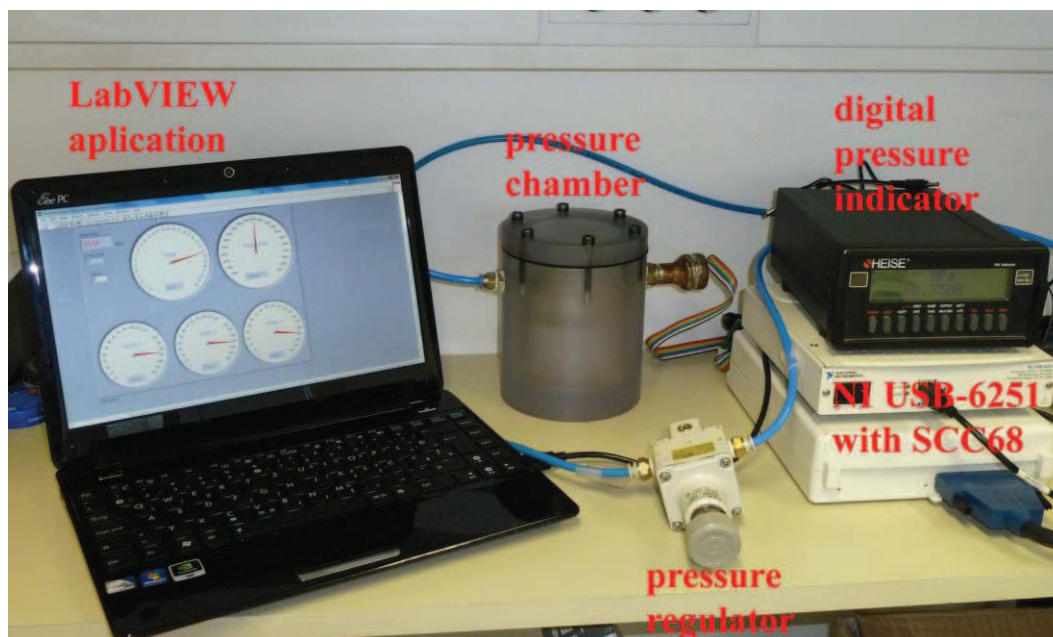
A 0.4 MPa absolute silicon pressure-sensor die MS7904A from Intersema Sensoric was selected as the sensing device for measuring the pressure of the fluid inside the hydraulic load cell. Some of the typical characteristics of this silicon pressure-sensor die [9] are shown in Table 3.

**Table 3.** Some typical characteristics of the MS7904A silicon pressure sensor die.

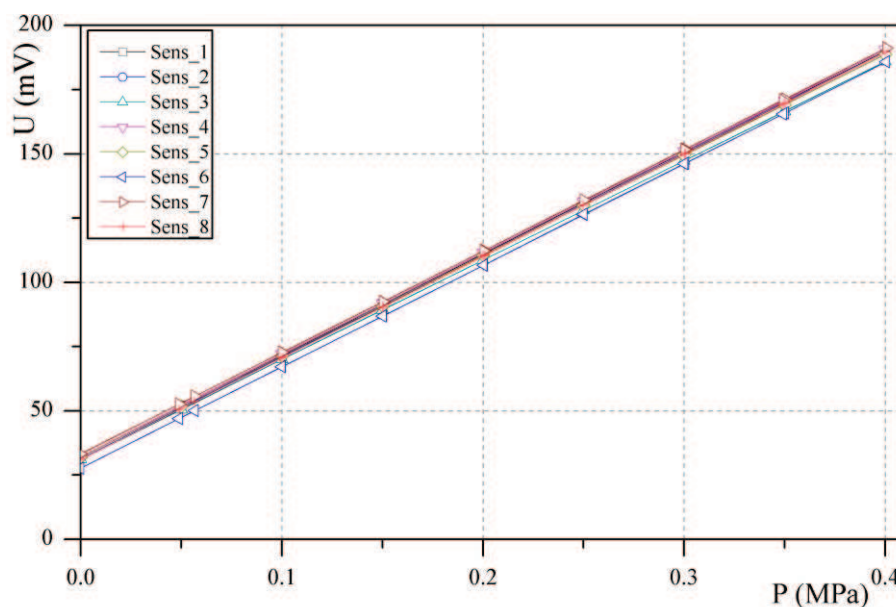
Parameter	Min	Typ	Max
Operating pressure (MPa)	0		0.4
Operating temperature range (°C)	−40		125
Bridge resistance (kΩ)	3.0	3.4	3.8
Full-scale span (FS) (mV)	120	150	180
Zero pressure offset (mV)	−40	0	40
Linearity (% FS)		±0.05	±0.15
Hysteresis (% FS)		±0.05	±0.15
Temperature coefficient of offset (μV/°C)	−80		+80

The silicon pressure-sensor element with dimensions of 1.58 mm × 1.72 mm × 0.91 mm was glued and bonded onto a TO-39 transistor header. To associate the measurements and the simulation results, each silicon pressure sensor die bonded on the TO-39 housing was characterized prior to the assembly of the hydraulic load cell. The pressure sensors were submerged in silicon oil and the output voltage over the entire pressure range was measured in a pressure chamber. Using the pressure regulator (SMC IR 2000-F02) and the digital pressure indicator (HEISE PM) the desired pressure was adjusted. The measuring environment is shown in Figure 6. The output voltage *versus* the applied pressure for a 5 V supply to the silicon pressure sensor is presented in Figure 7. The average value of the offset output voltages was 30.2 mV and the calculated sensitivity for the sensors was about 392.93 mV/MPa. The analysis of the measurements shows that the non-linearity and the hysteresis errors are in the declared range specified by the producer.

**Figure 6.** Measuring environment for the characterization of the pressure-sensor elements.



**Figure 7.** Output voltage of the pressure-sensor elements for a 5 V supply.



The hydraulic load cell was assembled as follows. The upper plate and the base plate were machined from the CuSn12 phosphor bronze rod. In the centre of the base plate a hole of 7.7 mm was drilled, into which the TO-39 transistor header with the pressure-sensor element was fitted. An additional hole of 2 mm diameter was employed in order to be able to fill the hydraulic load cell with fluid. In the centre of the upper plate there is a place for a 2.4 mm steel ball. In this way, the influence of side loading is minimized. A hydroformed metallic bellows made from beryllium copper CuSn8 was used. The metallic bellows was taken from the standard product range of the producer Hydeoflex. The bellows consist of five convolutions with an outer diameter of 19.1 mm, an inner diameter of 12.4 mm and declared wall thickness of 0.127 mm.

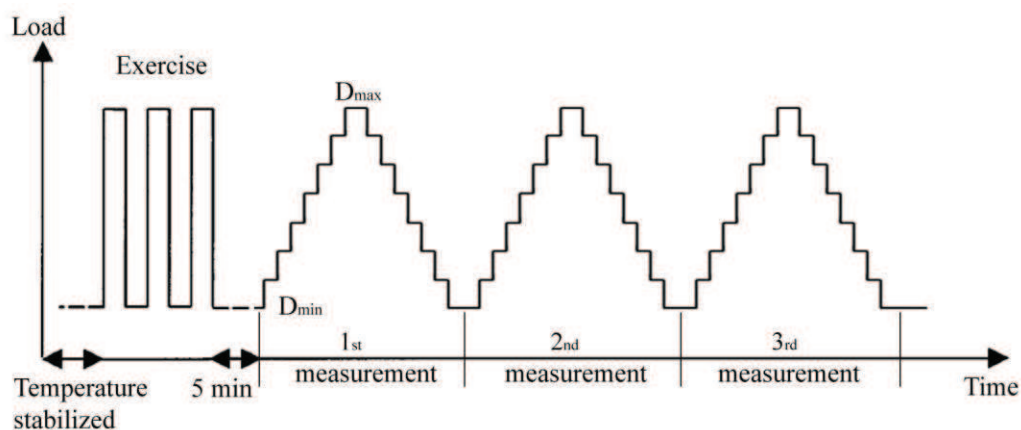
The interior of the hydraulic load cell was completely filled with Wacker AK-100 silicon oil. To prevent air bubbles, the samples were filled in a vacuum chamber where an absolute pressure of 0.01 Pa was established. At the end of the filling process the hole in the base plate was sealed to prevent any leakage of fluid from the hydraulic load cell. An additional pin connector for attaching a measurement system is soldered onto the pins of the TO-39 transistor header.

### 3.2. Characterization of the prototypes

The important characteristics of the hydraulic load cells in the produced prototypes, such as the non-linearity, the hysteresis error, the sensitivity and the repeatability, were measured. The above terms will now be described in more detail. Non-linearity is the deviation from a straight line for the increasing output of the sensor signal curve. For this benchmarking, a linear approximation between the first and the last measured points was taken. The hysteresis error is defined as the difference between the load-cell readings for the same applied load: one reading obtained by increasing the load from the minimum load and the other by decreasing the load from the maximum load. The sensitivity is the ratio of the change in the response (output) of a load cell to the corresponding change in the stimulus (applied load). The repeatability is the ability of the load cell to provide successive results that are in agreement when the same load is applied several times and applied in the same manner on the force sensor under constant test conditions.

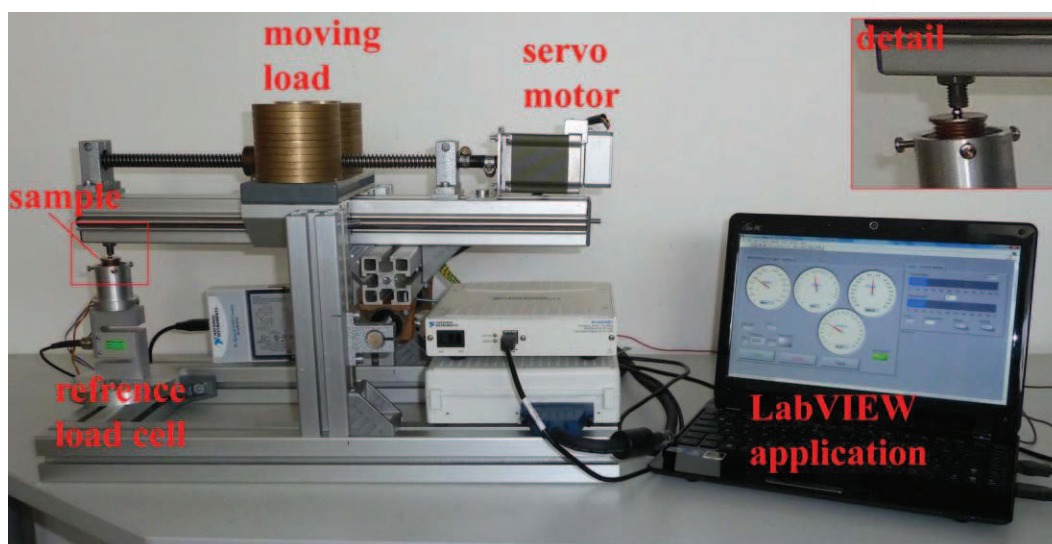
The samples were characterized at 10 °C, 20 °C, 30°C and 40 °C. The measurements were made according to the OIML recommendation [6]. A test sequence with the so-called exercise procedure before the measurement is shown in Figure 8. After temperature stabilization, the load cell was exercised by applying the maximum test load  $D_{\max}$  three times, and then returning to the minimum test load  $D_{\min}$  after each load application. Each sample was measured three times in a row, 5 minutes after the exercise procedure. Increasing loads were applied from the minimum test load  $D_{\min}$  to the maximum test load  $D_{\max}$ , and then back to  $D_{\min}$ . The measurement of the sensor output voltage was made 10 seconds after applying the load at each of the 8 test points for increasing and decreasing test loads. The average values of three measurements were calculated and processed in subsequent calculations.

**Figure 8.** Test sequence for each temperature.



To achieve more accurate and repeatable tests, a special measurement device for characterising the hydraulic load cell (shown in Figure 9) was built. The whole procedure for the exercise and the measurements of the test samples was controlled and measured in the LabVIEW environment. The load on the linear slide is moved back and forth by a servo motor; this then creates the load on the tested sample, which is placed on a special holder. A calibrated reference load cell is used for measuring the actual load on the tested sample. National Instruments data-acquisition cards (DAQ) were used: a 24-bit NI USB-9327 for the reference load cell and a 16-bit NI USB-6251 for measuring the hydraulic load cell. A WEISS WK1-180 climate chamber was used for the measurements in the controlled temperature environment. During the measurements the measurement system, except for the DAQ cards and the portable computer, was placed in a climatically controlled chamber. During the measurement of the non-linearity and hysteresis, the compressor and the ventilator of this chamber were switched off to reduce the influence of vibrations on the measurement.

**Figure 9.** Measurement system for characterization of the hydraulic load cells. A detail of the test sample on the special holder is shown in the top-right-hand corner.



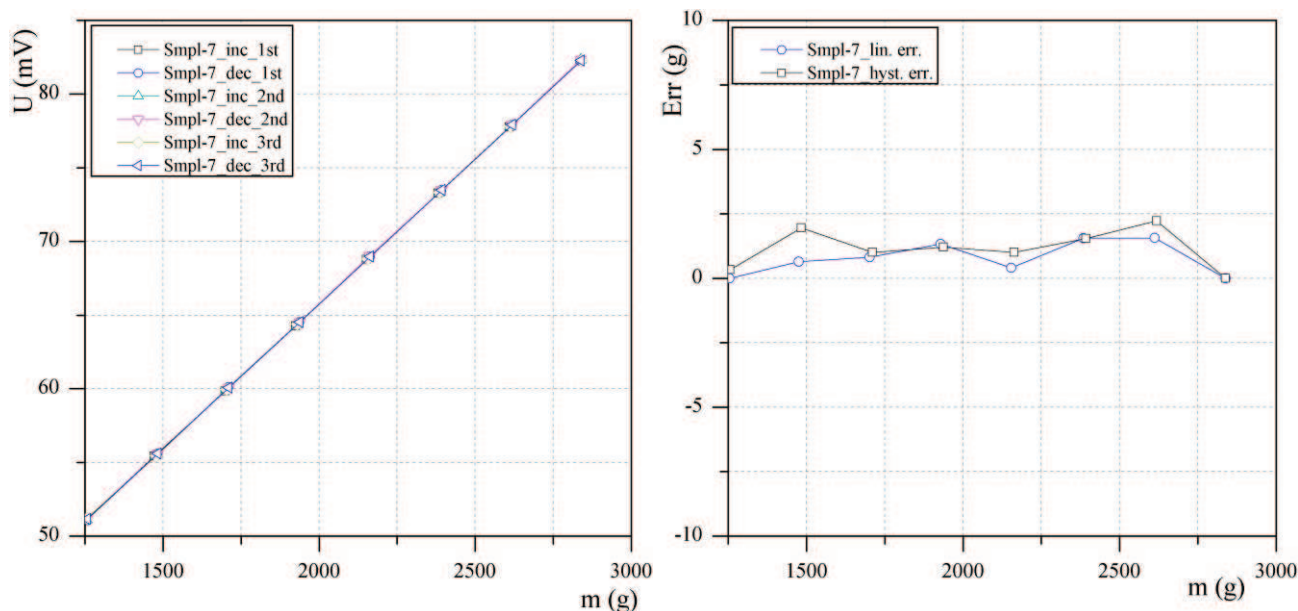
The measurements were performed in such a way that the target environment was simulated. Four hydraulic load cells were placed at the bottom of the appliance and loaded with the weight of the appliance. The hydraulic load cell was loaded with the minimum load ( $D_{\min}$ ) of 1.25 kg. The load cell's measuring range is 1.6 kg, which means that the maximum load ( $D_{\max}$ ) is 2.85 kg. In the above measurement configuration, the measurements parameters can be easily adjusted using the software.

#### 4. Results and Discussion

Figure 10a presents typical results for samples measured three times. Sample 7 was measured three times in a row in a temperature chamber at 20 °C for increasing and decreasing load. The resulting measurements are close to each other so that the six plots nearly coincide and cannot be distinguished in the figure. In Figure 10b the average deviations of the three measurements from the ideally linear response of the sensor are shown. As can be seen from the diagram, the absolute error does not exceed 3 grams (0.3%) and the hysteresis error is about 1 gram (0.2%). Other samples exhibited

similar characteristics. The hysteresis error is small, and this can be reduced by using similar methods to those used in the strain-gauge load cells [10].

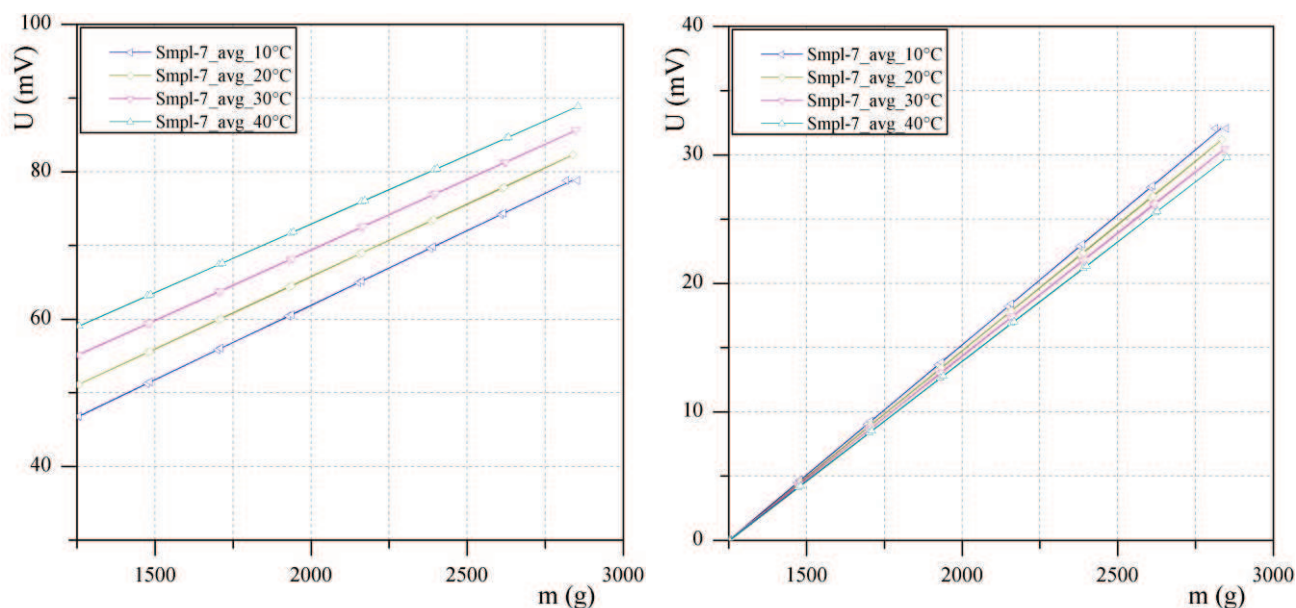
**Figure 10.** (a) Output voltage *versus* mechanical load of the sensor—three times repeated measurement and (b) non-linearity error and hysteresis error.



The samples were characterized at different temperatures, *i.e.*, 10 °C, 20 °C, 30 and 40 °C. The average values of the three measurements for each temperature are shown in Figure 11a. As expected from the FEM simulations, the temperature has an influence on the offset of the output curve. However, different offsets can be easily compensated for by using the tare function. Nevertheless, a slight problem remains. Figure 11b shows the output curves compensated for by the tare function. As can be seen, the curves deviate at higher loads. This means that an error of 2.2 mV at  $D_{\max}$  can be expected, which represents an approximately 7.5% error over the entire temperature range of 30 °C. Such a strong temperature dependence must be compensated for in order to reduce the final error to the desired level. Preliminary estimations show that the temperature error can be reduced by software compensation. In this respect, pressure sensor dye with integrated temperature element can be used for measuring pressure and temperature.

The comparison of the designed prototype with other load cell candidates for the target application is given in Table 4. Typical representatives of different types of load cells were considered. Conventional strain-gauge based load-cells with double bending spring element exhibit small non-linearity and hysteresis error. However, their sensitivity is low and even the cost may prove to be prohibitive for the target application. In addition, oversized dimensions impose restrictions on miniaturization of the target kitchen appliance. Thick-film based load cells have better sensitivity and acceptable price but still impose problems due to their size. Silicon based load cells have high sensitivity and desired dimensions but their maximum capacity is too low. Furthermore, their price is too high (*i.e.*, the four load cells would cost more than the appliance is worth).

**Figure 11.** (a) Output voltage *versus* mechanical load of the sensor at different temperatures and (b) the same results using the tare function.



In general, none of the compared products sufficiently fulfils the requirements which fostered the development of the reported hydraulic load cell. The resulting load cell is composed of standard machine parts and its dimensions allow it to be integrated in the feet of the appliance. Its small dimension, low cost and relatively high sensitivity offer an attractive alternative to the devices currently used in similar applications. As regards robustness, its safe load limit is comparable to the other load cells in Table 4.

**Table 4.** comparison with other load cell candidates for the target application.

	Strain-gauge based load cell	Thick-film strain-gauge load cell	Silicon based load cell	Hydraulic load cell
Device	K-DFTA 5KGVOR3-1	Laboratory sample	FSS 1550	Prototype
Max. capacity ( $E_{max}$ ) (kg)	5	5	1,5	5
Size (L×W×H) (mm)	60 × 10 × 6	80 × 13 × 12	10 × 6 × 4	Φ21 × 10
Input/output resistance (Ω)	350	1300	5,000	3500
Non-linearity error (% of FS)	±0.05	±0.2	±1.5	±0.3
Hysteresis error (% of FS)	±0.05	±0.2	/	±0.2
FS Sensitivity (mV/V)	1	1.4	36	10
Offset (mV/V)	±1	±4	±15	±60
Price	mid	low	high	low

## 5. Conclusions

In this paper a hydraulic load cell of simple construction for measuring small loads is presented. Particular care was taken to design the load cell with standard components. In addition, design-for-manufacturing issues were also of prime concern. The high response of the output voltage

of the developed device ensures good noise immunity and gives it an advantage over conventional strain-gauge load cells. Also additional improvements are possible [11]. The main characteristics were measured in accordance with the OIML recommendation, and the obtained results fulfil the requirements imposed by the target application. As shown in Table 4, the developed load cell exhibits small dimensions, low hysteresis and nonlinearity error, high sensitivity and acceptable production cost, while other candidate products proved inadequate in some respects (*i.e.*, desired technical parameters and/or price).

In the future we plan to further decrease the influence of temperature on the measurement characteristics by using a fluid with a lower TCE. In this respect, various mixtures of fluids (*i.e.*, [12]) are currently being investigated. Furthermore, the remaining error will be reduced by employing software compensation. However, in order to do this, the temperature within the sensor must be known. This will require the use of a silicon pressure-sensor die with an integrated temperature-sensing element [13].

### Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Ministry of Higher Education, Science and Technology for financial support within the grant Young Researcher from Industry (3211-05-000526). The authors gratefully acknowledge Marija Kosec and Marko Hrovat (Jožef Stefan Institute) for their help in experimental work and useful discussions.

### References and Notes

1. Fraden, J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 3rd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2004; pp. 323-326.
2. Shieh, J.; Huber, J.E.; Fleck, N.A.; Ashby, M.F. The selection of sensors. *Prog. Mater. Sci.* **2001**, *46*, 461-504.
3. Lipták, B.G. *Instrument Engineers' Handbook. Volume 1, Process Measurement and Analysis*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003; pp. 1101-1117.
4. *Transactions in Measurements and Control—Force-Related Measurements*; OMEGA Press: Artarmon, Australia, 1998. Available online: [http://www.omega.com/literature/transactions/Transactions\\_Vol\\_III.pdf](http://www.omega.com/literature/transactions/Transactions_Vol_III.pdf) (accessed on 12 May 2010).
5. Zwijze, R.A.F.; Wiegerink, R.J.; Krijnen, G.J.M.; Lammerink, T.S.J.; Elwenspoek, M. Low creep and hysteresis load cell based on a force-to-fluid pressure transformation. *Sens. Actuator. A* **1999**, *78*, 74-80.
6. International Organisation of Legal Metrology. OIML R60: Metrological Regulation for Load Cells, OIML, 2000. Available online: <http://www.oiml.org/publications/R/R060-e00.pdf> (accessed on 15 March 2010)
7. Hoffmann, K. *An Introduction to Measurements Using Strain Gages*; Hottinger Baldwin Messtechnik: Darmstadt, Germany, 1989.
8. Moaveni, S. *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*, 3rd ed.; Pearson Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2008; pp. 353-383, pp. 776-800.

9. Measurements specialties. Available online: [http://www.meas-spec.com/product/t\\_product.aspx?id=6769#](http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=6769#) (accessed on 15 March 2010).
10. Makabe, M.; Kohashi, T. Practical creep and hysteresis error compensation method for load cell, In *Proceedings of the SICE Annual Conference*, Sapporo, Japan, 4–6 August 2004.
11. Hernandez, W. Improving the response of a load cell by using optimal filtering. *Sensors* **2006**, *6*, 697-711.
12. Stratton, T.G. Low TCE Fill Fluid for Barrier Diaphragm Pressure Sensor. *U.S. Patent Appl.*, 2004187586, 26 April 2005.
13. Measurements specialties. Available online: [http://www.meas-spec.com/product/t\\_product.aspx?id=6751](http://www.meas-spec.com/product/t_product.aspx?id=6751) (accessed on 20 May 2010).

© 2010 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
28. Januar 2010 (28.01.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2010/010125 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
A47J 43/046 (2006.01) A47J 43/08 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/059436
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
22. Juli 2009 (22.07.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2008 040 743.7 25. Juli 2008 (25.07.2008) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **BSH BOSCH UND SIEMENS HAUSGERÄTE GMBH** [DE/DE]; Carl-Wery-Str. 34, 81739 München (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **PACNIK, Roman** [SI/SI]; Smarno 162a, 2383 Smartno pri Slovenj Gradcu (SI). **POGACAR, Toni** [SI/SI]; Ob rimski nekropoli 50, 3311 Sempeter (SI).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: **BSH BOSCH UND SIEMENS HAUSGERÄTE GMBH**; 83 01 01, 81701 München (DE).

- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

- (54) Title: KITCHEN APPLIANCE WITH A SCALE DEVICE AND METHOD FOR OPERATING A KITCHEN APPLIANCE
- (54) Bezeichnung: KÜCHENMASCHINE MIT EINER WÄGEEINRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER KÜCHENMASCHINE

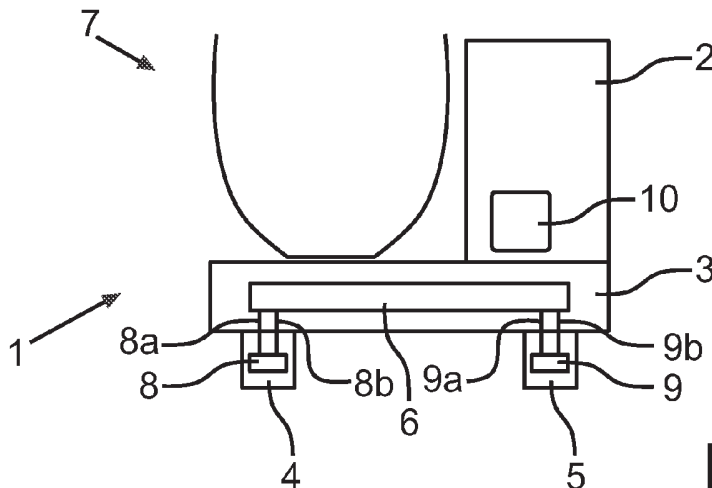


Fig.

(57) Abstract: The invention relates to a kitchen machine comprising a base part (3) made up of a plurality of feet (4, 5), a container (7) that can be attached to the base part for receiving food, and a scale device (6) with a plurality of sensors (8, 9) for determining the weight of at least the container (7), wherein the scale device (6) is adapted to detect out of balance information regarding the container (7) at least in the food preparation phase in the container (7). The invention further relates to a method for operating a kitchen appliance.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Küchenmaschine mit einem mit mehreren Füßen (4, 5) ausgebildeten Basis- teil (3), an welchem ein Behälter (7) zur Aufnahme von Lebensmitteln anbringbar ist, und einer

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/010125 A1

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
28. Januar 2010 (28.01.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2010/010144 A1**

- (51) Internationale Patentklassifikation:  
A47J 43/04 (2006.01) G01G 5/04 (2006.01)
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/059484
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
23. Juli 2009 (23.07.2009)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
10 2008 040 741.0 25. Juli 2008 (25.07.2008) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): BSH BOSCH UND SIEMENS HAUSGERÄTE GMBH [DE/DE]; Carl-Wery-Str. 34, 81739 München (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): PACNIK, Roman [SI/SI]; Smarno 162a, 2383 Smartno pri Slovenj Gradcu (SI).  
POGACAR, Toni [SI/SI]; Ob rimski nekropoli 50, 3311 Sempeter (SI).
- (74) Gemeinsamer Vertreter: BSH BOSCH UND SIEMENS HAUSGERÄTE GMBH; 83 01 01, 81701 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: KITCHEN APPLIANCE WITH A BASE UNIT HAVING SEVERAL FEET

(54) Bezeichnung: KÜCHENMASCHINE MIT EINEM MIT MEHREREN FÜSSEN AUSGEBILDETEM BASISTEIL

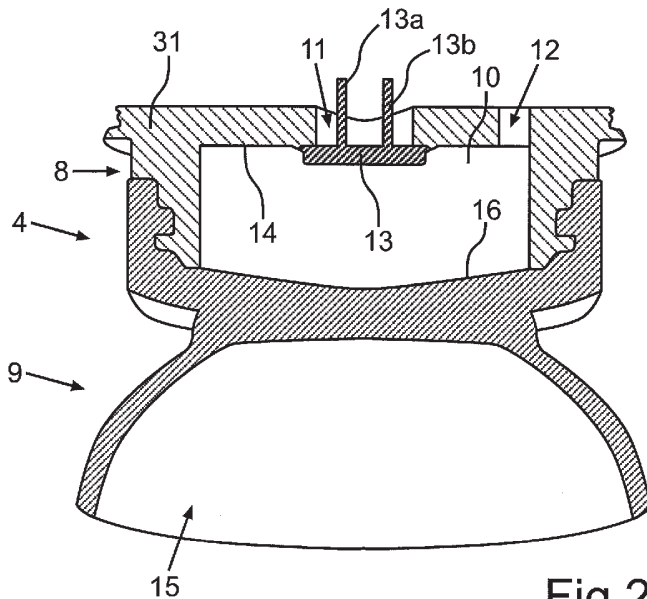


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a kitchen appliance with a base unit (3) designed with several feet (4, 5) to which a container (7) can be attached to accommodate foods, and with a weighing device (6) with several sensors (13) for determination of the weight of at least the container (7), wherein one sensor (13) is each arranged in one foot (4, 5), wherein one foot (4, 5) has a housing (8) in which the associated sensor (13) is accommodated at least in part, and comprises one supporting unit (9) which is connected to the housing (8) and is designed for set-up on a substrate.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Küchenmaschine mit einem mit mehreren Füßen (4, 5) ausgebildeten Basisteil (3), an welchem ein Behälter (7) zur Aufnahme von Lebensmitteln anbringbar ist, und mit einer Wägeeinrichtung (6) mit mehreren Sensoren (13) zur Gewichtsbestimmung zumindest des Behälters (7), wobei jeweils ein Sensor (13) jeweils in einem Fuß (4, 5) angeordnet ist, wobei ein Fuß (4, 5) ein Gehäuse (8) aufweist, in welchem der zugeordnete Sensor (13) zumindest teilweise angeordnet ist, und ein Aufstellteil (9) umfasst, welches mit dem Gehäuse (8) verbunden und zum Aufstellen auf einem Untergrund ausgebildet

WO 2010/010144 A1

ist.