ПРЕДГОВОР

Мерење представља једну од важних активности у свим областима науке и технологије, неизоставно у индустријским процесима, као и у свакодневним животу. Данас, не постоје ни најједноставнији кућни уређаји без сензора, почев од електричног бокала, еспресо апарата, кухињске ваге, затим дечих играчака, а тренд повезивања паметних телефона са десетинама сензора који омогућавају једновремено праћење више параметара из окружења, као и виталних функција корисника, сусреће се на сваком кораку. Развој система аутоматског управљања, паметних кућа, аутономних возила, система за повећање енергетске ефикасности и уштеде ресурса могуће је остварив са применом сензора.

Сензори представљају интерфејс између свакодневног, углавном аналогног окружења и дигиталног света информација који намеће тренд снимања података о свим активностима и обраде те огромне количине података у циљу стварања нових знања. Савремене дисциплине као што су *data mining*, *deep learning*, *internet of things*, *industrial internet of things* и друге, захтевају управо информације које обезбеђују сензори.

Данас, као и за многе друге научне дисциплине, тако и за метрологију, постоји велики број уџбеника, и поставља се питање оправданости писања још једне књиге, посебно када постоји могућност да се за мерење било које физичке величине пронађе извор информација на интернету. Ипак, у току извођења наставе из предмета "Сензори и актуатори" и "Физичко-техничка мерења" на Електротехничком факултету у Београду аутори су сакупили материјал из више извора и овај уџбеник је настао управо из разлога да се то градиво обједини, како би постојала јединствена литература о сензорима што би пре свега студентима, омогућило ефикаснију припрему испита, а касније и основни приручник у њиховом инжењерском раду.

Циљ овог уџбеника је да систематично прикаже основне принципе мерења неелектичних величина, пре свега у лабораторијским и индустријским условима. Иако се сензори континуирано усавршавају, смањују им се димензије и цена, а повећава осетљивост и поузданост, основни принципа њиховог рада се не мењају и аутори су сматрали да је најважније да се управо ти принципи образложе што једноставније и јасније, са минимално математичког апарата, како би остали усађени у основна знања студената који су одслушали поменуте курсеве.

У првом поглављу приказана је кратка анализа обраде резултата мерења и начини графичког представљања. Друго поглавље обухвата основне поделе сензора, математичко моделовање сензора и одговарајуће методе линеаризције са кратким осврtом на поузданост и економскотехничке параметре. У поглављима од трећег до деветог анализирани су сензори силе и момента, померања, брзине и убрзања, притиска, нивоа, протока и температуре респективно, односно оних неелектричних величина које се најчешће срећу у процесној индустрији. Поред основних принципа мерења појединих физички величина, приказани су како стандардни сензори, тако и поједине савремене реализације. У прилогу је дат пример алгоритма за линеарну интерполацију резултата мерења коришћењем критеријума тоталног минимума квадрата грешке (*total least squares*).

Аутори посебну захвалност дугују рецензентима на несебичној подршци и великом броју сугестија, чиме су значајно подигли квалитет овог уџбеника.

Аутори

САДРЖАЈ

1. ОБРАДА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА 9

1.1 Мерна несигурност 10
1.2 Типови мерне несигурности 10
1.3 Мерна несигурност тип А 11
1.4 Мерна несигурност тип Б 13
1.5 Комбинована мерна несигурност 14
1.6 Мерна несигурност и функције расподеле 14
1.7 Типичне функције расподеле при одређивању мерне несигурности 16

1.7.1 Равномерна расподела 16
1.7.2 Симетрична троугаона функција расподеле 17
1.7.3 Гаусова (нормална) функција расподеле и Студентова расподела 18

1.8 Упоређивање функција расподеле 20
1.9 Одређивање комбиноване мерне несигурности 23
1.10 Комбинована МН у случају некорелисаних величина 23
1.11 Комбинована МН у случају корелисаних величина 24
1.12 Примери одређивања комбиноване МН 26
1.13 Графичко представљање резултата мерења 28

2. ПОДЕЛА СЕНЗОРА И ЊИХОВЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ 35

2.1 Подела сензора 35
2.2 Основне техничке карактеристике сензора 37

2.2.1 Динамичко понашање сензора у временском домену 40
2.2.2 Динамичко понашање сензора у фреквенцијском домену 45
2.2.3 Параметри статичке карактеристике сензора 49
2.2.4 Поузданост сензора 52
2.2.5 Економскотехнички параметри сензора 55

3. СЕНЗОРИ СИЛЕ И МОМЕНТА СИЛЕ 56

3.1 Сензори силе 56

3.1.1 Отпорничке (тензометријске) мерне траке 57
3.1.2 Електрична кола са мерним тракама 59
3.1.3 Еластични елементи (мерне ћелије) за мерење силе помоћу мерних трака 62
3.1.4 Мерење нормалних компоненти силе (вектора силе) помоћу мерних трака 64
3.1.5 Грешка мерења напрезања услед косо постављене мерне траке 65

3.2 Сензори обртног момента (напрезање услед торзије) 66

3.2.1 Еластични елементи за мерење момента помоћу мерних трака 66

3.3 Сензори силе и момента на принципу магнетострикционог ефекта ... 68

4. СЕНЗОРИ ПОМЕРАЊА ... 70

4.1 Отпорнички сензори померања ... 70
4.2 Капацитивни сензори померања ... 74

4.2.1 Капацитивни претварачи са променљивом површином ... 74
4.2.2 Капацитивни претварачи са променљивом пермеабилности диелектрика ... 75
4.2.3 Капацитивни претварачи са променљивим растојањем електрода ... 76

4.3 Електромагнетски сензори померања ... 78

4.3.1 Индуктивни сензори померања ... 78
4.3.2 Индукциони сензори померања ... 80

4.4 Дигитални сензори померања ... 81

4.4.1 Апсолутни енкодер ... 82
4.4.2 Инкрементални енкодер ... 82

5. СЕНЗОРИ БРЗИНЕ И УБРЗАЊА ... 84

5.1 Сензори брзине ... 84

5.1.1 Центрифугални тахометри ... 84
5.1.2 Тахометри са сатним механизмом ... 85
5.1.3 Тахометри на принципу вихорних струја ... 85
5.1.4 Тахометарски генератори ... 85
5.1.5 Тахометарски мерни мостови ... 86
5.1.6 Дигиталне методе мерења угаоне брзине ... 87
5.1.7 Тахометри на принципу стробоскопског ефекта ... 90
5.1.8 Мерење брзине при транслацији ... 91
5.1.9 Жироскоп ... 91

5.2 Сензори убрзања ... 93

5.2.1 Сензори убрзања са покретним сеизмичким елементом и опругом ... 93
5.2.2 Сензори убрзања на принципу пиезоелектричног ефекта ... 94
5.2.3 Сервоакцелерометри ... 100

5.3 Калибрација (еталонирање) сензора убрзања ... 102

6. СЕНЗОРИ ПРИТИСКА ... 104

6.1 Манометри са течношћу ... 105
6.2 Манометри на принципу еластичних претварача ... 106
6.3 Сервоманометри ... 109
6.4 Сензори притиска у полупроводничкој техници ... 110
6.5 Сензори врло високих притисака на принципу отпорничких претварача ... 111

6.6 Сензори ниског апсолутног притиска (вакуума) 112
6.7 Манометри за калибрацију сензора притиска 113

7. СЕНЗОРИ НИВОА 115

7.1 Сензори нивоа течности на принципу пловка 115
7.2 Хидростатички сензори нивоа 116
7.3 Сензор нивоа течности на принципу уроњеног пловка 116
7.4 Капацитивни претварачи нивоа течности 117
7.5 Сензори нивоа на принципу вибрационе виљушке 119
7.6 Сензор нивоа на принципу мерења кондукције или отпорности 119
7.7 Сензори нивоа на принципу ултразвука 120
7.8 Дискретно мерење нивоа 121

8. СЕНЗОРИ ПРОТОКА 123

8.1 Протокометри на принципу диференцијалног притиска 125

8.1.1 Протокометри са пригушницом 126
8.1.2 Протокометри са пригушницом типа Вентуријеве цеви 127
8.1.3 Питоова цев 127
8.1.4 Далова цев 128
8.1.5 Протокометри на принципу цеви са прегибом 128

8.2 Вртложни мерачи протока 128
8.3 Турбински мерачи протока 129
8.4 Волуметријски мерачи протока 130
8.5 Ротаметри 130
8.6 Електромагнетски мерачи протока 132
8.7 Ултразвучни протокометри 133

8.7.1 Ултразвучни мерачи протока на принципу времена прелета 133
8.7.2 Ултразвучни протокометри на принципу Доплеровог ефекта 134
8.7.3 Ултразвучни протокометри на принципу кроскорелације 136

8.8 Протокометри на принципу Кориолисовог ефекта 136
8.9 Термални сензори за мерење протока 138
8.10 Мерење протока у отвореним каналима 143
8.11 Микросензори протока 143

9. СЕНЗОРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 145

9.1 Отпорнички сензори температуре 149

9.1.1 Отпорнички температурски претварачи (детектори) 149
9.1.2 Отпорнички силицијумски термометри 152
9.1.3 Термистори 154

9.2 Термопар 161
9.3 Сензори температуре на принципу ПН споја 166
9.4 Флуоресцентни сензори температуре 169
9.5 Акустички сензори температуре 170

9.6 Стаклени термометри 171
9.7 Биметални термометри 172
9.8 Гасни термометри 172
9.9 Сензори за бесконтактно мерење температуре 173

Прилог 184

Литература 186

1. ОБРАДА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Обрада резултата мерења заснива се на теорији грешака која се као математичка дисциплина развила током 19. и почетком 20. века. Анализом измерених података, на основу ове теорије одређивана је вредност мерене величине и процењиване одговарајуће грешке, односно мерне несигурности. У основне појмове теорије грешака спадају случајне и систематске грешке. Подела грешака на ове две групе извршена је на основу разматрања физичких узрока који проузрокују грешке. При томе су усвојене идеализоване претпоставке које у практичним мерењима, по правилу, не могу бити испуњене. На пример, није могућно одредити које од величина окружења проузрокују само случајне а које само систематске грешке.

Практична примена теорије грешака у обради експерименталних резултата није била довољно уједначена, па је било тешко упоређивање резултата истоветних и сродних мерења презентираних од различитих институција и појединаца. Потреба за уједначавањем изражавања резултата на међународном плану, уочиле су све водеће институције из области метрологије и стандардизације. У циљу решавања проблема, Међународни комитет за тегове и мере, који представља орган Генералне конференције за тегове и мере, а сачињавају га експерти из разних области мерења, формирао је 1978. године Радну групу за изражавања експерименталне несигурности. Ова радна група је 1980. године донела је кратки документ Препорука за изражавање експерименталне несигурности где су дате смернице помоћу којих треба постићи уједначени и практично оријентисани начин обраде резултата мерења. Након дужег рада, године 1993. публикован је опширни текст, Упутство за изражавање мерне несигурности, (*Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements,* http://www.bipm.org/en/publications/guides/) као заједнички документ водећих организација из метрологије, физике и хемије[1]. У Упутству је дат нови приступ одређивања несигурности, потпуно задржавајући познати математички апарат класичне теорије грешака. Концепт одређивања мерне несигурности дат у Упутству није у супротности са теоријом грешака већ даје приступ који је боље прилагођен условима реалних мерења.

Препорука садржи опширне теоријске основе и већи број практичних примера, почев од елементарних па до врло сложених који подразумевају од читаоца дубље познавање различитих математичких дисциплина. У

[1] Међународни биро за тегове и мере, Међународна електротехничка комисија, Међународна организација за клиничку хемију, Међународна организација за стандардизацију, Међународна унија за чисту и примењену хемију, Међународна организација за чисту и примењену физику и Међународна организација за законску метрологију.

упутству се наглашава да ипак изражавање мерне несигурности није сведено на рутински поступак. Напротив, каже се да је ваљана процена несигурности могућа под условом да се што боље проуче све компоненте мерног поступка, почев од теоријских основа, остварености претпостављених услова, затим карактеристике мерне опреме и утицаји параметара окружења на мерни процес. Начини изражавања несигурности разликују се зависно од врсте мерења и не могу бити дати јединственим и коначним скупом прописа. То налаже неопходност креативног приступа проблемима изражавања несигурности. При томе особа која даје резултат мора располагати критичким размишљањем, интелектуалним интегритетом, поштењем и високим нивоом професионалних знања и вештина. Наш први професор из области мерења, Владислав Јовановић (1897 – 1976), члан Саветодавног одбора за електрицитет при Међународном комитету за тегове и мере, имао је омиљену изреку која је у складу са горе изнесеним условима: „у мерењима је најважнија честитост“.

1.1 Мерна несигурност

Сви термини и целокупни математички апарат познат из класичне теорије грешака користе се и у Упутству. Међутим појављују се неки нови термини.

Стандардна мерна несигурност, u (*Uncertainty*), једнака је стандардном одступању σ ($u = \sigma$). Статистичка сигурност која одговара стандардној мерној несигурности (МН) зависи од расподеле која се приписује датом мерењу. На пример у случају Гаусове расподеле, интервалу ширине једног стандардног одступања, $\mu \pm \sigma$ (μ -средња вредност), одговара статистичка сигурност од 68,3 %.

Комбинована стандардна мерна несигурност, u_c, користи се када се резултат добија на основу већег броја прикупљених података. Претходно се за сваки податак који утиче на мерење одреди одговарајућа стандардна МН и на основу њих се, као резултанта, одређује комбинована МН, на начин који ће бити илустрован у наставку.

Проширена мерна несигурност, U, представља умножак стандардне МН и ***коефицијента проширења,*** k, који зависно од расподеле, има вредност у интервалу од $\sqrt{3}$ до 3. Проширеној МН одговара висока вредност статистичке сигурности, реда величине 95% – 99 %. Несигурност која се наводи у каталозима произвођача инструмената по правилу представља проширену МН, која се некада назива и гарантоване карактеристике.

1.2 Типови мерне несигурности

МН и грешке представљају различите појмове, па се не смеју изједначавати. Резултат може имати грешку (позитивног или негативног

знака) која је дефинисана као разлика измереног податка и тачне, односно условно тачне вредности. Увек је МН позитивна величина и приписује се целокупном мерном процесу, односно инструменту који се примењује. На пример, за неки термометар произвођач даје податак да мерна несигурност износи 1 °C. Ако је овим термометром очита температура, на пример 20,0 °C, може се очекивати да стварна вредност температуре припада опсегу од 19,0 °C до 21,0 °C. Ако се затим помоћу еталонског термометра установи да је "тачна" вредност била 20,1 °C, значи да је у овом случају грешка износила 0,1 °C. У следећем мерењу грешка ће вероватно имати неку другу вредност.

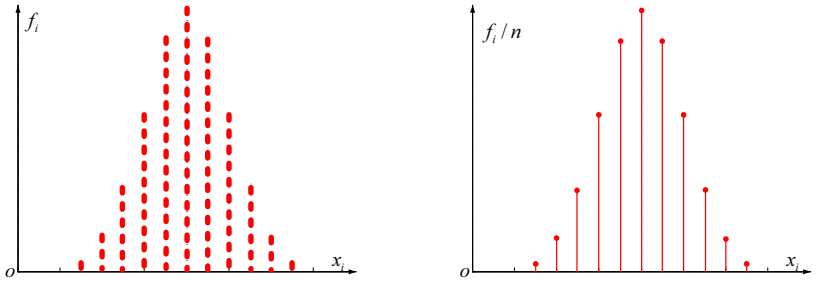
1.3 Мерна несигурност тип А

Мерна несигурност тип А одређује се методом статистичке обраде резултата, тј. узрок овог типа стандардне несигурности се сматра неодређеним. Из овог следи да МН тип А постоји искључиво ако се ради о мерењу које је више пута поновљено. Ако су резултати поновљених мерења представљени узорком $x_1, x_2 \cdots, x_i, \cdots, x_n$, може се израчунати средња вредност

$$\min_{\mu} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2, \text{ следи да је } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{1.1}$$

односно $\mu = \sum_{i=1}^{m} (f_i / n) x_i$, $m \le n$, где је f_i / n релативна учестаност резултата мерења и $\sum_{i=1}^{m} f_i = n$, затим стандардно одступање појединих резултата

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2}{n-1}}. \tag{1.2}$$

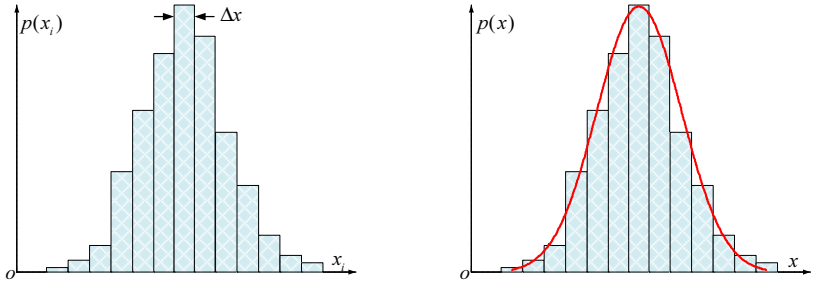


Слика 1.1. Учестаност резултата мерења (лево), релативна учестаност резултата мерења (десно)

При мерењу континуалне величине скуп мерења чини дискретни скуп резултата који се разликују за диференцијално мале прираштаје. Хистограм је графички приказ резултата мерења. Резултати се групишу у

интервале хистограма у односу на укупан интервал мерења $x_{\max} - x_{\min}$, где је $x_{\max}$ највећи, а $x_{\min}$ најмањи резултат. При мерењу морају се обухватити све измерене вредности и да сваки појединн резултат припада само једном интервалу тако да је практично број интервала хистограма $m = \lceil \sqrt{n} \rceil$ или $m = \lceil \log_2 n \rceil + 1$, ($\lceil x \rceil$-горње цело).

При цртању дијаграма на апсцису се наносе интервали хистограма, а на ординату учестаност интервала, релативна учестаност интервала или процентулана учестаност интервала. Учестаност интервала је број мерења која припадају интервалу хистограма, а релативна учестаност интервала односу броја који припада појединомм интервалу у односу на укупан број мерења. Нормализовани хистограм - учестаност интервала се дели ширином интервала хистограма.



Слика 1.2. Хистограм (лево), густина расподеле вероватноће (десно).

Ако се посматра процес мерења са великим број понављања $n \to \infty$, тада се ширина интервала хистограма смањује и заправо постаје $\Delta x \to 0$. Густина расподеле вероватноће мерења је у овом случају непрекидна функција $p(x)$ дефинисана за свако x, слика 1.2. (десно). Функција $p(x)$ се математички дефинише једначином

$$p(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{P(x_i < x < x_{i+1})}{\Delta x} \tag{1.3}$$

односно функција расподеле вероватноће резултата мерења дефинисана је једначином

$$P(\lambda) = \int_{-\infty}^{\lambda} p(x)dx, \tag{1.4}$$

Средња вредност представља такође величину случајног карактера, па отуда има своје стандардно одступање, које према теорији грешака износи

$$\sigma_{\mu} = \sigma / \sqrt{n}\text{, за } \sigma_{x_i} = \sigma, \tag{1.5}$$

односно релативно стандардно одступање $\sigma_r = \sigma / \mu$ (што има мању вредност поновљивост мерења је боља).

Мерна несигурност тип А, (која се такође назива и експериментално стандардно одступање) једнака је одговарајућем стандардном одступању. Мерна несигурност тип А појединих резултата x_i је $u = \sigma$, док је МН тип А средње вредности $u = \sigma_\mu$. Статистичка сигурност која одговара МН тип А зависи од статистичке расподеле $f(x)$ која се може усвојити у датом случају. Ако се ради о релативно великим узорцима теоријски се може показати средња вредност има Гаусову расподелу (одговарајући доказ даје тзв. централна гранична теорема). При томе, елементи који сачињавају узорак, могу имати било коју од расподела (униформну, Гаусову и др.). Стандардно одступање представља такође случајну величину, што значи да и оно такође има своје стандардно одступање σ_σ које зависи од броја елемената *n*. Ако је заступљена Гаусова расподела, из теорије се добија

$$\sigma_\sigma = \sigma / \sqrt{2(n-1)} \tag{1.6}$$

Израз (1.6) показује да σ_σ има вредност која споро опада са порастом броја *n.* Ако узорак има мањи број елемената, на пример $n = 8$, релативна несигурност стандардног одступања σ_σ / σ има знатну вредност од 27 %. То указује да резултати добијени статистичком анализом малог броја података имају лошу поузданост.

1.4 Мерна несигурност тип Б

Мерна несигурност тип Б одређује се свим осталим методама, изузев статистичке анализе серије поновљених мерења. То претпоставља употребу свих расположивих података и сазнања о коришћеној мерној опреми, о утицају параметара окружења на мерење, о разним врстама сметњи и др. При томе се претпоставља да је експериментатор искусан као и да има довољно теоријских знања.

Важан извор података за одређивање МН тип Б су каталози које произвођач даје уз инструмент. Ту се обично даје несигурности мерења у зависности од мерног опсега, при контролисаним вредностима параметара околине, као што су опсег температуре околине, релативне влажности и др.

Сви инструменти у јавној употреби, по закону, треба да буду претходно прегледани помоћу опреме вишег нивоа тачности, у лабораторијама са одговарајућим овлашћењем (акредитацијом). Наравно, преглед има законску важност само у означеном временском периоду, након чега се преглед понавља. Подаци у сертификату добијеном након прегледа, заједно са евентуалним додатним обавештењима стручњака који су преглед извршили, представљају корисне изворе у одређивању МН тип Б.

Анализом експеримента треба установити да ли резултат мерења заиста представља бројну вредност физичке величине чије се мерење врши. На пример, ако се мери отпорност неког високоомског отпорника, треба установити да ли паралелне шентирајуће везе имају утицај на мерни

резултат. Осим тога, треба испитати да ли снага која се развија у отпорнику изазива нежељени пораст температуре у односу на околину. Треба водити рачуна о температури околине, влажности и атмосферском притиску, ако се оцени да могу имати утицај на резултате. Познато је да већина лабораторијских мерења има статички карактер. То значи да се очитавање обавља када се успостави стационарно стање. Међутим, потпуна устаљеност физичких величина није остварива у пракси. Током прикупљања података мерена величина и параметри околине имају одређену брзину промене, па се јављају одређене динамичке грешке мерења. Ако се коришћени инструменти налазе при крају временског периода периодичног прегледа, или ако су коришћени у тешким условима, треба проценити да ли је дошло до промене карактеристика опреме. Предмет посебне анализе могу бити и утицај заокруживања бројева при рачунским операцијама током израчунавању резултата, затим утицаја резолуције мерних инструмената, ваљаности алгоритама коришћених у обради резултата и др.

1.5 Комбинована мерна несигурност

Мерења неких величина имају сложени карактер, тј. заснивају се на резултатима неких претходних мерења. Њима се добијају полазни резултати помоћу којих се долази до крајњег мерног резултата. На пример, снага P коју развија отпорник може се одредити ако се претходно измери струја I и напон U, а затим се снага израчунава на основу израза $P = UI$. У оба претходна мерења одређује се мерна несигурност, и то за струју u_{I} и за напон u_{U}. На основу ове две несигурности одређује се несигурност снаге u_{P} као резултантна вредност која се назива комбинована мерна несигурност. Начин одређивања комбиноване МН зависи од тога да ли полазне величине имају одређени степен међузависности (корелисаности) што се изражава коефицијентом корелације r. У наставку биће дати неки једноставни примери одређивања комбиноване МН.

1.6 Мерна несигурност и функција расподеле

Једна од основних поставки у методици датој у Упутству је да се сваком податку о МН обавезно **придружи нека функција расподеле** као и вероватноћа која одговара том податку. У погледу придруживања расподеле постоји јасна разлика концепта МН у поређењу са класичном теоријом грешака. У класичној теорији, функција расподеле се користе само у анализи случајних грешака. Систематске грешке се у класичној теорији посматрају као детерминистичке величине, тј. као величине које немају случајни карактер него имају константну вредност у посматраном мерењу.

Концепт у Упутству заснива се на становишту да све врсте МН имају случајни карактер, што значи да свакој од њих треба обавезно придружити одговарајућу функцију расподеле. Мерна несигурност тип А се одређује када се располаже низом од n међусобно различитих резултата поновљених мерења. Ако је број n довољно велики, средња вредност и њено стандардно одступање испуњавају услове централне граничне теореме. Отуда следи да МН средње вредности, тип А, има по правилу Гаусову расподелу. При томе расподела полазних резултата не мора бити Гаусова. Мерна несигурност тип Б проузрокују систематски ефекти који се не могу у потпуности отклонити поступком калибрације. Као одговарајући пример посматра се елиминисање систематске грешке волтметра услед поремећаја „нуле“. Испитивани волтметар, са улазним крајевима у кратком споју, на пример, показује напон од + 200 μV. Пошто би рад са оваквим волтметром давао резултате који су систематски померени за приближно толики напон, пре почетка рада приступа се поступку “нуловања”. Са кратко спојеним крајевима, помоћу завртња показивање на скали се постепено смањује до нулте вредности (код новијих дигиталних волтметра то се постиже притиском на тастер “нула”). Након овог поступка може се уочити да на индикатору ипак долази до показивања мањег напонског сигнала променљивог знака од неколико μV. То је тзв. краткотрајна нестабилност нуле. Ако би се посматрање продужило, уочило би се додатно спорије „шетање“ (*drift*) нуле. Дакле систематска грешка не може се у потпуности отклонити. Преостали систематски ефекти имају случајни карактер, па је отуда неопходно да се такође и несигурности тип Б придружи одговарајућа функција расподеле. Случајни карактер МН тип Б илуструје се такође и следећим примерима.

Пример 1.1. На скали дигиталног инструмента идеално добре тачности очитава се бројна вредност мерене величине представљена бројем од N подеока. Стварна вредност при томе има неку аналогну вредност која се са подједнаком вероватноћом може налазити у интервалу између $N - ½$ до $N + ½$ подеока. У овом случају дигитално очитавање, само по себи, уноси МН (проширену) од ½ подеока, којој одговара равномерна расподела.

Пример 1.2. При мерењу једносмерног напона на скали једног реалног дигиталног волтметра очитава се вредност $U = 1{,}000000\,\mathrm{V}$. У каталогу произвођача се гарантује да том опсегу максимална несигурност износи 30 μV. Стварна вредност напона је случајна величина која се налази у опсегу 0,999970 V до 1,000030 V. Одговор коју од расподела треба приписати овом резултату треба потражити или а) у каталогу произвођача, б) од калибрационе лабораторије или в) сопственим искуством. У овом случају није неопходно узимати у обзир знатно мању несигурност услед дигиталног очитавања која износи ½ подеока, што је објашњено у претходном пасусу.