ПРЕДГОВОР

Универзитетски уџбеник „Основе метрологије и електрична мјерења" је прилагођен студентима Електротехничких факултета, али га могу користити и студенти других сродних техничких факултета. Основни циљ уџбеника је да читаоцима пружи темељно разумијевање основних концепата и теорија из области основа метрологије и електричних мјерења, уз посебан осврт на савремена достигнућа и иновације у овим областима.

Уџбеник у потпуности систематски излаже наставно градиво дефинисано наставним силабусом предмета Електрична мјерења на Електротехничком факултету Универзитета у Источном Сарајеву, па је сходно томе примарно намијењен студентима основног циклуса студија. Поред градива које се предаје у оквиру предмета Електрична мјерења, уџбеник садржи и додатни материјал потребан за проширивање знања и примјену електричних мјерења. Аутор је мишљења да знање из области електричних мјерења није на прави начин употпуњено без основних знања из области опште метрологије. Градиво у уџбенику је намјенски представљено опширно, са великим бројем детаља, у циљу постизања што већег степена независности од референтне литературе. Такође, уџбеник обухвата значајан број примјера који служе за олакшавање учење градива.

Садржај уџбеника је организован у седам поглавља. У првом поглављу је дат увод у област опште метрологије који обухвата преглед константи физике у метрологији и мјерних јединица, као реалних скаларних физичких величина појединачног контекста, са систематичним освртом на основне и изведене мјерне јединице и њима припадајуће основне физичке величине. Друго поглавље је посвећено основама мјерења, мјерним процесима и системима. Разматрана је и интернационализација и стандардизација у области метрологије. Треће поглавље изучава грешке мјерења, статистичку анализу резултата мјерења и одређивање мјерне несигурности. Објашњени су и дијелови теорије вјероватноће који су релевантни за разумијевање статистичке анализе резултата мјерења. Посебно су обрађене методе процјене мјерне несигурности. Четврто поглавље систематично анализира основне еталоне и средства електричних мјерења, у оквиру чега су обрађени лабораторијски извори напона и струја, мјерни отпорници, кондензатори и индуктивитети, те мјерни претварачи и сензори. У петом поглављу је детаљно објашњен рад мјерних инструмената. Обухваћена је анализа и аналогних и дигиталних мјерних инструмената. Класификовани су различити типови мјерних инструмената. Посебно су обрађени аналогни и дигитални осцилоскопи. Дат је и опис еволутивног развоја мјерних инструмената. Објашњени су показатељи тачности, као и појмови сигурности и поузданости рада мјерних инструмената. У шестом поглављу се изучавају методе мјерења основних електричних величина: струје, напона, отпорности, капацитивности, индуктивности, фреквенције (?), снаге и енергије. Анализиране су примјене напонских и струјних мјерних трансформа-

тора у процесу индиректног мјерења напона и струја. Посебно су обрађене и примјене мјерних компензатора и мостова. Седмо поглавље обухвата примјену рачунара у електричним мјерењима. Обрађене су области дигиталне обраде сигнала, анализе сигнала у фреквенцијском домену, а посебно Фуријеове анализе. Разматрани су рачунарски мјерни системи са нагласком на аквизицију података, комуникационе системе и примјену микроконтролера. Дат је и преглед значајних софтверских пакета у области електричних мјерења.

Велику захвалност за издвојено вријеме и корисне сугестије при писању уџбеника аутор дугује рецензентима проф. др Предрагу Пејовићу, проф. др Зорану Стојановићу, проф. др Мирјани Максимовић, доц. др Дарку Шуки и доц. др Срђану Јокићу. Аутор се посебно захваљује и колегама Владимиру Милојевићу и Срђану Чалији, из Института за мјериteљство Босне и Херцеговине, за стручне савјете и несебично пружену помоћ. Захвалност за велику помоћ при изради и обради илустрација у уџбенику аутор дугује студентима Електротехничког факултета Соњи Елек и Ђорђу Ковачевићу. Аутор се захваљује доц. др Јовани Форцан за значајну помоћ при рачунарској обради текста и математичких израза у уџбенику. Коначно, аутор дугује захвалност и Вујадинки Форцан, наставнику српског језика и књижевности, за лекторисање текста уџбеника.

Источно Сарајево, 2024. године

Садржај

1 Метрологија, физичке величине и мјерне јединице 1
1.1 Физичке величине 2
1.2 Основне физичке константе у метрологији 6
1.3 Мјерне јединице 12
1.3.1 Међународни систем мјерних јединица 13
1.3.2 Мјерне јединице и физичке величине у електротехници 25
1.3.3 Правилно писање физичких величина и мјерних јединица 37
2 Принципи метрологије и основе мјерења 41
2.1 Основни принципи метрологије 41
2.1.1 Тачност и прецизност мјерења 41
2.1.2 Мјерна несигурност 43
2.1.3 Поновљивост и репродуктивност мјерења 45
2.1.4 Калибрација и слједивост мјерења 46
2.2 Интернационализација у области метрологије 50
2.2.1 Међународни биро за тегове и мјере 50
2.2.2 Национални институти за метрологију и регионалне метролошке организације 53
2.2.3 Акредитација и стандардизација у области метрологије 57
2.3 Мјерни систем и процес мјерења 60
2.3.1 Типови мјерних сигнала 61
2.3.2 Карактеристике мјерних елемената 66
2.3.3 Процес мјерења 75
3 Грешке мјерења, статистичка анализа резултата мјерења и одређивање мјерне несигурности 79
3.1 Увод у грешке мјерења 79
3.2 Дефиниција грешке мјерења 80
3.3 Класификација грешака мјерења 82
3.4 Статистичка анализа резултата мјерења 84

3.4.1 Статистичка анализа и теорија вјероватноће 84
3.4.2 Хистограм резултата мјерења 87
3.4.3 Функције расподјеле вјероватноће 93
3.4.4 Квантитативне мјере облика функције густине вјероватноће 95
3.4.5 Типичне фамилије функција расподјеле вјероватноће 104
3.4.5.1 Нормална или Гаусова функција расподјеле вјероватноће 104
3.4.5.2 Студентова t-функција расподјеле вјероватноће 113
3.4.5.3 Вејбулова функција расподјеле вјероватноће 116
3.4.5.4 Карактеристичне функције расподјеле вјероватноће у метрологији 117
3.4.6 Параметријска процјена функције расподјеле вјероватноће 121
3.4.7 Непараметријска процјена функције расподјеле вјероватноће 125
3.4.8 Коваријанса и коефицијент корелације 128
3.5 Анализа мјерне несигурности 131
3.5.1 Узроци мјерне несигурности 132
3.5.2 Типови мјерне несигурности 135
3.5.3 Традиционални и савремени приступ мјерењу 137
3.5.4 Одређивање стандардне мјерне несигурности 140
3.5.4.1 Одређивање стандардне мјерне несигурности типа А и В 141
3.5.4.2 Одређивање комбиноване стандардне мјерне несигурности и интервала покривености 144
3.5.5 Преглед поступка одређивања стандардне мјерне несигурности и препоруке за правилно представљање резултата мјерења 154
4 Основни еталони и средства електричних мјерења 159
4.1 Лабораторијски извори напона и струја 160
4.1.1 Еталони напона 163
4.1.1.1 Вестонов еталонски елемент 163

4.1.1.2 Еталон напона са Зенеровим диодама 164
4.1.1.3 Џосефсонов еталонски елемент 168
4.1.1.4 AC/DC термопретварачи 172
4.1.2 Регулација струје при електричним мјерењима 175
4.1.2.1 Потенциометарски спој отпорника 175
4.1.2.2 Предотпорник за подешавање струје 177
4.1.2.3 Клизни отпорници 178
4.1.2.4 Регулациони трансформатори 179
4.1.2.5 Преглед еталона струја 181
4.2 Мјерни отпорници, кондензатори и индуктивитети 182
4.2.1 Мјерни отпорници 182
4.2.1.1 Еквивалентна шема мјерног отпорника 183
4.2.1.2 Типови отпорника 184
4.2.1.3 Конвенционални еталони отпорности 189
4.2.1.4 Квантни Холов еталон отпорности 192
4.2.2 Мјерни кондензатори 196
4.2.2.1 Еквивалентна шема мјерног кондензатора 196
4.2.2.2 Типови кондензатора 199
4.2.2.3 Еталони мјерних кондензатора 204
4.2.3 Мјерни индуктивитети 207
4.2.3.1 Еквивалентна шема мјерног индуктивитета 207
4.2.3.2 Типови индуктивитета 210
4.2.3.3 Еталони мјерних индуктивитета 213
4.3 Мјерни претварачи и сензори 215
4.3.1 Класификација сензора 216
4.3.2 Примјена сензора у мјерењима неелектричних величина 217
4.3.2.1 Сензори температуре 218
5 Електрични мјерни инструменти 227
5.1 Типови мјерних инструмената 227
5.2 Аналогни мјерни инструменти 231

5.2.1 Динамика покретног дијела аналогног мјерног инструмента ... 232
5.2.2 Скале и казаљке аналогних мјерних инструмената ... 241
5.2.3 Принципи рада аналогних мјерних инструмената ... 247
5.2.3.1 Магнето-електрични мјерни инструменти ... 248
5.2.3.2 Феромагнетни мјерни инструменти ... 251
5.2.3.3 Феродинамички мјерни инструменти ... 253
5.2.3.4 Електростатички мјерни инструменти ... 255
5.2.3.5 Индукциони мјерни инструменти ... 257
5.2.3.6 Термоелектрични мјерни инструменти ... 260
5.2.4 Галванометри ... 263
5.2.5 Електронски аналогни мјерни инструменти ... 265
5.2.5.1 Исправљачи ... 265
5.2.5.2 Мјерни појачавачи ... 268
5.2.5.3 Аналогни филтри ... 271
5.2.6 Аналогни осцилоскопи ... 279
5.2.6.1 Принцип рада аналогног осцилоскопа ... 280
5.2.6.2 Управљачки терминал и екран аналогног осцилоскопа ... 293
5.2.6.3 Лисажуове фигуре ... 297
5.2.6.4 Мјерне сонде и уземљење осцилоскопа ... 302
5.3 Дигитални мјерни инструменти ... 314
5.3.1 A/D конверзија сигнала ... 315
5.3.1.1 Одабирање сигнала ... 315
5.3.1.2 Квантизација ... 317
5.3.1.3 Кодовање ... 319
5.3.2 Карактеристике A/D конвертора ... 319
5.3.2.1 Статичке карактеристике A/D конвертора ... 320
5.3.2.2 Динамичке карактеристике A/D конвертора ... 321
5.3.3 Управљачки склоп и сигнали A/D конвертора ... 326
5.3.4 Дигитални мултиметри ... 329

5.3.5 Дигитални осцилоскопи 334
5.3.5.1 Принципи рада дигиталних осцилоскопа 335
5.3.5.2 Основне карактеристике дигиталних осцилоскопа 341
5.4 Карактеристике електричних мјерних инструмената 345
5.4.1 Еволуција технологије израде електричних мјерних инструмената 345
5.4.2 Грешке и класе тачности електричних мјерних инструмената 348
5.4.3 Сигурност рада електричних мјерних инструмената 352
5.4.3.1 Испитни напони и ознаке аналогних мјерних инструмената 352
5.4.3.2 Испитни напони дигиталних мјерних инструмената 351
5.4.3.3 Препоруке за сигуран рад са мјерним инструментима 356
5.4.4 Поузданост електричних мјерних инструмената 360
5.4.4.1 Основни показатељи поузданости 361
5.4.4.2 Поузданост мјерних система 366
6 Мјерење електричних величина 369
6.1 Мјерење струја и напона 371
6.1.1 Мјерење струја и напона аналогним електричним мјерним инструментима 372
6.1.1.1 Мјерење истосмјерних (DC) струја мјерним инструментом са покретним калемом 372
6.1.1.2 Мјерење истосмјерних (DC) напона мјерним инструментом са покретним калемом 379
6.1.1.3 Мјерење наизмјеничних (AC) струја и напона мјерним инструментом са покретним калемом и термопретварачем 385
6.1.2 Мјерење струја и напона аналогним електронским мјерним инструментима 386
6.1.2.1 Мјерење истосмјерних (DC) напона и струја електронским волтметрима 386

6.1.2.2 Мјерење наизмјеничних (AC) напона и струја електронским волтметрима 393
6.1.3 Мјерење струја и напона дигиталним мјерним инструментима 398
6.1.3.1 Топологије A/D конвертора за дигиталне мјерне инструменте 400
6.2 Мјерни трансформатори 406
6.2.1 Напонски мјерни трансформатори 406
6.2.1.1 Индуктивни напонски мјерни трансформатори 407
6.2.1.2 Посебне изведбе напонских мјерних трансформатора 418
6.2.2 Струјни мјерни трансформатори 426
6.2.2.1 Индуктивни струјни мјерни трансформатори 427
6.2.2.2 Посебне изведбе струјних мјерних трансформатора 440
6.3 Мјерни компензатори и мостови 449
6.3.1 Мјерни компензатори 449
6.3.1.1 Мјерни компензатори за истосмјерну (DC) струју 449
6.3.1.2 Мјерни компензатори за наизмјеничну (AC) струју 455
6.3.2 Мјерни мостови 458
6.3.2.1 Мостови истосмјерне (DC) струје 459
6.3.2.2 Мостови наизмјеничне (AC) струје 466
6.4 Мјерење отпорности, капацитивности и индуктивности 473
6.4.1 Мјерење отпорности 473
6.4.1.1 Аналогни омметри 474
6.4.1.2 Дигитални омметри (мјерне функције дигиталних мултиметара) 479
6.4.1.3 Метода амперметар-волтметар 481
6.4.1.4 Метода поређења са еталоном 485
6.4.1.5 Примјена мјерних мостова истосмјерне (DC) струје 486

6.4.1.6 Метода директног отклона 493
6.4.1.7 Метода пражњења кондензатора (губитка наелектрисања) 495
6.4.2 Мјерење капацитивности 497
6.4.2.1 Метода амперметар-волтметар 497
6.4.2.2 Метода пражњења кондензатора и метода поређења са еталоном 498
6.4.2.3 Резонантна метода 499
6.4.2.4 Примјена мјерних мостова наизмјеничне (AC) струје 501
6.4.3 Мјерење индуктивности 510
6.4.3.1 Метода амперметар-волтметар 511
6.4.3.2 Метода амперметар-волтметар-ватметар 513
6.4.3.3 Метода два волтметра 514
6.4.3.4 Резонантна метода 516
6.4.3.5 Примјена мјерних мостова наизмјеничне (AC) струје 518
6.5 Мјерење фреквенције 523
6.5.1 Мјерење фреквенције у аналогној техници 523
6.5.1.1 Фреквенциометри са језичцима 523
6.5.1.2 Фреквенциометри са казаљком 524
6.5.1.3 Примјена мјерних мостова наизмјеничне (AC) струје 527
6.5.2 Мјерење фреквенције у дигиталној техници 529
6.6 Мјерење електричне снаге и енергије 535
6.6.1 Мјерење електричне снаге 535
6.6.1.1 Дефиниције електричне снаге 535
6.6.1.2 Мјерење електричне снаге у колима истосмјерне (DC) струје 543
6.6.1.3 Мјерење електричне снаге у једнофазним колима наизмјеничне (AC) струје 550
6.6.1.4 Мјерење електричне снаге у трофазним колима наизмјеничне (AC) струје 555

6.6.2 Мјерење електричне енергије 564
6.6.2.1 Аналогна бројила електричне енергије 564
6.6.2.2 Дигитална бројила електричне енергије 571
6.6.2.3 Калибрација бројила електричне енергије 574
7 Примјена рачунара у електричним мјерењима..... 581
7.1 Дигитална обрада сигнала 581
7.1.1 Дискретни сигнали и системи 581
7.1.1.1 Линеарни временски непромјењиви дискретни системи..... 584
7.1.2 Анализа сигнала примјеном Фуријеове методе 587
7.1.2.1 Фуријеова трансформација 587
7.1.2.2 Фуријеов ред 588
7.1.2.3 Прорачун фазора помоћу коефицијената Фуријеовог реда 592
7.1.2.4 Дискретна Фуријеова трансформација 593
7.1.3 Дигитално филтрирање сигнала 598
7.1.3.1 Карактеристике дигиталног филтра у временском домену 600
7.1.3.2 Карактеристике дигиталног филтра у фреквенцијском домену 601
7.1.4 Анализатори спектра сигнала 603
7.1.4.1 Анализатор спектра са хетеродинским пријемником 603
7.1.4.2 FFT анализатор спектра 605
7.2 Рачунарски мјерни системи 609
7.2.1 Аквизиција мјерних података 611
7.2.1.1 Аквизиционе картице 613
7.2.2 Комуникације мјерних уређаја 618
7.2.2.1 IEEE 188/GPIB комуникациони интерфејс..... 621
7.2.2.2 Мјерни системи са LAN комуникацијама 623
7.2.3 Мјерни системи са микроконтролерима 625
7.2.3.1 Дигитални процесори сигнала 629

7.2.4 Мјерно-информациони системи за надзор, контролу и прикупљање података (SCADA системи) 632
7.2.4.1 Системи управљања процесима индустријске производње 634
7.3 Софтвери у електричним мјерењима 635
7.3.1 Категоризација и преглед софтвера за мјерења 636
7.3.2 Python 640
7.3.3 MATLAB/GNU Octave 650
7.3.4 labVIEW 655
Листа скраћеница и термина 661
Литература 667