

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

**МЕТОДИ И ПРИМЕРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ
РАДА У ПРОЦЕСНОМ ИНЖЕЊЕРСТВУ И
ТЕРМОТЕХНИЦИ**

**Бранислав Јаћимовић
Мирјана Стаменић
Александар Петровић
Урош Милованчевић
Милена Отовић
Раденко Рајић
Милош Михаиловић
Предраг Богдановић**

**Србислав Генић
Иван Аранђеловић
Ненад Митровић
Милош Ивошевић
Андрија Петровић
Никола Танасић
Саша Марковић
Томислав Симоновић**

Прво издање, 2022.

Рецензија 1 - Извод

Књига обухвата методологију и примере експерименталног рада везаних за основне технолошке операције и за процесне апарате и уређаје. Велики број типова апарата и разноврсност њихове примене намеће потребу систематског праћења процесне технике и то како пројектовања, тако и различитих конструкционих решења и одржавања апарата у експлоатационом периоду.

Књига је конципирана тако да поред теоријских основа самих процеса и апарата садржи и велики број практичних примера експерименталног рада и намењена је како студентима ОАС и МАС нивоа за савладавање основа из ове области, тако и студентима ДС.

проф. др Ненад Ђупрић, Универзитет у Београду – Шумарски факултет

Рецензија 2 – Извод

Основна замисао књиге је да покрије лабораторијски рад неопходан за савладавање свих предмета за које је задужена Катедра за процесну технику на свим нивоима студија: ОАС + МАС + ДАС. Велики број технолошких процеса, типова и конструкционих решења апарата и уређаја је наметнуо потребу систематског праћења развоја овог дела технике и то како пројектовања, тако и одржавања апарата у експлоатационом периоду.

проф. др Угљеша Бугарић, Универзитет у Београду – Машински факултет

**Универзитет у Београду
Машински факултет**

**МЕТОДИ И ПРИМЕРИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ
РАДА У ПРОЦЕСНОМ ИНЖЕЊЕРСТВУ И
ТЕРМОТЕХНИЦИ**

**Бранислав Јаћимовић
Мирјана Стаменић
Александар Петровић
Урош Милованчевић
Милена Отовић
Раденко Рајић
Милош Михаиловић
Предраг Богдановић**

**Србислав Генић
Иван Аранђеловић
Ненад Митровић
Милош Ивошевић
Андрија Петровић
Никола Танасић
Саша Марковић
Томислав Симоновић**

Прво издање, 2022.

Аутори

Бранислав Јаћимовић, Србислав Генић, Мирјана Стаменић, Иван Аранђеловић, Александар Петровић, Ненад Митровић, Урош Милованчевић, Милош Ивошевић, Милена Отовић, Андрија Петровић, Раденко Рајић, Никола Танасић, Милош Михаиловић, Саша Марковић, Предраг Богдановић, Томислав Симоновић

Назив књиге

Методи и примери експерименталног рада у процесном инжењерству и термотехници
Прво издање, 2022.

Рецензенти

Проф. др Ненад Ћупрић, дипл. инж. маш., Универзитет у Београду – Шумарски факултет
--

Проф. др Угљеша Бугарић, дипл. инж. маш., Универзитет у Београду – Машински факултет

Лектор

Наташа Лекић Марковић, проф. српског језика и књижевности

Издавач

Универзитет у Београду – Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд
35, Србија

За издавача

Декан проф. др Радивоје Митровић, дипл. инж. маш.

Главни и одговорни уредник

Проф. др Милан Лечић, дипл. инж. маш.

Одобрено за штампу одлуком Декана Машинског факултета Универзитета у Београду, бр. 12/2020 од 14.08.2020. године

Тираж

300 примерака

Штампа

ПЛАНЕТА ПРИНТ, Виноградски венац 9, Београд

ИСБН 978-86-6060-074-7

Забрањено прештампавање, скенирање или фотокопирање.
Сва права задржавају издавач и аутори.

ПРЕДГОВОР

Развој наставног процеса на Модулу за процесну технику и заштиту животне средине и Модулу за термотехнику Машинског факултета у Београду (МФБ) довео је и до развоја лабораторијских вежби, као важног дела наставних активности на свим нивоима студија. Са друге стране битан део радних способности наставника и сарадника Катедре за процесну технику МФБ и Катедре за термотехнику МФБ је развијан кроз сарадњу са привредом, што је обухватало (и обухвата) и извршења различитих експертиза везаних за понашање или карактеристике објеката (уређаја, постројења) и процеса. Наставници са Академије техничких струковних студија Београд (АТССБ) су се прикључили писању ове књиге, јер су се као студенти или докторанти на Катедри за процесну технику МФБ, током свог школовања, а посебно током докторских судија, уверили колики је значај експерименталног рада, укључујући и правилну обраду и тумачења експерименталних података. Из тог разлога су изразили жељу да студијске програме на АТССБ обогате лабораторијским радом, да би се и њихови студенти оспособили за самостални експериментални рад у инжењерским пословима за које се образују.

Овај књига је намењена првенствено „нашим“ студентима као помоћна литература за савладавање наставних јединица и помоћ при експерименталном раду, како у лабораторијским условима, тако и за случајеве теренских испитивања опреме и процеса. Може бити од користи као допунска наставна литература студентима других модула МФБ, као и истраживачима са других техничких факултета и института.

Концепција вежби је заснована на једном делу тренутних наставних потреба Модула за процесну технику и заштиту животне средине и Модула за термотехнику МФБ и могућностима које су на располагању у лабораторијском раду. Такође, део материјала је намењен студентима АТССБ. Студентима других модула МФБ или других факултета и високих школа књига такође може послужити као допунска наставна литература.

Текст сваке од вежби је балансиран тако да прати наставни процес (предавања и вежбе) из појединачних предмета. Уз сваку лабораторијску вежбу је дат основни опис примењене апаратуре и пратећих уређаја, као и уређаја и инструмената за мерење. У посебном поглављу о обради резултата мерења су приказани основни појмови из статистике, неопходни за доношење закључака о извршеним мерењима. Прилози су израђени и дати у таквом обиму да помажу у обради појединих вежби, а касније могу послужити за даљи самостални рад студената. На крају сваког поглавља дат је преглед коришћене литературе која може да користи као путоказ читаоцу и за самостално проширивање знања. Студентима се препушта да, у табеле из књиге, самостално упишу бројчане и друге податке прикупљене током експерименталног рада, те да те податке обраде и тиме документују свој рад.

Поглавља 2 и 3 су првенствено намењена студентима докторских студија за савладавање основа из статистике и регресионе анализе. Текст није написан потпуно прецизно са математичке тачке гледишта (теореме, докази, итд.), јер има доста

литературе која је писана у том стилу. Са друге стране, кроз текст смо приказали основне појмове и статистичке алате онако како их користе истраживачи из инжењерских научних области, уз додатна објашњења на конкретним примерима из инжењерске и научне праксе која се спроводи на Катедри за процесну технику и Катедри за термотехнику МФБ.

Захваљујемо се свима који су помогли стварање ове књиге, а посебно рецензентима, професорима др Ненаду Ћуприћу и др Угљеши Бугарићу, који су савесним прегледом рукописа и инвентивним сугестијама допринели квалитету књиге. Аутори ће бити захвални на свим добронамерним примедбама, указаним грешкама и недостацима, како би се у евентуалном следећем издању могле учинити исправке и допуне.

Јун 2022.

Аутори

САДРЖАЈ

1	УВОД	1-1
1.1	Експериментални рад за потребе научних и техничких истраживања и тестирања	1-1
1.2	Концепт хијерархије података, информација, знања, разумевања и мудрости	1-6
1.3	Математички модел	1-9
1.4	Физички модел	1-10
1.5	Пробна постројења	1-10
1.6	Тестирање употребљивости (прихватљивости) уређаја	1-12
1.6.1	Испитивања типизираних производа	1-14
1.6.2	Испитивања у лабораторији	1-14
1.6.3	Испитивања на месту уградње	1-15
1.6.4	Испитивање перформанси размењивача топлоте	1-15
1.7	Мерења у инжењерским дисциплинама	1-16
1.7.1	Мерна опрема и мерни системи	1-17
1.7.2	Еталонирање мерне опреме	1-19
1.7.3	Метрологија	1-19
1.7.4	Систем мерних јединица	1-21
1.8	Препоруке за припрему техничких извештаја	1-22
1.8.1	Врсте извештаја	1-23
1.8.2	Организација формалних извештаја	1-23
1.8.3	Пратеће (пропратно) писмо	1-24
1.8.4	Насловна страна	1-24
1.8.5	Преглед садржаја	1-24
1.8.6	Резиме или закључак	1-24
1.8.7	Централни део извештаја	1-25
1.8.8	Списак учесника	1-26
1.8.9	Списак коришћених ознака	1-26
1.8.10	Списак коришћених извора података	1-26
1.8.11	Прилог извештаја	1-26
1.9	Технички основи за припрему извештаја	1-27
1.9.1	Представљање резултата и заокруживање бројева	1-27
1.9.2	Стил писања текстуалног дела извештаја	1-28
1.9.3	Поднаслови и пасуси	1-30
1.9.4	Табеле	1-31
1.9.5	Дијаграми	1-31
1.9.6	Илустрације	1-33
1.9.7	Навођење коришћених извора података	1-33
1.9.8	Примери прорачуна	1-34

1.9.9	Лекторисање	1-34
1.9.10	Завршна обрада	1-34
1.9.11	Скраћенице	1-35

2	СТАТИСТИЧКА АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА	2-1
2.1	Случајне величине и грешке при мерењима	2-2
2.2	Основни појмови теорије случајних величина	2-4
2.2.1	Емпиријске функције расподеле: кумулата, хистограм и полигон релативних фреквенција	2-7
2.2.2	Карактеристични параметри функције расподеле	2-11
2.2.3	Оцене математичког очекивања и дисперзије	2-13
2.2.4	Закон акумулације дисперзије	2-13
2.3	Основни закони расподеле	2-19
2.3.1	Нормална расподела	2-19
2.3.2	Расподела χ^2 (хи-квадрат)	2-21
2.3.3	Стјудентова расподела	2-23
2.3.4	Фишерава расподела	2-23
2.4	Статистичка оцена непознатих параметара расподеле	2-25
2.4.1	Интервална оцена математичког очекивања нормално распоређене случајне величине X ако је познато средње квадратно одступање	2-27
2.4.2	Интервална оцена математичког очекивања нормално распоређене случајне величине X	2-30
2.4.3	Интервална оцена дисперзије нормално распоређене случајне величине X	2-32
2.5	Тестирање статистичких хипотеза	2-35
2.5.1	Тестирање параметарских статистичких хипотеза	2-35
2.5.2	Тестирање хипотезе о једнакости дисперзије две случајне величине са нормалном расподелом	2-35
2.5.3	Тестирање хипотезе о једнакости дисперзије већег броја случајних величина са нормалном расподелом	2-37
2.5.4	Тестирање хипотезе о једнакости математичких очекивања две случајне величине са нормалном расподелом	2-40
2.5.5	Тестирање хипотезе о једнакости математичких очекивања већег броја случајних променљивих са нормалном расподелом методом дисперзионе анализе	2-43
2.5.6	Тестирање непараметарских статистичких хипотеза	2-46
2.5.7	Пирсонов χ^2 тест	2-47
2.5.8	λ – тест Колмогорова	2-48
2.5.9	Тест Колмогоров – Смирнова	2-52
2.5.10	Тестирање „сумњивог“ резултата мерења	2-52

3	РЕГРЕСИОНА АНАЛИЗА	3-1
3.1	Класификација регресионих модела	3-3
3.2	Облици регресионих линија	3-4
3.3	Одступања корелације од мерених тачака	3-5
3.4	Критеријуми за оцену квалитета корелације	3-7
3.5	Методи за изналажење регресионе функције	3-9
3.6	Основни метод најмањих квадрата примењен на апсолутну грешку	3-10
3.6.1	Линеарна корелација	3-10
3.6.2	Линеарна корелација са две независно променљиве	3-12
3.6.3	Линеарна корелација са више независно променљивих	3-16
3.6.4	Нелинеарна корелација	3-19
3.7	Основни метод најмањих квадрата примењен на релативну грешку	3-23
3.8	Статистичко и графичко представљање корелације	3-25
3.9	Основни метод најмањих квадрата – инверзни проблем	3-28
3.10	Метод ортогоналних најмањих квадрата	3-31
3.10.1	Ортогонална одступања корелације од мерених тачака и критеријуми за оцену квалитета корелације	3-31
3.10.2	Линеарна ортогонална регресија примењена на укупну апсолутну грешку	3-35
3.10.3	Линеарна регресија примењена на укупну релативну грешку	3-37
3.10.4	Општи приступ корелисању помоћу метода ортогоналних најмањих квадрата	3-43
3.11	Други регресиони методи	3-51
3.12	Избор типа корелације	3-52
3.12.1	Прелаз топлоте при ламинарном струјању кроз цеви	3-52
3.12.2	Порозност слоја пене на поду дифузионе колоне	3-53
3.12.3	Одређивање својстава флуида	3-54
3.12.4	Појаве које се описују прекидним функцијама	3-56
3.12.5	Избор регресора и регресанда	3-59
4	ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ	4-1
4.1	Испитивање посуда под притиском течносту под притиском	4-4
4.2	Испитивање индустријске арматуре течносту под притиском	4-9
4.3	Проточне карактеристике вентила	4-15
4.4	Димензиона стабилност полиетиленских цеви при загревању	4-18
4.5	Густина гранулисаног материјала	4-21
4.6	Густина течности	4-23
4.7	Специфична густина течности	4-26

4.8	Равнотежни притисак у функцији температуре код једнокомпонентних течности	4-30
4.9	Контролно испитивање ручних апарата за гашење почетних пожара типа S	4-33
4.10	Проточне карактеристике ватрогасне млазнице	4-36
4.11	Коефицијент дифузије паре у ваздуху	4-39
4.12	Стање влажног ваздуха на основу мерења температура по сувом и влажном термометру	4-43
4.13	Топлотне перформансе стационарних рекуперативних размењивача топлоте	4-49
4.14	Коефицијент пролаза топлоте за шаржни размењивач топлоте	4-54
4.15	Топлотне перформансе и пад притиска код куле за хлађење воде	4-59
4.16	Температура кључања воденог раствора – термодинамичка депресија	4-66
4.17	Биланс супстанције и топлоте за тунелску пећ за печење у кондиторској индустрији	4-70
4.18	Радни параметри горионика са керамичком испуном при сагоревању гасовитих горива ниске топлотне моћи	4-77
4.19	Ефекат оптимизације сагоревања и искоришћења енталпије продуката сагоревања на повећање ефикасности котла	4-89
4.20	Регулација рада пумпе помоћу фреквентног претварача ради енергетских уштеда	4-98
4.21	Радне карактеристике ејекторске пумпе	4-104
4.22	Тачка кључања и дестилациона крива	4-109
4.23	Флуидодинамички параметри колоне са испуном за систем гас – течност	4-113
4.24	Флуидодинамички параметри подова у дифузионим колонама за систем гас – течност	4-117
4.25	Проточна карактеристика вентила спринклерске инсталације	4-122
4.26	Радне карактеристике система за контролу дима и топлоте помоћу натпритиска	4-125
4.27	Радни параметри унутрашње хидрантске мреже	4-127
4.28.	Радне карактеристике спринклерске инсталације	4-129
4.29	Одређивање масе погонског гаса у апарату за гашење пожара под сталним притиском типа S	4-134
4.30	Мерење протока флуида помоћу ротаметра	4-137
4.31	Мерење протока флуида помоћу отпорне стазе	4-139
4.32	Мерење протока флуида помоћу мерне бленде	4-142
4.33	Мерење протока флуида помоћу пито и Пито–Прантлове сонде	4-146

5	ПРИЛОЗИ	5-1
5.1	Изражавање физичких величина јединицама SI	5-2
5.2	Изражавање састава мешавина	5-7
5.2.1	Изражавање састава мешавина у течном агрегатном стању	5-9
5.2.2	Изражавање састава мешавина у чврстом агрегатном стању	5-12
5.2.3	Изражавање састава мешавина у гасовитом агрегатном стању	5-14
5.3	Својства флуидних мешавина	5-18
5.4	Квантили нормалне расподеле за нормирану случајну величину	5-19
5.5	Квантили Стјудентове расподеле	5-20
5.6	Квантили Пирсонове расподеле	5-21
5.7	Квантили Фишерове расподеле	5-23
5.8	Квантили t расподеле	5-26
5.9	Квантили расподеле Колмогорова	5-27
5.10	Лапласова функција	5-28
5.11	Обични метод најмањих квадрата – минимални збир квадрата апсолутних грешака	5-31
5.12	Обични метод најмањих квадрата – минимални збир квадрата релативних грешака	5-35
5.13	Методи испитивања заптивања седишта	5-38
5.14	Извештај са теренског мерења перформанси куле за хлађење воде	5-40
5.15	Прорачун сагоревања гасовитог горива	5-49
5.16	Топлотни биланс пећи	5-51
5.17	Упутство за израду завршних радова	5-55