SADRŽAJ

PREDGOVOR **11**

1. MODELOVANJE I SIMULACIJE POMOĆU RAČUNARA **17**

1.1. Uvod 17
1.2. Definicije 17
1.3. Kategorije pristupa modelovanju 17
1.4. Faze razvoja 18
1.5. Uloga računara u modelovanju i simulacijama 18
1.6. Metodologija modelovanja i simulacija pomoću računara . 19
1.6.1. Formulacija problema 19
1.6.2. Analiza problema 21
1.6.3. Formiranje matematičkog modela 21
1.6.3.1 Opšta razmatranja 21
1.6.3.2 Generalni principi dobrog modelovanja . . . 33
1.6.4. Izbor računarskih metoda 45
1.6.5. Formiranje programa 47
1.6.5.1 Razvoj algoritma 47
1.6.5.2 Zahtevi za resursima 50
1.6.5.3 Karakteristike programa 51
1.6.6. Simulacije 80
1.6.6.1 Aspekti sprovođenja simulacija 80
1.6.6.2 Prednosti simulacija 92
1.7. Prilog: GIC – Programski alat za proračun udarnih karakteristika uzemljivača 93
1.7.1. Namena programa 93
1.7.2. Matematički model uzemljivača u udarnom periodu 94
1.7.3. Tok proračuna 94
1.7.4. Opis programa 95
1.7.4.1 Definisanje parametara proračuna udarnih karakteristika uzemljivača 95
1.7.4.2 Izvršenje proračuna 99
1.7.4.3 Prikaz rezultata proračuna 100
1.7.5. Primeri proračuna 101
1.7.6. Ulazno-izlazne veličine i moguće greške 106
1.7.6.1 Ulazno-izlazne veličine 106

1.7.6.2 Moguće greške 107
1.7.6.3 Poruke u radu sa programskim alatom GIC 108
1.7.7. Korišćenje Windows komandi 109
1.7.7.1 Pokretanje programa 109
1.7.7.2 Izgled ekrana sa Windows komandama . . . 110
1.7.7.3 Opis pojedinih komandi korišćenjem menija Help 110
Literatura 122

2. PRIMENA PROGRAMSKIH ALATA U ELEKTROENERGETSKIM PRORAČUNIMA 127
2.1. MATLAB / Simulink 127
2.1.1. Uvod 127
2.1.2. Osnovne grupe blokova u Simulinku 129
2.1.3. Dodatni modul Power System Blockset (SimPowerSystems) 135
2.1.4. Primena MATLABA u proračunu karakterističnih vrednosti struja kvara 153
2.1.4.1 Opšta razmatranja 153
2.1.4.2 Proračun karakterističnih vrednosti struja kvara 154
2.1.4.3 Postupak proračuna primenom Simulink modula 155
2.1.5. Programski alat SPLCAD za projektovanje srednjenaponskih nadzemnih vodova 159
2.1.5.1 Uvod 159
2.1.5.2 Opis programskog alata SPLCAD i primer primene 159
2.1.6. Simulink model turbinskog regulatora hidroelektrane "Kokin Brod" 171
2.1.6.1 Opšti podaci o elektrani 171
2.1.6.2 Modelovanje HE "Kokin Brod" 172
2.1.6.3 Prikaz turbinskog regulatora HE "Kokin Brod" 174
2.1.6.4 Simulink model turbinskog regulatora . . . 178
2.1.6.5 Komparativna analiza numerički i eksperimentalno dobijenih rezultata 178
2.2. EMTP / ATP 179
2.2.1. Uvod 179
2.2.2. ATPDraw pretprocesor 180
2.2.3. Programski alat EMTP / ATP 198

2.2.3.1 Primena 198
2.2.3.2 Postupak za formiranje izlazne datoteke . . 205
2.2.4. Program LINE CONSTANTS / CABLE CONSTANTS 207
2.2.4.1 Primena 207
2.2.4.2 Model voda sa konstantnim parametrima . . 209
2.2.4.3 π-ekvivalentni model voda 210
2.2.4.4 JMarti model voda 211
2.2.4.5 Matrični izlaz parametara voda 211
2.2.4.6 Parametri voda pozitivnog i nultog redosleda 212
2.2.4.7 Model kabla bez oklopa 212
2.2.4.8 Model kabla sa oklopom 213
2.2.5. Primeri proračuna prenapona izazvanih sklopnim operacijama rastavljačem u metalom oklopljenim, gasom SF_6 izolovanim postrojenjima 213
2.2.5.1 Opšta razmatranja 213
2.2.5.2 Elektromagnetni prelazni procesi u sekundarnim kolima mernih transformatora u SF_6 postrojenju 219
2.2.5.3 Proračun porasta potencijala metalnog oklopa gasom SF_6 izolovanog postrojenja izazvanog sklopnim operacijama rastavljačem . 229
2.3. Excel / Access 237
2.3.1. Uvod 237
2.3.2. Primena baza podataka u projektovanju visokonaponskih postrojenja 240
2.3.2.1 Kriterijumi za izbor visokonaponske opreme 240
2.3.2.2 Proračun karakterističnih vrednosti struja kvara 242
2.3.3. Primena baza podataka u izboru visokonaponske opreme 247
2.3.3.1 Definicije tipova baza podataka 247
2.3.3.2 Primer primene programa MS Excel 248
2.3.3.3 Primer primene programa MS Access 252
2.3.4. Primena Excel makroa u projektovanju u elektroenergetici 257
2.3.4.1 Izrada makroa u Excelu 257
2.3.4.2 Primeri primene makroa 261
2.3.5. Primena Excela u projektovanju napajanja telekomunikacione opreme 266

2.3.5.1 Tehnički opis napajanja jednosmernim naponom . . . 266
2.3.5.2 Tehnički proračuni . . . 268
2.4. AutoCAD . . . 272
2.4.1. Uvod . . . 272
2.4.2. Prostorni (3D) model turbogeneratora . . . 273
2.4.3. Proračun momenta inercije sabirnica . . . 279
2.4.4. Projektovanje gromobranske zaštite objekata opšte i posebne namene . . . 280
2.4.4.1 Opšta razmatranja . . . 280
2.4.4.2 Teorijske postavke proračuna nivoa zaštite i zaštitne zone . . . 281
2.4.4.3 Primeri proračuna zaštitne zone stambenog objekta . . . 288
2.4.4.4 Primer proračuna zaštitne zone objekta posebne namene . . . 289
2.4.5. Projektovanje gromobranske zaštite razvodnih postrojenja . . . 297
2.4.5.1 Opšta razmatranja . . . 297
2.4.5.2 Pregled metoda za procenu zaštitne zone razvodnih postrojenja kao objekata specijalne namene . . . 298
2.4.5.3 Primer proračuna zaštitne zone razvodnog postrojenja . . . 306
2.4.6. Projektovanje gromobranske zaštite nadzemnih vodova . . . 307
2.4.6.1 Opšta razmatranja . . . 307
2.4.6.2 Pregled metoda za procenu zaštitne zone nadzemnih vodova kao objekata ograničene opasnosti . . . 312
2.4.6.3 Organizacija programa . . . 315
2.4.6.4 Primeri procene zaštitne zone nadzemnog voda . . . 317
2.5. ANSYS . . . 320
2.5.1. Uvod . . . 320
2.5.2. Matematički osnovi metoda konačnih razlika i metoda konačnih elemenata . . . 322
2.5.2.1 Parcijalna diferencijalna jednačina . . . 323
2.5.2.2 Primena metoda konačnih razlika u proračunima električnog i magnetnog polja . 324
2.5.2.3 Metod konačnih elemenata . . . 333

2.5.3. Osnovi programa ANSYS 342
2.5.3.1 ANSYS okruženje 342
2.5.3.2 Grafički korisnički interfejs ANSYS-a 343
2.5.3.3 Tipovi ANSYS datoteka 351
2.5.3.4 Formiranje ANSYS modela 352
2.5.4. Principi formiranja 3D modela 355
2.5.4.1 Svrha modela 355
2.5.4.2 Tipični koraci procesa generisanja modela unutar ANSYS-a 358
2.5.4.3 Tipovi koordinatnih sistema 359
2.5.4.4 Korišćenje radne ravni 362
2.5.4.5 Pregled operacija modelovanja punih objekata 364
2.5.4.6 Oblikovanje modela pomoću logičkih operacija 370
2.5.4.7 Generisanje mreže elemenata 376
2.5.5. Primeri mehaničkog i električnog proračuna 385
2.5.5.1 Opis problema 386
2.5.5.2 Pristup problemu i potrebne pretpostavke . 386
2.5.5.3 Algoritam za analizu 388
Literatura 402

3. PRIMENA PROGRAMSKIH ALATA U IZRADI GRAFIČKE DOKUMENTACIJE 410
3.1. Uvod 410
3.2. Grafička dokumentacija 411
3.2.1. Elektrotehnički grafički simboli 411
3.2.2. Vrste električnih šema 411
3.2.3. Obeležavanje aparata i veza u šemama 418
3.3. EPLAN 423
3.3.1. Uvod 423
3.3.2. EPLAN koncept 432
3.3.3. Glavne funkcije CAE alata EPLAN Electric P8 . . 433
3.3.4. Primer primene alata EPLAN 434
3.4. Primena programa SIMARIS DESIGN i SIMARIS SIVACON za projektovanje i montažu niskonaponskih postrojenja 437
3.4.1. Uvod 437
3.4.2. Primena programa SIMARIS DESIGN 438
3.4.3. Primena programa SIMARIS SIVACON 456
Literatura 464

4. PRIMENA PROGRAMSKIH ALATA U UPRAVLJANJU PROJEKTIMA U ELEKTROENERGETICI 466
4.1. O projektu 466
4.1.1. Definicija projekta 466
4.1.2. Vrste projekata 466
4.1.3. Učesnici u realizaciji projekta 468
4.1.4. Sadržaj glavnog projekta 474
4.1.5. Faze u realizaciji projekta sa stanovišta investitora 481
4.1.6. Vrste ugovora 484
4.1.7. Primer ugovora 487
4.2. Osnovi upravljanja projektom 492
4.2.1. Ciklus projekta 492
4.2.2. Faze upravljanja projektom 493
4.3. Primeri upravljanja projektom 496
4.3.1. Primena programa Excel 496
4.3.1.1 Formiranje dinamičkih Gantovih dijagrama 497
4.3.1.2 Opis aktivnosti 498
4.3.2. Primena programa MS Project 500
4.3.2.1 Osnovi programa MS Project 500
4.3.2.2 Primena MS Projecta u izradi kompletnog projekta 503
4.3.2.3 Zaključna razmatranja 520
Literatura 521
SPISAK SKRAĆENICA 523
INDEKS KLJUČNIH REČI 526
ZAHVALNICA 529

PREDGOVOR

Projekat predstavlja svaki proces kojim se postiže neki cilj ili grupa ciljeva. Realizacija projekta je nezamisliva bez primene računara. Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici (Computer Aided Design in Power Systems) predstavlja važnu inženjersku disciplinu koja se izučava na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu skoro dve decenije. Primena računara u elektroenergetici obrađuje se kroz aspekte proračuna, izrade tehničke dokumentacije i upravljanja projektima.

U sklopu reformisane nastave na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu aspekti projektovanja i primene programskih alata izučavaju se na osnovnim studijama Energetskog odseka u okviru predmeta *Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici, Praktikum iz softverskih alata u elektroenergetici* i *Projekat iz projektovanja pomoću računara u elektroenergetici*, odnosno na doktorskim studijama smera za Elektroenergetske sisteme, u okviru predmeta *Primena programskih alata u elektroenergetici*.

Nastavak prethodno realizovanog monografskog dela - "Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici - programski alati", jeste monografsko delo "Projektovanje pomoću računara u elektroenergetici - primena programskih alata". Ovo delo odnosi se na primenu postojećih i samostalno razvijenih programskih alata u rešavanju niza problema iz oblasti projektovanja elektroenergetskih objekata i sistema. Materija je izložena u četiri poglavlja.

Prvo poglavlje odnosi se na modelovanje i simulacije pomoću računara u elektroenergetici. Složena problematika iz navedene oblasti prikazana je na originalan i ilustrativan način. Kroz obradu jedanaest originalnih primera čitaocu su ilustrovane sve faze koje je neophodno sprovesti u postupcima modelovanja i simulacija pomoću računara. Na primerima iz projektantske prakse obrađeni su koncepti modelovanja i simulacija pomoću računara, prikaz metoda za razvoj modela, principi izvršavanja simulacija pomoću računara i moguća ograničenja. Celokupan postupak prikazan je jezgrovito, korak po korak, od formulisanja i analize inženjerskog problema, do formiranja matematičkog modela, izbora računarskih metoda, formiranja programa i izvršavanja simulacija. Posebna pažnja posvećena je uzrocima mogućih grešaka u proračunima.

S obzirom da inženjeri elektrotehnike energetskog usmerenja često u praksi realizuju programske alate, od kojih neki imaju i komercijalan karakter, prikazana je neophodna dokumentacija koju bi jedan programski alat trebalo da sadrži, kao i postupak njegovog testiranja. Kao primer programskog alata sa svim neophodnim karakteristikama koje ga čine korisnički orijentisanim, u ovom poglavlju priložen je programski alat za analizu uzemljivačkih sistema pri dejstvu struje atmosferskog pražnjenja (GIC - Grounding Impulse Characteristics). Ovaj programski alat ostvaren je primenom savremenih programa MATLAB i Visual C++.

Proračuni predstavljaju sastavni deo projekta i neophodni su za izbor i proveru karakteristika elektroenergetske opreme. Primena programskih alata u elektroenergetskim proračunima razmatrana je u Drugom poglavlju. Iz mnoštva programa izdvojeni su najznačajniji programi, koji se danas primenjuju u elektroenergetskim proračunima. Ovi programi obrađeni su u pet odeljaka: MATLAB, EMTP/ATP, Excel & Access, AutoCAD i ANSYS.

U prvom odeljku razmatran je MATLAB koji predstavlja programski alat za rešavanje matematičkih problema, analizu podataka i vizuelizaciju. Ovaj programski alat dominantno je zastupljen u univerzitetskim centrima širom sveta i naučnoistraživačkim institutima, kao i u projektantskim biroima u cilju rešavanja mnogih inženjerskih problema. Primena ovog programa ilustrovana je kroz tri primera iz inženjerske prakse. U prvom primeru, primenom dodatnog modula Simulink proračunate su karakteristične vrednosti struje kvara, neophodne za izbor visokonaponske opreme. Primena ovog modula prikazana je na delu ekvivalentne šeme elektroenergetskog sistema. Tako dobijeni rezultati diskutovani su i upoređeni sa rezultatima određenim primenom klasičnog postupka proračuna. U drugom primeru prikazan je sopstveno razvijen programski alat SPLCAD (Software Power Line Computer Aided Design) za projektovanje srednjenaponskih nadzemnih vodova. Alat je realizovan primenom programa MATLAB 7.6.0, kao razvojne platforme za kreiranje korisničkog interfejsa. Kreiranje i rad sa bazama podataka ostvareni su primenom programa Microsoft Office Acess 2003 i Microsoft Office Excel 2003. Treći primer odnosi se na prikaz Simulink modela turbinskog regulatora hidroelektrane "Kokin Brod". Prikazan je deo komparativne analize numerički i eksperimentalno određenih rezultata za razmatran turbinski regulator.

Problemi pri projektovanju elektroenergetskih sistema i problemi vezani za planiranje i eksploataciju elektroenergetskih sistema često se

rešavaju primenom programskog alata EMTP (Electromagnetic Transient Program) / ATP (Alternative Transient Program), koji je opisan u drugom odeljku Drugog poglavlja. Prikazani su elementi pretprocesora, glavnog programa i postprocesora. Primena grafičkog pretprocesora ATPDraw ilustrovana je na primerima formiranja ekvivalentnih šema električnih kola. Prikazane su strukture ATP datoteka i način formiranja izlaznih datoteka. Dat je opis programa za proračun električnih parametara nadzemnih vodova i kablova. Primena programskog alata ATP ilustrovana je na primerima proračuna prelaznih procesa u metalom oklopljenim, gasom SF_6 izolovanim postrojenjima. Prvi primer odnosi se na numeričko i eksperimentalno određivanje elektromagnetnih prelaznih procesa u sekundarnim kolima mernih transformatora 123 kV trofazno oklopljenog, gasom SF_6 izolovanog postrojenja "Karlsruhe-Oberwald". Na drugom primeru prikazan je postupak za proračun potencijala metalnog oklopa 420 kV jednofazno oklopljenog, gasom SF_6 izolovanog postrojenja hidroelektrane "Višegrad".

Treći odeljak Drugog poglavlja odnosi se na primenu programa Excel & Access i sadrži tri dela. U prvom delu trećeg odeljka prikazane su neke mogućnosti primene baza podataka u projektovanju visokonaponskih postrojenja. Karakteristične vrednosti struja kvara, kao sastavni deo kriterijuma za izbor visokonaponske opreme, proračunate su primenom programskih jezika Visual Basic for Applications (VBA) i Visual Basic (VB). Različiti tipovi baza podataka sa elementima visokonaponske opreme urađeni su primenom programa MS Excel i MS Access. Diskutovani su osnovni principi arhitekture baza podataka i formiranja kriterijuma za filtriranje, zasnovanih na primeni programa MS Query i VBA. Ilustrovani su glavni elementi za pravilno kreiranje relacionih baza podataka u programu MS Access. Primena baza podataka prikazana je na primerima izbora visokonaponskih prekidača i rastavljača.

Savremeno projektovanje u elektroenergetici podrazumeva automatizaciju proračuna primenom makroa. U drugom delu trećeg odeljka prikazan je postupak za formiranje makroa kao VBA procedure. Primena makroa ilustrovana je na primerima proračuna ukupnog naelektrisanja i toplotnog impulsa injektirane struje u ispitivan objekat i automatizacije rada sa bazama podataka. U trećem delu trećeg odeljka demonstrirana je primena aplikacija iz programskog paketa Microsoft Office u projektovanju napajanja telekomunikacione opreme upravljačko-komutacionog centra. Mogućnosti Excela u radu sa podacima i u njihovoj obradi, kao i dinamičko povezivanje podataka između progra-

ma Excel i Word, prikazane su na primeru proračuna dela elemenata sistema za napajanje telekomunikacione opreme.

Četvrti odeljak Drugog poglavlja posvećen je AutoCAD-u kao moćnom programskom alatu za računarsko projektovanje. Prikazani su neki aspekti naprednog korišćenja AutoCAD-a u računarskom projektovanju elektroenergetskih postrojenja i objekata. Prvi primer ilustruje efikasnu tehniku prostornog (3D) modelovanja najsloženijih objekata kao što je turbogenerator. Proračun fizičkih karakteristika 3D modela izvršen je na primeru momenta inercije sabirnica u obliku U-profila. Konkretno razvijen programski alat za projektovanje gromobranske zaštite objekata opšte i posebne namene realizovan je primenom programa AutoLISP, Visual LISP i VBA. Primenom ovog programskog alata urađeni su proračuni zone zaštite od atmosferskog pražnjenja za stambeni objekat, objekat posebne namene, razvodno postrojenje i nadzemni vod.

Sve češća potreba za prostornim (3D) modelovanjem u elektroenergetici i način rešavanja ovih problema ilustrovani su kroz opis i primenu programa ANSYS (ANalysis SYStems), koji predstavlja jedan od najefikasnijih programskih alata u toj oblasti. Ovaj program jeste predmet razmatranja poslednjeg, petog, odeljka Drugog poglavlja. Prikazani su: matematički osnovi metoda konačnih razlika i metoda konačnih elemenata, osnovi programa ANSYS, principi formiranja 3D modela i primeri mehaničkog i električnog proračuna.

Grafička dokumentacija predstavlja sastavni deo projekta. Primena programskih alata u izradi grafičke dokumentacije jeste predmet Trećeg poglavlja. Opisane su najčešće korišćene vrste električnih šema i primeri njihovog formiranja. Prikazani su elektrotehnički grafički simboli i obeležavanje aparata i veza u šemama. Primena programa AutoCAD, kao osnovnog alata za izradu grafičke dokumentacije u elektroenergetici, jasno je izložena na primerima dispozicija i jednopolnih šema konkretne transformatorske stanice. Razmatrani su elementi programa EPLAN koji omogućava efikasno formiranje šema vezivanja i delovanja. Primena nove verzije (R.6.1) programa SIMARIS SIVACON za projektovanje i montažu niskonaponskih postrojenja, tipa 8PT SIEMENS SIVACON prikazana je na primeru jedne transformatorske stanice čija je jednopolna šema kreirana programom SIMARIS DESIGN. Na taj način je, integralno, prikazan skup programskih alata koji omogućavaju potpunu automatizaciju izrade grafičke dokumentacije projekata u elektroenergetici, čime se u velikoj meri povećava efikasnost u radu.

U Četvrtom poglavlju razmatrana je primena programskih alata u upravljanju projektima u elektroenergetici. U prvom odeljku analizirani su osnovni elementi jednog projekta i učesnici u njegovoj realizaciji.

U drugom odeljku prikazani su osnovi upravljanja projektom, dok su u trećem odeljku ilustrovani primeri upravljanja konkretnim projektom tehnološkog razvoja kroz primenu programa MS Excel i MS Project.

Literatura je data po poglavljima. Na kraju monografskog dela priloženi su spisak skraćenica i indeks ključnih reči.

Monografsko delo ima edukativan, inženjerski i naučni aspekt. S obzirom da sadrži niz primera iz direktne primene programskih alata u projektantskoj praksi u oblasti elektroenergetike, monografsko delo može biti od koristi stručnjacima koji se bave projektovanjem u elektroenergetici. Edukativan i naučni aspekt potvrđeni su publikovanjem većeg broja radova u časopisima različitih kategorija, kao i na konferencijama. Iz tog razloga materija je namenjena i savladavanju nastave iz oblasti projektovanja elektroenergetskih objekata i sistema na svim nivoima studija.

Autor zahvaljuje saradnicima na projektima i recenzentima na uloženom trudu i sugestijama. U početnoj fazi tehničke obrade monografije korisne sugestije dao je Aleksandar Prvulj, na čemu autor zahvaljuje. Posebnu zahvalnost autor upućuje lektoru Anđelki Kovačević i Željku Hrčeku koji je s velikom umešnošću tehnički obradio monografsko delo, kao i dizajneru korica Zorici Marković. Autor zahvaljuje organizacijama navedenim u zahvalnici bez kojih izdavanje ovog monografskog dela ne bi bilo moguće.

Autor će s pažnjom razmotriti sugestije korisnika monografskog dela koje mogu dostaviti na mail adrese:

zstojkovic@etf.rs i zlatan_stojkovic@yahoo.com.