

Knowledge triangle for a low carbon economy

KALCEA

Laboratory report - teaching material

Edukativni softverski paket za analizu EES - epsa
Matlab GUI-based software package for power
system analysis

Jordan Radosavljević
maj 2022.

Sadržaj

1. Uvod	3
2. Modul za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama	5
3. Modul za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama	8
4. Modul za proračun optimalnih tokova snaga	11
5. Modul za proračun kratkih spojeva	15
6. Modul za analizu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema	18
7. Modul za analizu tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema	20
Literatura	23

1. Uvod

Ovde je opisan edukativni softverki paket za analizu elektroenergetskih sistema (EES). Naziv softverskog paketa je **epsa**. Program je razvijen u MATLAB-u u formi GUI aplikacije. Sadrži 6 specijalizovanih modula, i to za:

1. Proračun tokova snaga u prenosnim mrežama
2. Proračun tokova snaga u distributivnim mrežama
3. Proračun optimalnih tokova snaga
4. Proračun kratkih spojeva
5. Analizu tranzijentne stabilnosti u jednomašinskom sistemu
6. Analizu tranzijentne stabilnosti u višemašinskom sistemu.

Specijalizivani moduli se baziraju na metodama i algoritmima koji su izloženi u korespondentnim poglavlјima udžbenika [1]. Prva tri programska modula implementiraju metode i algoritme za proračun tokove snaga. Programski modul za proračun kratkih spojeva zasniva se na matričnoj metodi, a programski moduli 5 i 6 predstavljaju programsku realizaciju metoda za analizu tranzijente ugaone stabilnosti jedomašinskog i višemašinskog EES.

Softverski paket epsa ima nekoliko ciljeva. Prvi cilj je unapređenje i inoviranje sadržaja predmeta Analiza EES 1 i Analiza EES 2 kroz primenu specijalizovanih programskih modula kao pomoćnog sredstva u nastavi iz odgovarajućih oblasti. Pored toga, korišćenjem ovog softverskog paketa studenti i inženjeri mogu naučiti kako se kreiranju programske aplikacije za rešavanje problema u EES-u, i time postati aktivni učesnici u stvaranju softverskih alata, a ne samo korisnici koji slede uputstva proizvođača komercijalnih softvera za analizu EES.

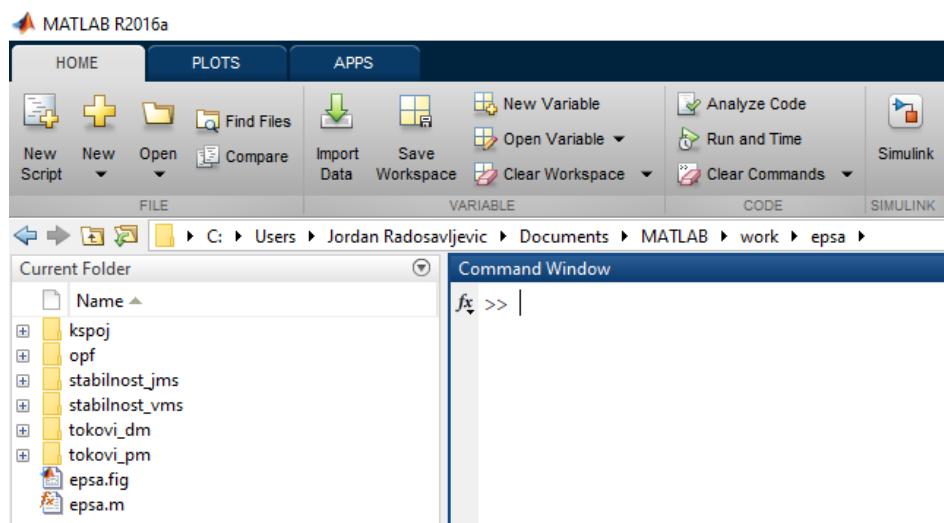
U nastavku je prikazan izgled, opisana struktura, funkcije, komponente i način korišćenja programskog paketa i njegovih pojedinačnih modula.

Svaki od specijalizovanih modula predstavlja posebnu celinu, koja se može koristiti nezavisno od glavnog programa **epsa**. Programski modul čine fajlovi u obliku funkcijskih ili skript programa i datoteka smeštenih u jednom folderu. Svih 6 foldera, zajedno sa glavnim programom **epsa** grupisani su u zajedničkom folderu epsa, kako bi bilo moguće interaktivno upravljanje i prelaz iz glavnog programa ka pojedinačnim modulima.

Programski paket kao celina, kao i njegove komponente otvorenog su tipa. To znači da se mogu menjati, korigovati, proširivati, dodavati nove funkcije, komponente i moduli, u skladu sa potrebama i zahtevima korisnika. Kao takav predstavlja odličan pomoćni alat za studente pri izradi projektinh zadataka, kao i za inženjere koji se ozbiljnije bave analizom EES-a, u smislu razvoja novih funkcija i komponenti.

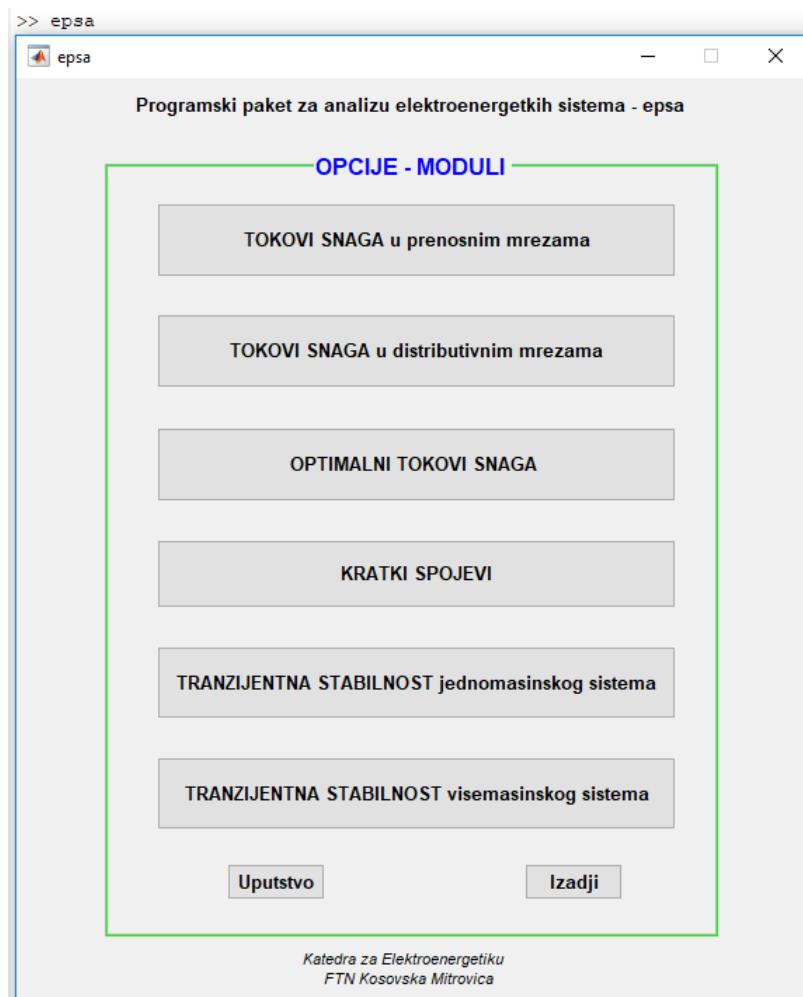
Programski paket je dostupan na linku [2].

Da bi programski paket mogao da se pokrene i koristi, potrebno je da se folder **epsa** preuzme sa sajta i postavi na odgovarajuću lokaciju na računaru. Nakon pokretanja MATLAB-a, treba folder epsa postaviti kao trenutno aktivan u prozoru tekućeg direktorijuma, kao na slici 1.1.



Slika 1.1 Folder programskog paketa **epsa** u tekućem direktorijumu MATLABA.

Pokretanje glavnog programa se vrši upisivanjem komande **epsa** u komandni prozor i pritiskom na taster Enter. Nakon toga, na ekranu se prikazuje glavni prozor programa **epsa**, kao na slici 1.2.



Slika 1.2 Glavni prozor programskog paketa **epsa**

2. Modul za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama

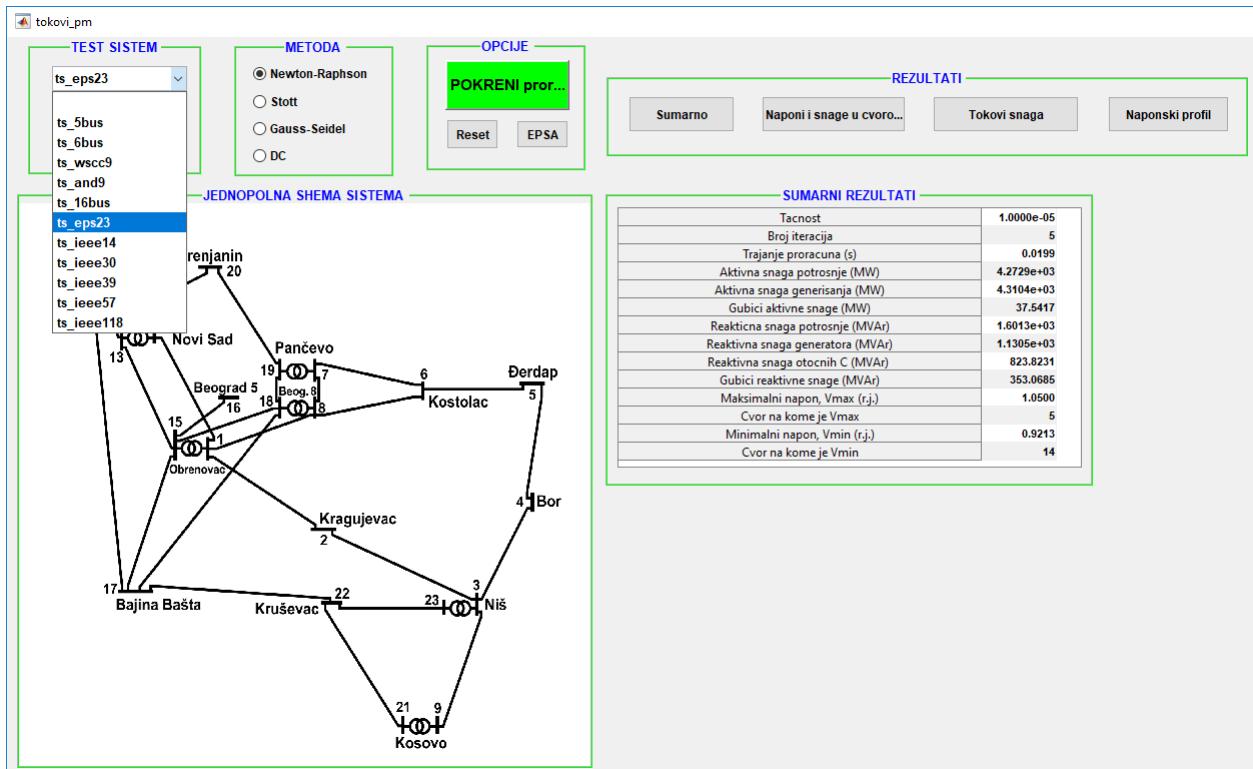
Izborom opcije **TOKOVI SNAGA** u prenosnim mrezama na glavnom prozoru programskog paketa **epsa**, aktivira se programski modul **tokovi_pm** za proračun tokova snaga u prenosnim mrežama, i otvara prozor ovog programskog modula. Fajlovi modula smešteni su u folder **tokovi_pm**. Drugi način za aktiviranje ovog specijalizovanog modula je da se folder **tokovi_pm** postavi kao trenutno aktivan u tekućem direktorijumu MATLAB-a, i onda u komandni prozor upiše komandu **tokovi_pm**.

Pri razvoju ovog modula cilj je bio da se obuhvate glavni koraci pri rešavanju problema tokova snaga u prenosnim mrežama EES-a. To su sledeći koraci:

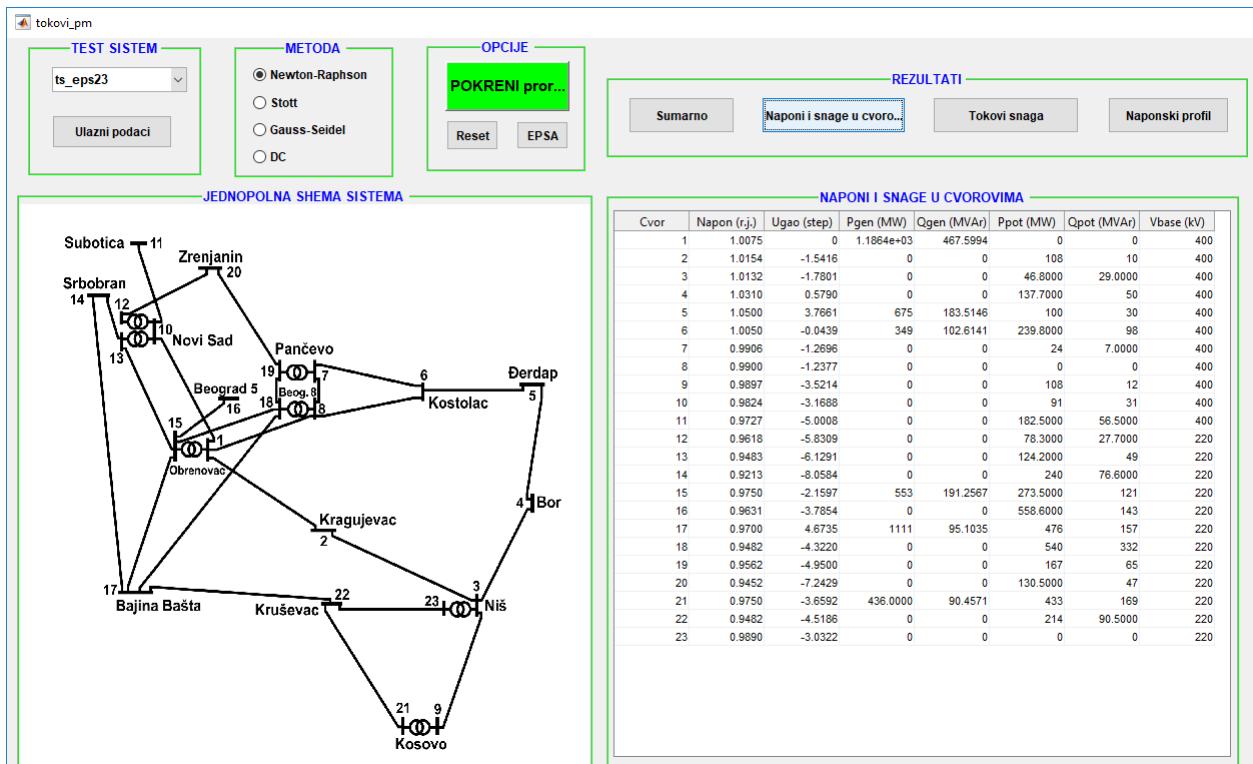
- (i) izbor test sistema i uređivanje parametara sistema;
- (ii) izbor metode za proračun tokova snaga;
- (iii) izvršavanje programa;
- (iv) prikaz rezultata na pregledan i logičan način;
- (v) analiza rezultata proračuna.

Na slici 2.1 je prikazan izgled prozora programskog modula **tokovi_pm**. Kao što se na toj slici može videti on se sastoji od sledećih elemenata:

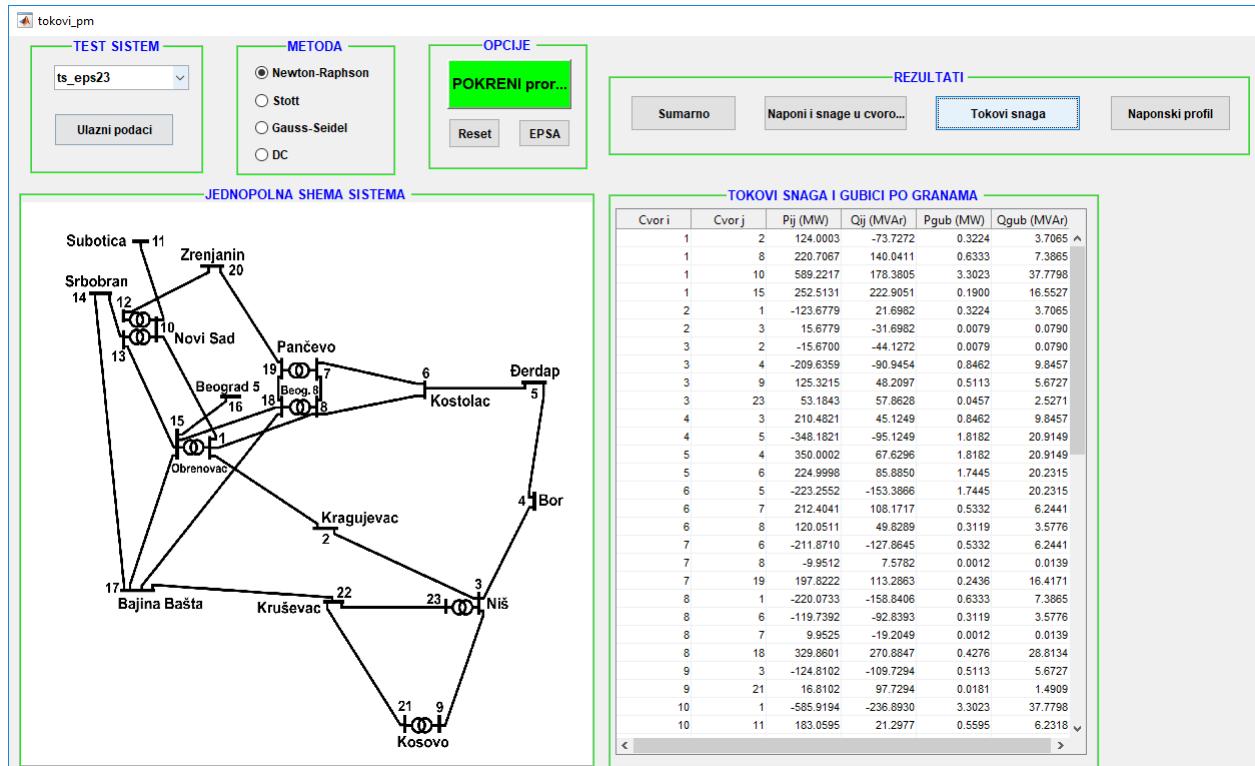
1. Panel TEST SISTEM, koji sadrži padajući meni i jedan taster. U padajućem meniju se vrši izbor test sistema. Rasploživo je 11 test sistema, uključujući uprošćeni 220 kV i 400 kV prenosni EES Srbije, kao i 7 standardnih IEEE test sistema sa 9, 14, 30, 39, 57, i 118 čvorova. Pritiskom na taster **Ulagani** podaci otvara se ulazna datoteka koja sadrži podatke o izabranom test sistemu. To su podaci o konfiguraciji mreže, parametrima elemenata mreže, specificiranim snagama i naponima u čvorovima mreže, tipovima čvorova, kao i početna poglađenja nepoznatih napona u čvorovima zapisanih u okviru dve matrice: **mreza** i **cvorovi**. Korisnik može da menja ove podatke prema svojim potrebama. U samoj datoteci data su detaljna objašnjenja o strukturi matrica **mreza** i **cvorovi**, tj. o značenju pojedinih kolona ovih matrica, što je od izuzetne važnosti za pravilno upisivanje podataka o sistemu.
2. U panelu METODA korisnik bira metodu za rešavanje tokova snaga. Ponuđene su standarne metode proračuna: Njutn-Rapsonova, Gaus-Sejdelova, Stotova i DC metoda.
3. Nakon izbora test sistema i metode, proračun tokova snaga se startuje pritiskom na taster **POKRENI proracun**.
4. Na panelu REZULTATI su tasteri za izbor prikaza različitih segmenata rezultata proračuna. Sumarni rezultati, kao što su tačnost, broj iteracija proračuna, ukupna snaga potrošnje, ukupna snaga generisanja, ukupni gubici snaga, maksimalna i minimalna vrednost napona, itd., prikazuju se odmah nakon izvršavanja programa (slika 2.1). Pritiskom na taster **Naponi** i **snage cvorova** prikazuju se izračunate izračunate vrednosti napona i snaga u čvorovima sistema, kao na slici 2.2. Taster **Tokovi snaga** prikazuje rezultate proračuna tokova snaga i gubitke snaga po granama mreže, kao na slici 2.3. Naponski profil sistema se prikazuje pritiskom na taster **Naponski profil**, kao na slici 2.4.



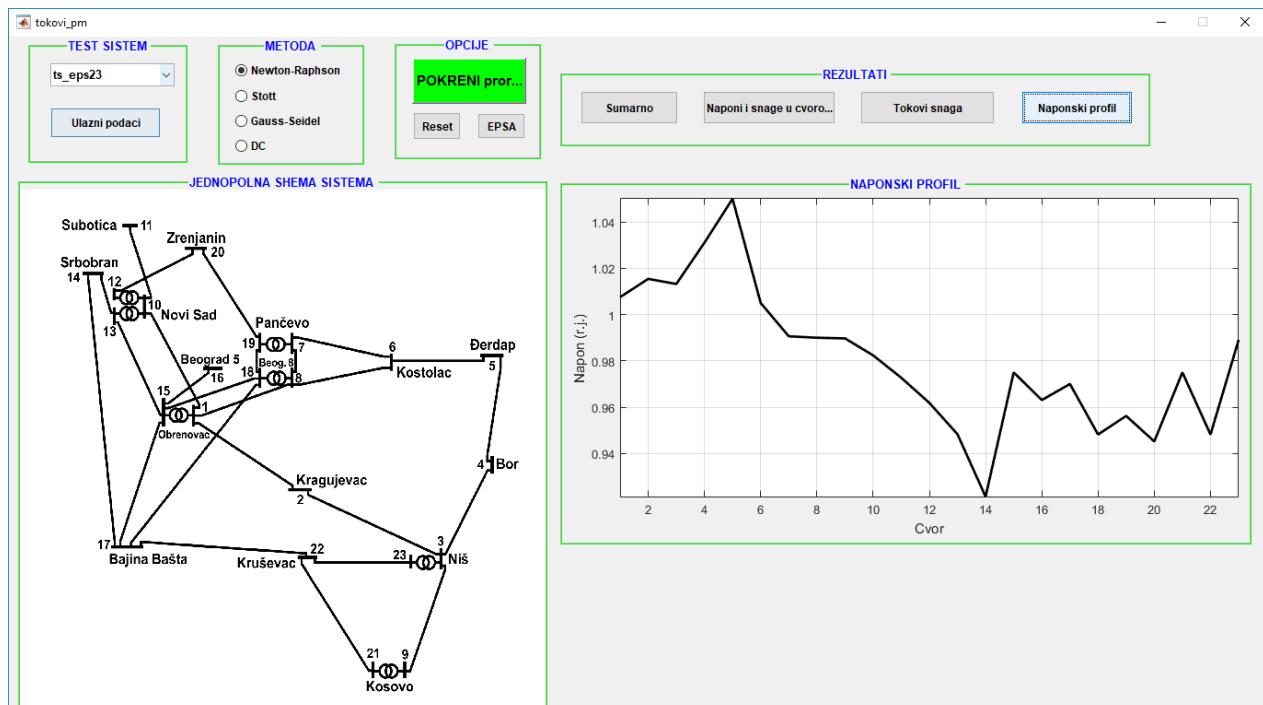
Slika 2.1 Prozor programskog modula tokovi_pm



Slika 2.2 Rezultati: naponi i snage u čvorovima



Slika 2.3 Rezultati: tokovi snaga i gubici po granama.



Slika 2.4 Rezultati: naponski profil sistema

Pritiskom na taster Reset briše se sadržaj ekrana i omogućava novi proračun, na istom ili drugom test sistemu, sa izabranom metodom i ulaznim podacima.

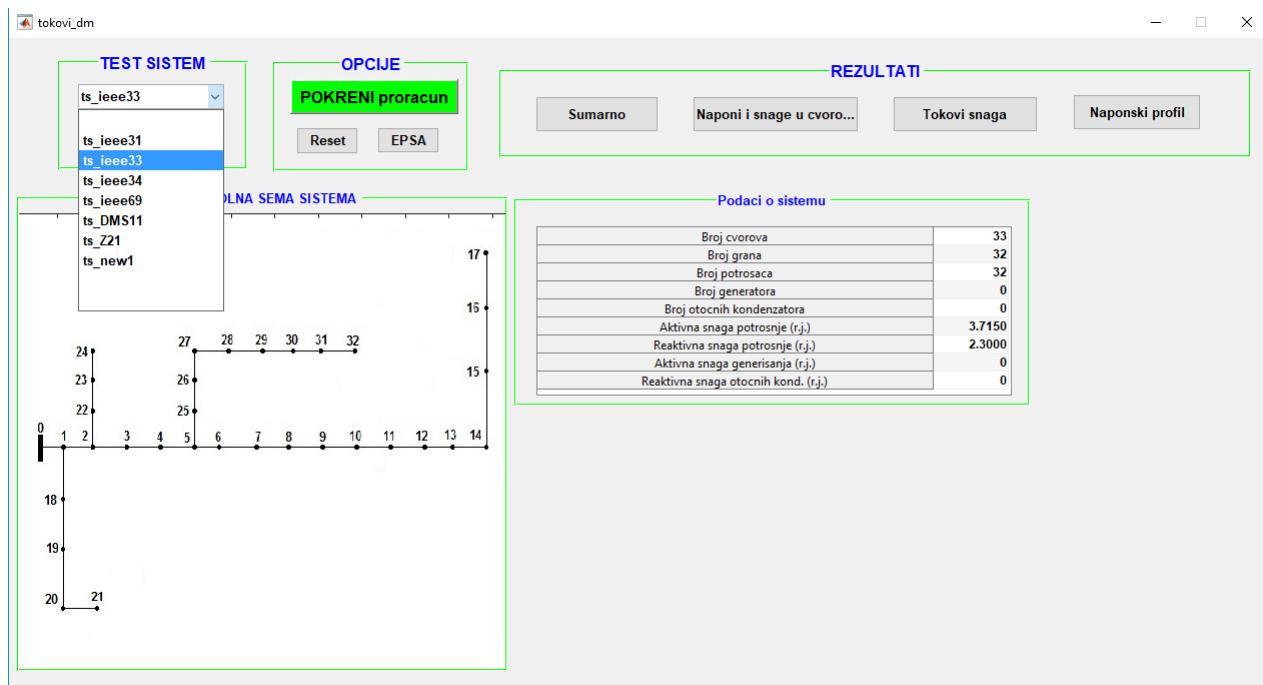
Povratak na glavni prozor softverskog paketa ostvaruje se pritiskom na taster EPSA.

3. Modul za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama

Programskom modulu **tokovi_dm** za proračun tokova snaga u distributivnim mrežama pristupa se pritiskom na taster TOKOVI SNAGA u distributivnim mrezama na glavnom prozoru **epsa** ili postavljanjem foldera **tokovi_dm** na putanji tekućeg direktorijuma MATLAB-a i upisivanjem komande **tokovi_dm** u komandni prozor. U ovom modulu je implementirana metoda nazad/napred [1].

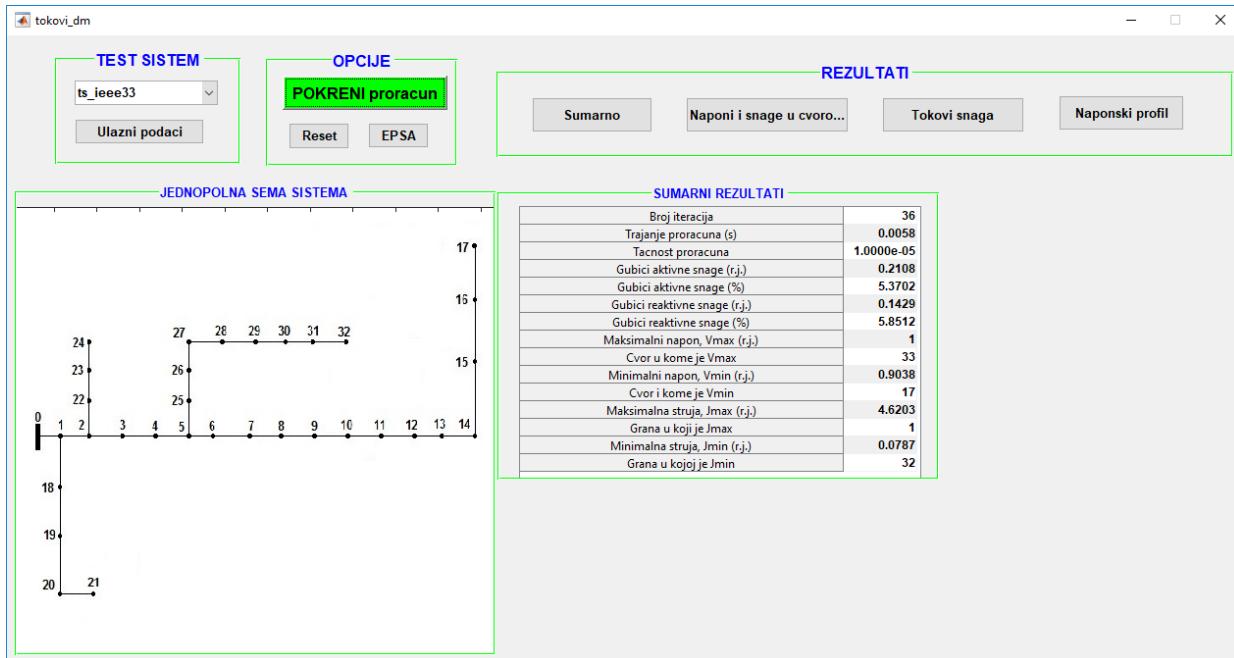
Na slici 3.1 prikazan je prozor ovog specijalizovanog modula, koji se sastoji iz nekoliko elemenata, i to:

1. Panel TEST SISTEM sadrži padajući meni taster Ulazni podaci. U padajućem meniju se bira test sistem na kome će se obaviti proračun. Raspoloživo je 6 test sistema, od kojih su četiri standardna IEEE test sistema sa 31, 33, 34 i 69 čvorova. Selektovanjem nekog test sistema automatski se prikazuju jednopolna šema i osnovni podaci o njemu, kao što su brojevi čvorova, grana, potrošača, generatora, kondenzatora, ukupna snaga potrošnje, generisanja, itd. Taster Ulazni podaci otvara ulaznu datoteku sa podacima o izabranom test sistemu. To su podaci o konfiguraciji mreže, parametrima elemenata mreže, specificiranim snagama i naponima u čvorovima mreže, tipovima čvorova, kao i početna poglađenja nepoznatih napona u čvorovima zapisanih u dvema matricama: **mreza** i **cvorovi**, kao kod modula **tokovi_pm**. Korisnik ovde može da menja podatke o sistemu prema svojim potrebama. U samoj datoteci data su detaljna objašnjenja o strukturi ulaznih matrica, tj. o značenju njihovih pojedinih kolona.

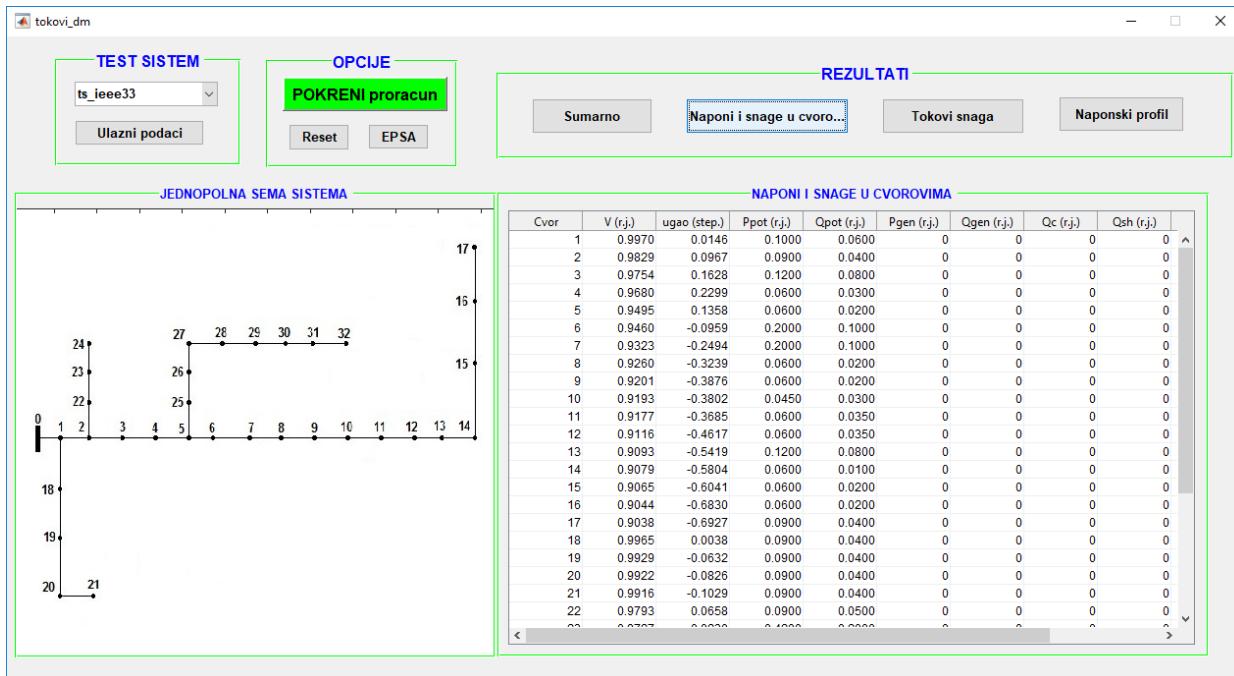


Slika 3.1 Prozor modula **tokovi_dm**.

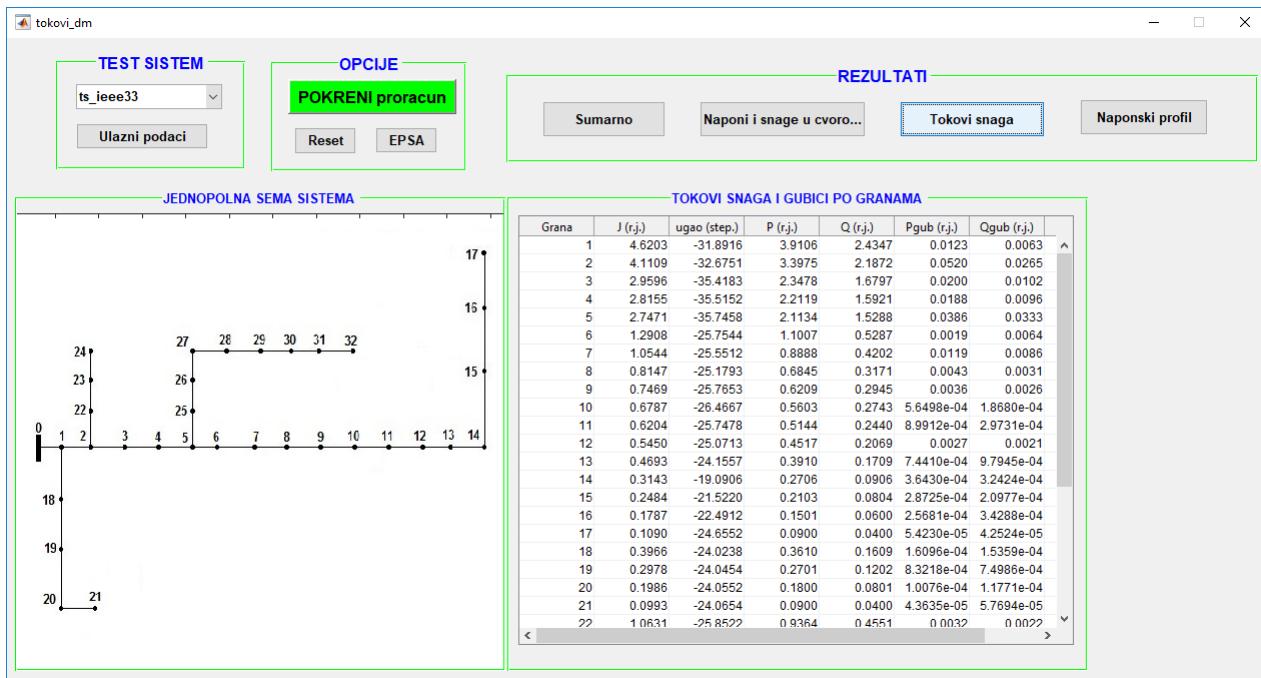
2. Nakon izbora tesat sistema korisnik može pokrenuti proračun pritiskom na taster POKRENI proracun.
3. Preko tastera na panelu REZULTATI vrši se izbor prikaza različitih segmenata rezultata proračuna. Sumarni rezultati, kao što su broj iteracija, tačnost proračuna, gubici snaga, maksimalna i minimalna vrednost napona i struja, itd., prikazuju se odmah nakon izvršavanja programa (slika 3.2). Pritiskom na taster Naponi i snage u cvorovima prikazuju se izračunati naponi i snage u čvorovima mreže, kao na slići 3.3. Taster Tokovi snaga prikazuje tokove snaga i gubitke snaga po granama mreže, kao na slići 3.4. Naponski profil sistema se prikazuje pritiskom na taster Naponski profil, kao na slići 3.5.



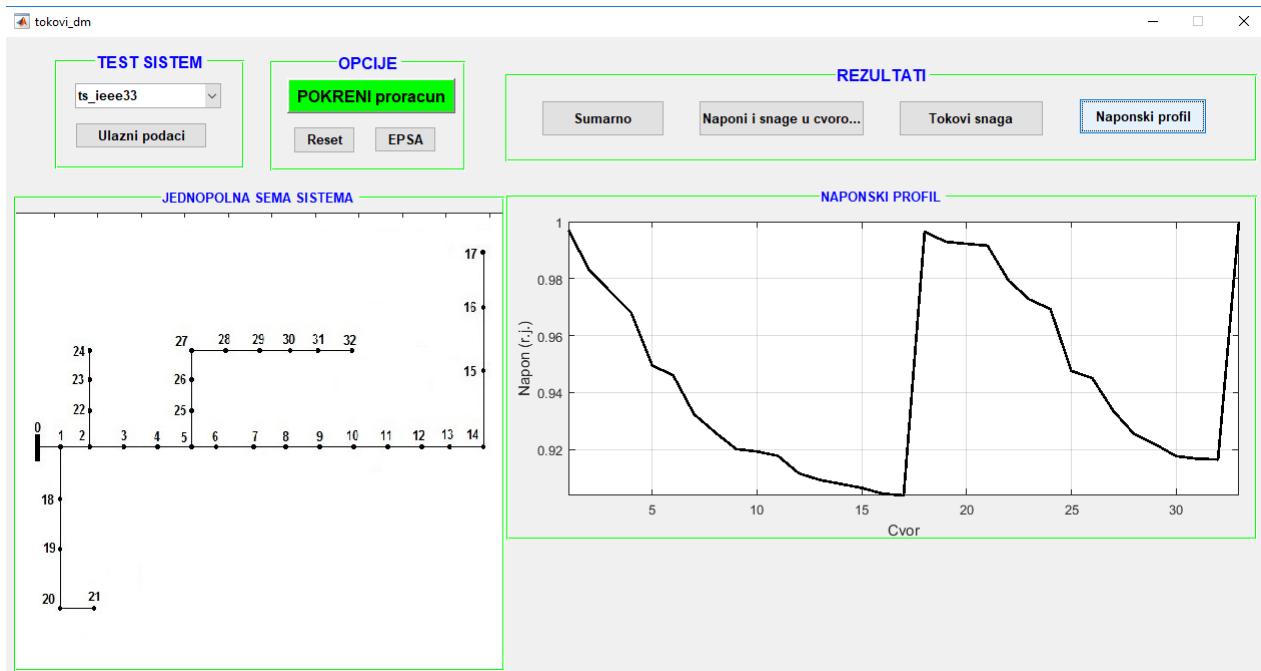
Slika 3.2 Modul tokovi_dm: sumarni rezultati.



Slika 3.3 Modul tokovi_dm: naponi i snage u čvorovima.



Slika 3.4 Modul **tokovi_dm**: tokovi snaga i gubici po granama mreže.

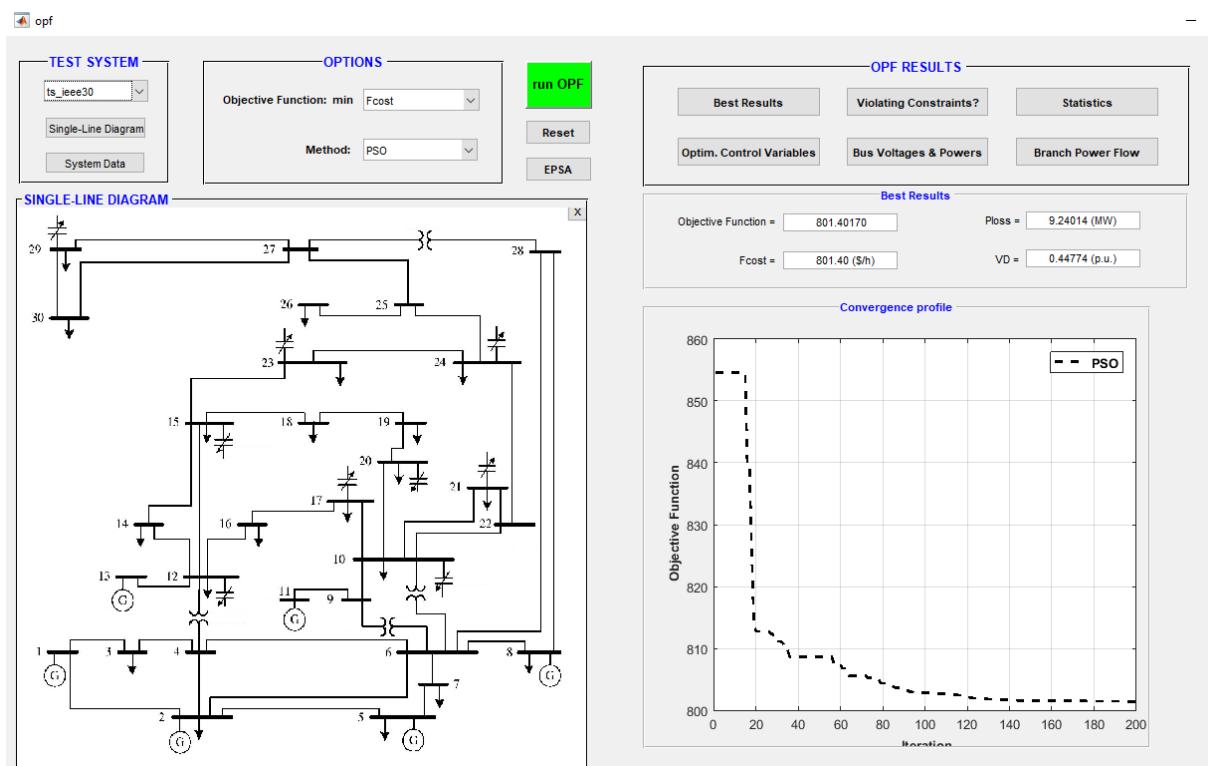


Slika 3.5 Modul **tokovi_dm**: naponski profil.

4. Modul za proračun optimalnih tokova snaga

Modul **opf** je specijalizovani modul za proračun optimalnih tokova snaga primenom metaheurističkih populacionih optimizacionih metoda. Korisnik ima mogućnost izbora test sistema, objektivne funkcije i metode proračuna. Rezultati programa su optimalna vrednost objektivne funkcije, optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih, karakteristika konvergencije upotrebljene optimizacione metode, naponi i snage u čvorovima i tokovi snaga po granama sistema pri optimalnim vrednostima upravljačkih promenljivih, informacija o narušenosti ograničenja, kao i statistički podaci o rezultatima u slučaju kada se proračun ponavlja više puta uzastopno, obzirom na stohastičku prirodu metoda.

Na slici 4.1 prikazan je prozor programa **opf**. Prikazan je primer izvršenja programa na IEEE 30 test sistemu, gde ja kao objektivna funkcija odabrana minimizacija troškova goriva generatora (Fcost), a kao metoda PSO - optimizacija rojem čestica.



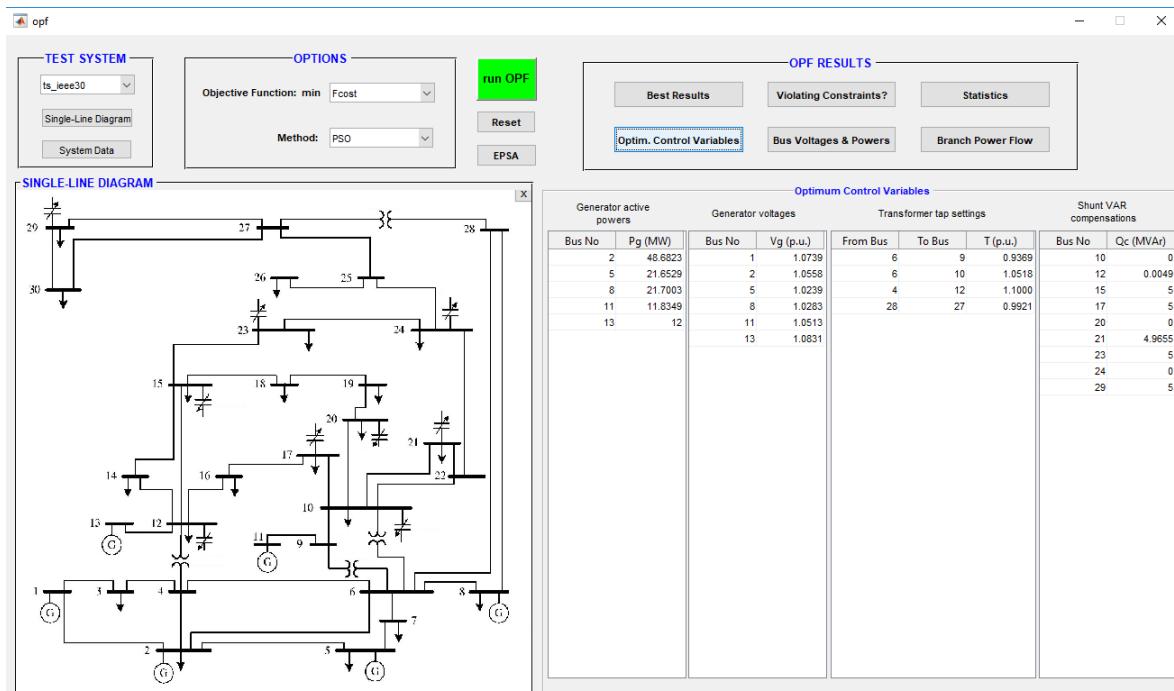
Slika 4.1 Prozor softverskog modula **opf**

Kao što se može videti na slici 4.1, prozor programa **opf** sastoji se od nekoliko segmenata:

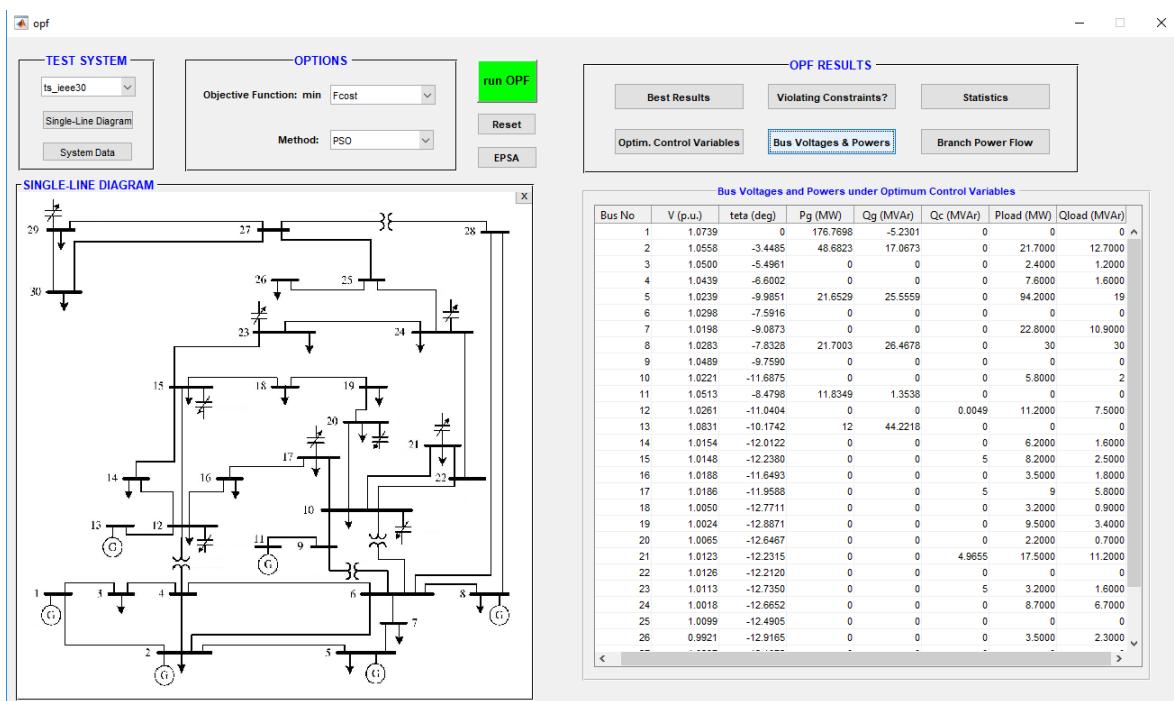
- U panelu TEST SYSTEM se preko padajućeg menija bira test sistem od 7 ponuđenih standardnih IEEE test sistema, i to sa 6, 9, 14, 30, 39, 57, i 118 čvorova. Svi podaci o izabranom sistemu su smešteni u posebnom fajlu koji se otvara pritiskom na taster System Data. Ovi podaci se mogu uređivati u skladu sa potrebama korisnika.
- U panel OPTIONS se preko dva padajuća menija vrši izbor objektivne funkcija i metode proračuna optimalnih tokova snaga u izabranom test sistemu. Raspoloživo je 6 varijanti

objektivnih funkcija, kao što su: minimizacija troškova goriva generatora (F_{cost}), gubitaka aktivne snage (P_{loss}), odstupanja napona u čvorovima (VD), kao i simultane minimizacije kombinacija ovih veličina. U drugom padajućem meniju bira se metoda proračuna od 12 ponuđenih, i to: PSO, GSA, PSOGSA, ABC, WDO, FFA, GWO, CS, MSA, BSA, TLBO i JANA. Izborom određene metode otvara se panel gde je potrebno podešiti algoritamske parametre ili prihvati preporučene vrednosti ovih parametara.

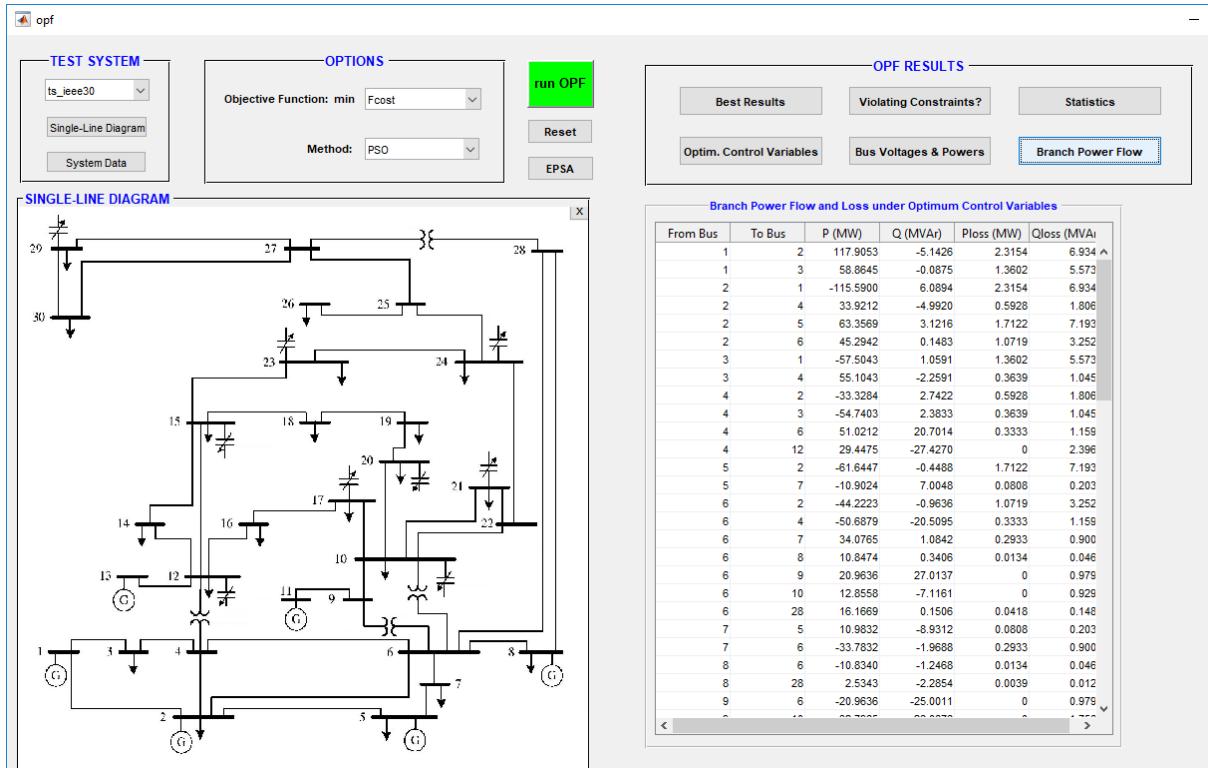
3. Nakon izbora odgovarajućih opcija na panelima TEST SYSTEM i OPTIONS, korisnik može startovati program pritiskom na taster runOPF.
4. U panelu OPF RESULTS grupisani su tasteri za izbor različitih segmenata rezultata koje nudi program. Optimalna vrednost objektivne funkcije i karakteristika konvergencije prikazuju se odmah nakon izvršenja programa, kao na slici 4.1. Pritiskom na taster Optimum Control Variables prikazuju se optimalne vrednosti upravljačkih (kontrolnih) promenljivih, kao što su aktivne snage generatora, moduli napona generatora, prenosni odnosi transformatora, i reaktivne snage otočnih VAR kompenzata, kao na slici 4.2. Pritiskom na taster Bus Voltages & Powers prikazuju se naponi i snage u čvorovima sistema pri optimalnim vrednostima upravljačkih promenljivih, kao na slici 4.3. Tokovi snaga i gubici po granama sistema pri delovanju optimalnih vrednosti upravljačkih promenljivih mogu se videti pritiskom na taster Branch Power Flow, slika 4.4. Važan pokazatelj relevantnosti dobijenih rezultata jeste da li su narušena ograničenja zavisnih promenljivih u sistemu, slika 4.5.



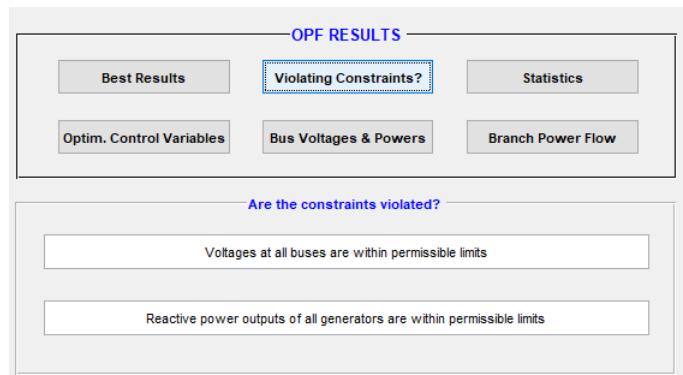
Slika 4.2 Modul opf: optimalne vrednosti upravljačkih promenljivih.



Slika 4.3 Modul opf: naponi i snage u čvorovima.



Slika 4.4 Modul opf: tokovi snaga i gubici po granama.

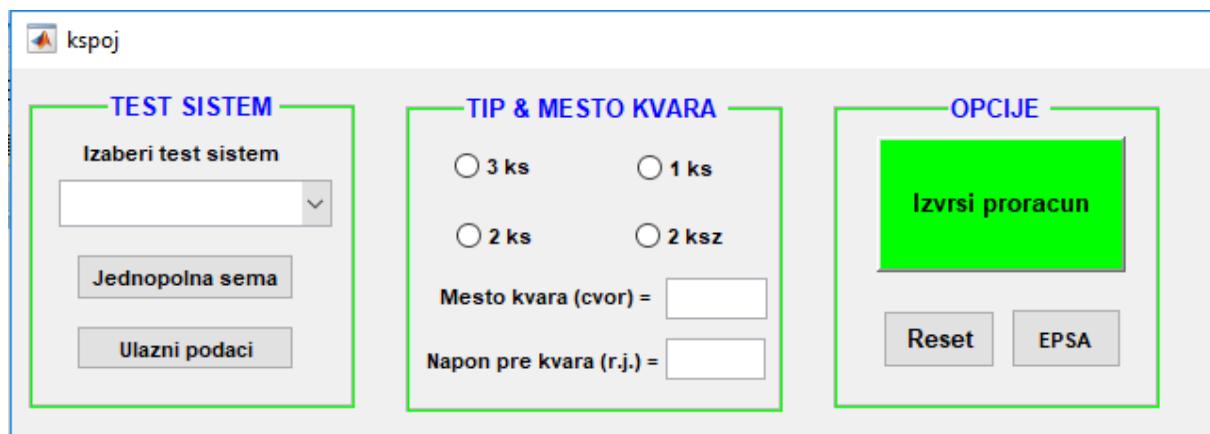


Slika 4.5 Modul **opf**: narušenost ograničenja.

5. Modul za proračun kratkih spojeva

Modul **kspoj** programskega paketa **epsa** napravljen je u MATLAB GUI programskom okruženju i služi za proračun kratkih spojeva, tj. proračun nepoznatih struja i napona u EES-u za vreme trajanja kratkih spojeva. Proračun kratkih spojeva vrši se matričnim postupkom, korišćenjem matrice impedansi nezavisnih čvorova. EES je određen poznavanjem matrice impedansi čvorova, za čije formiranje se primenjuje algoritam korak po korak.

Izborom opcije KRATKI SPOJEVI na glavnom prozoru programskega paketa **epsa** na ekranu se prikazuje prozor programskega modula **kspoj**, kao na slici 5.1. Sa slike se može uočiti da je interfejs podeljen na segmente koji jasno upućuju na EES za koji treba obaviti proračun, parametre kvara u pogledu izbora tipa kvara, mesta kvara (sabirnice na kojoj se kvar dogodio), napona pre kvara i na komande koje se izvršavaju.



Slika 5.1 Modul **kspoj** nakon aktiviranja.

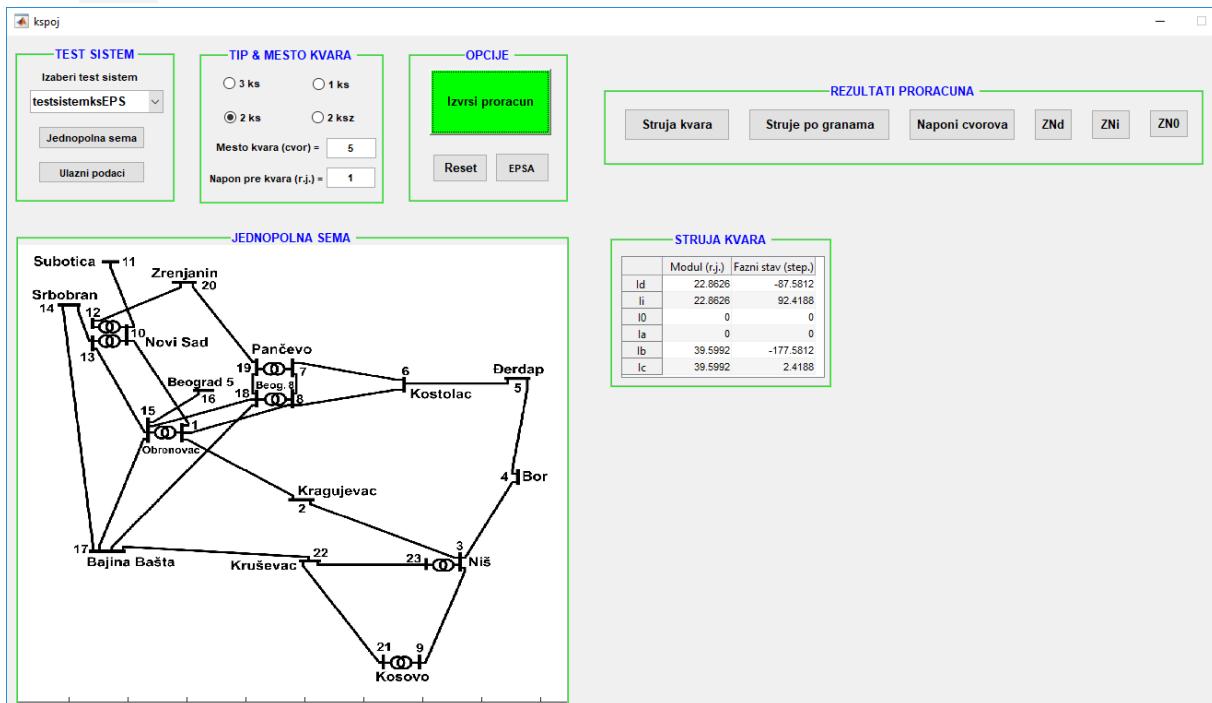
U okviru panela TEST SISTEM iz padajućeg menija treba izabrati EES na kome će se izvršiti proračun. U ponudi su elektroenergetski sistem Srbije (400 kV i 220 kV EPS), zatim jedan test sistem sa 9 čvorova, IEEE 14 i IEEE 30 standardni test sistemi i test sistem koji je ostavljen da korisnik sam formira. Nakon izbora test sistema, moguće je prikazati njegovu jednopolnu šemu i ulazne podatke o sistemu. Pritiskom na taster Ulazni podaci otvara se datoteka u kojoj su zapisani podaci o konfiguraciji i parametrima elemenata sistema direktnog, inverznog i nultog redosleda (matrice mrezaksd, mrezaksi i mrezaks0). Tu korisnik ima mogućnost izmene podataka ili unošenje podataka za potpuno novi sistem.

Na panelu TIP & MESTO KVARA štikliranjem određene opcije korisnik bira tip kvara za koji treba izvršiti proračun. Pored trofaznog kratkog spoja (3 ks), mogu se izabrati jednofazni kratki spoj (1 ks), dvofazni kratki spoj (2 ks) i dvofazni kratki spoj sa zemljom (2 ksz). Osim toga, od korisnika se zahteva da unese podatke o mestu kvara (unosi se broj čvora gde se desio kvar) i naponu na mestu kvara pre kvara. Proračun se sprovodi u sistemu relativnih jedinica, a za napon na mestu kvara pre kvara obično se unosi 1 r.j.

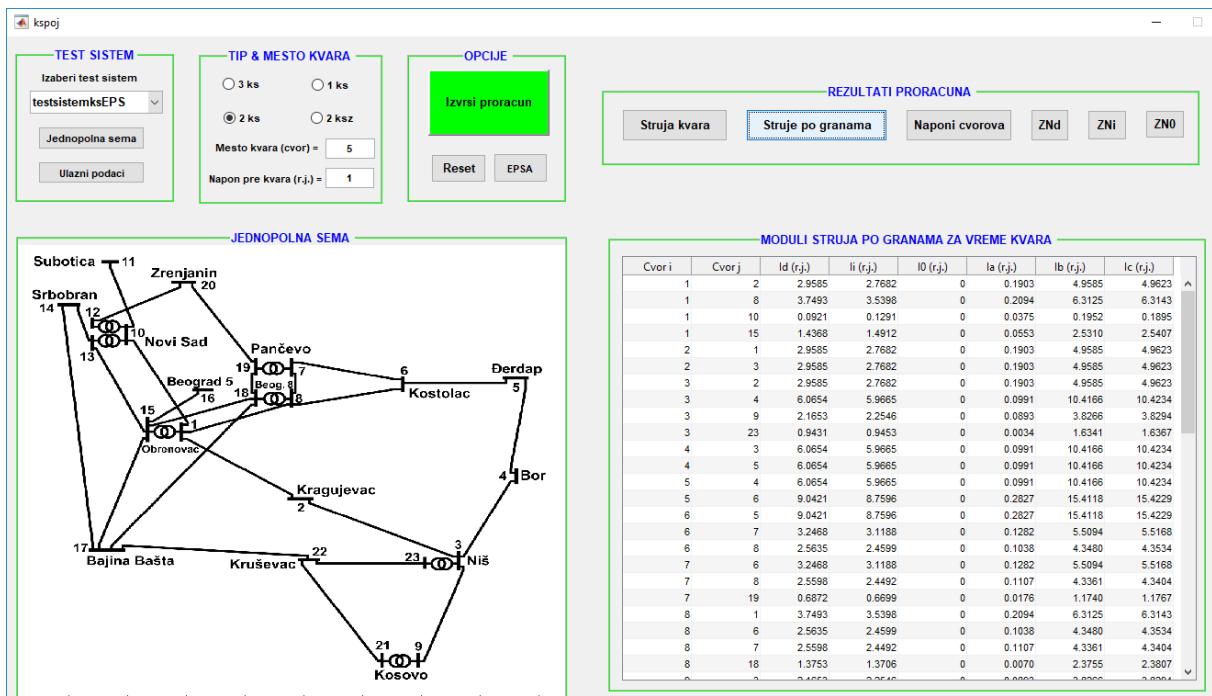
Proračun se startuje pritiskom na taster Izvrši proracun. Na slici 5.2 prikazan je primer primene programa na EES Srbije (EPS) za slučaj dvofaznog kratkog spoja na sabirnicama 5, pri naponu na mestu kvara pre kvara od 1 r.j.

U panelu REZULTATI PRORAČUNA biraju se opcije za prikaz rezultata. Rezultati proračuna su struja kvara (simetrične komponente struje i fazne vrednosti struje), struje po svim granama mreže i naponi u svim čvorovima mreže za vreme trajanja kvara. Pored ovih veličina, program daje uvid u matrice impedansi nezavisnih čvorova za direktni, inverzni i nulti redosled. Na slikama 5.3 – 5.5 prikazani su rezultati proračuna za navedeni primer.

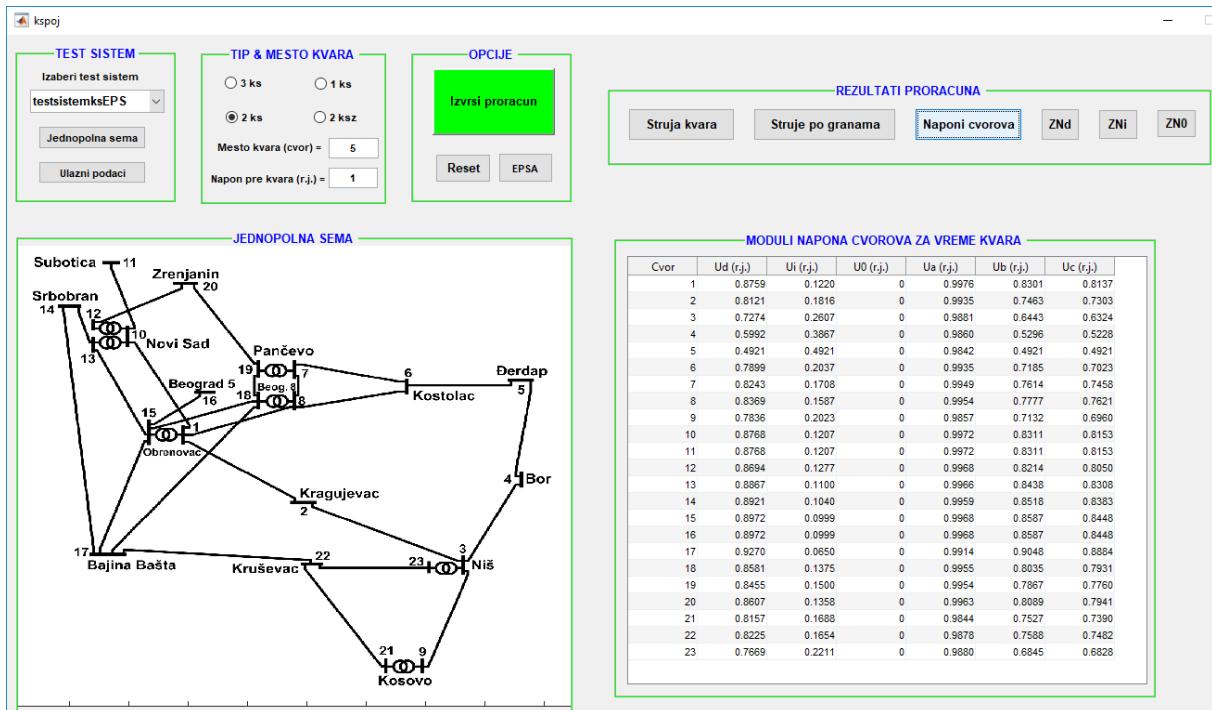
Klikom na dugme Reset vraćaju se podešavanja na vrednosti koje su se imale pri pokretanju programa. Povratak na glavni prozor softverskog paketa **epsa** vrši se pritiskom na taster EPSA.



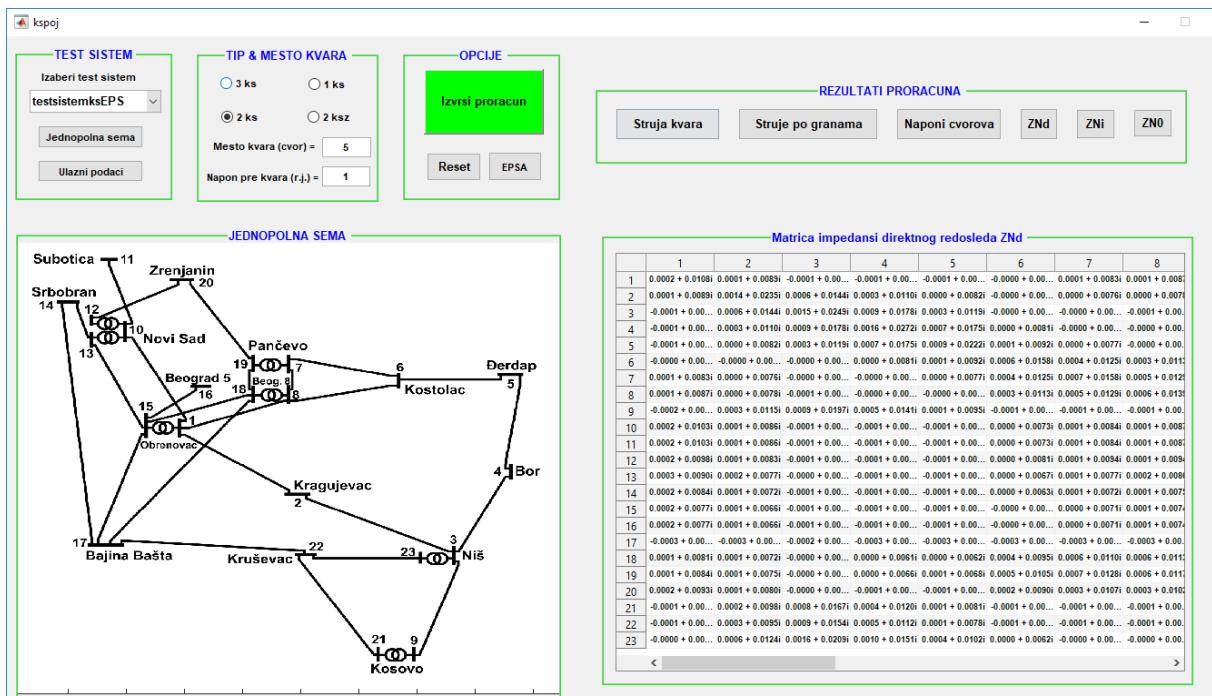
Slika 5.2 Modul **kspoj**: struja kvara na mestu kvara.



Slika 5.3 Modul **kspoj**: struje po granama za vreme kvara..



Slika 5.4 Modul kspoj: naponi čvorova za vreme kvara.

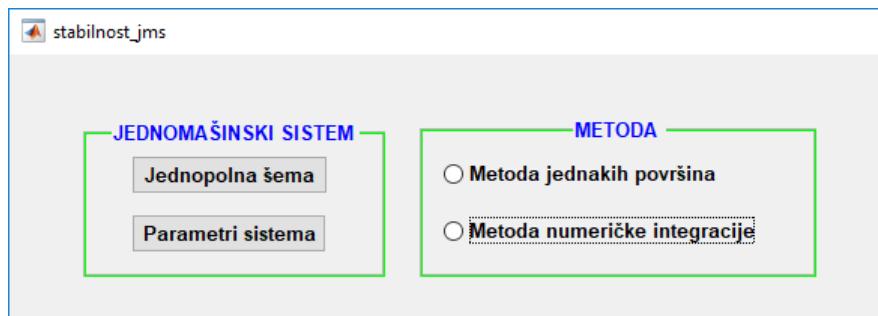


Slika 5.5 Modul kspoj: matrica impedansi čvorova mreže direktnog redosleda.

6. Modul za analizu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema

Modul **stabilnost_jms** programskog paketa **epsa** služi za procenu tranzijentne stabilnosti jednomašinskog sistema primenom metode jednakih površina i metode numeričke integracije.

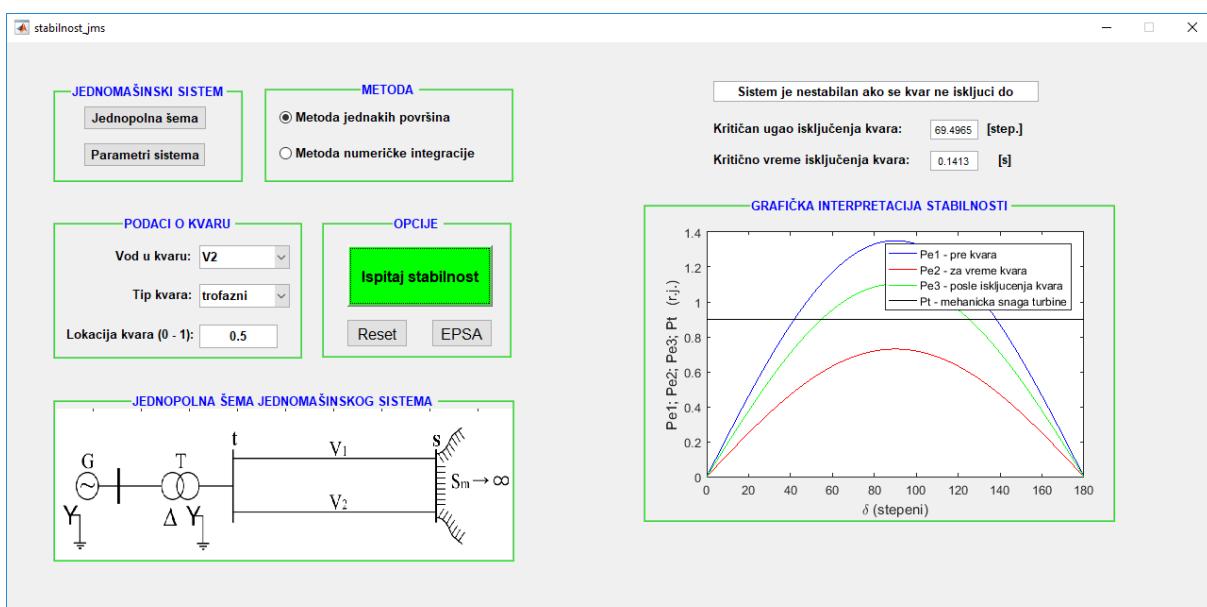
Pritiskom na taster **TRANZIJENTNA STABILNOST** jednomasinskog sistema na glavnom prozoru programa **epsa** otvara se prozor modula **stabilnost_jms** čiji izgled je prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1 Modul **stabilnost_jms** nakon aktiviranja

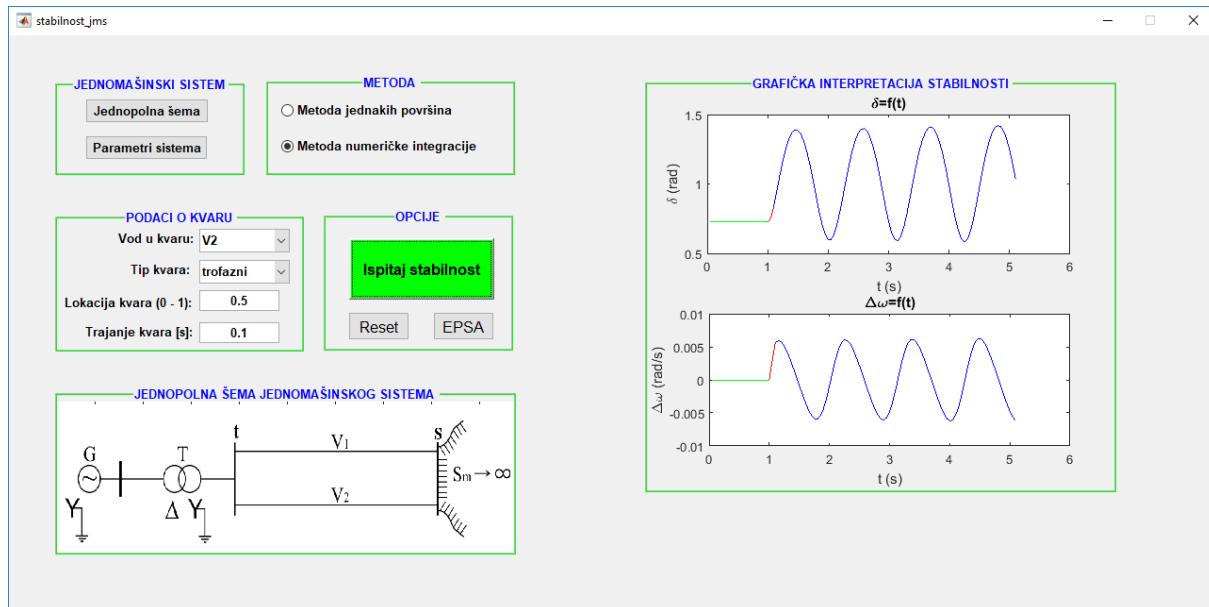
Pritiskom na taster **Jednopolna šema** prikazuje se tipična jednopolna šemu jednomašinskog sistema, čiji parametri su definisani u posebnoj datoteci koja se otvara preko tastera **Parametri sistema**. Ovi parametri se mogu menjati prema potrebi korisnika.

Selektovanjem jedne od dve raspoložive metode u panelu **METODA**, otvara se odgovarajući prozor u koji se unose parametre poremećaja za koji treba proceniti tranzijentu stabilnost generatora. Na slici 6.2 prikazan je primer primene metode jednakih površina za procenu tranzijentne stabilnosti pri kratkom trofaznom spoju koji se desio na polovini voda 2 jednomašinskog sistema.

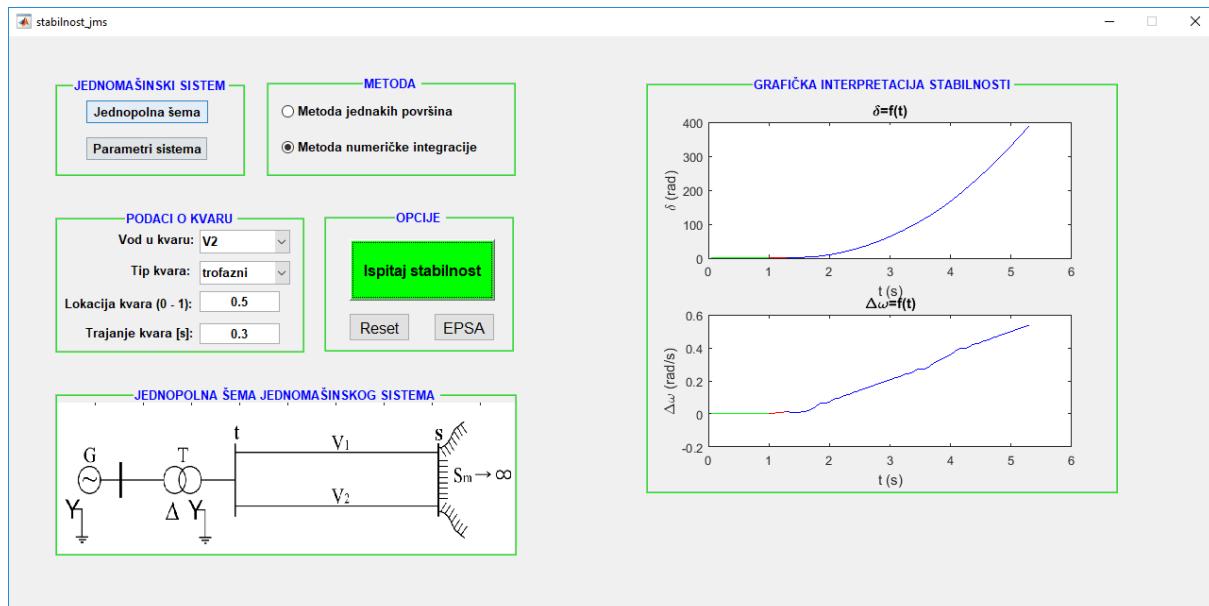


Slika 6.2 Modul **stabilnost_jms**: primena metode jednakih površina.

Kod primene metode numeričke integracije, pored tipa i lokacije kvara, treba definisati i vreme trajanja kvara, odnosno vreme koje protekne od trenutka nastanka kvara do trenutka isključenja voda pogođenog kvarom. Primena metode numeričke integracije ovde je pokazana za isti tip i lokaciju kvara kao u prethodnom primeru, za dva različita vremena trajanja kvara, i to za 0.1 s (slika 7.24) i za 0.3 s (slika 7.25)



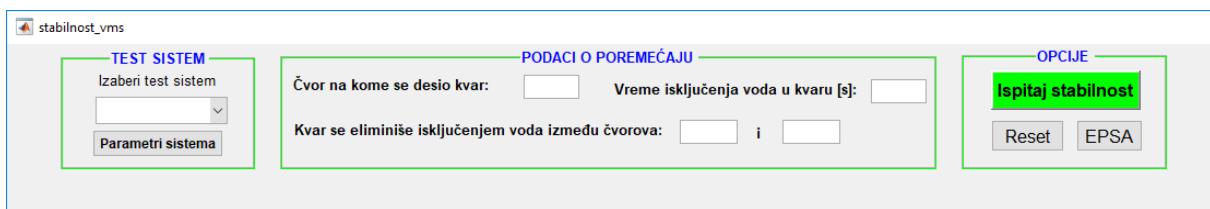
Slika 6.3 Modul **stabilnost_jms**: primena metode numeričke integracije, sistem stabilan.



Slika 6.4 Modul **stabilnost_jms**: primena metode numeričke integracije, sistem nestabilan.

7. Modul za analizu tranzijentne stabilnosti višemašinskog sistema

Izborom opcije TRANZIJENTNA STABILNOST visemasinskog sistema na glavnom prozoru programskog paketa **epsa**, aktivira se programski modul **stabilnost_vms** za procenu tranzijentne ugaone stabilnosti generatora u višemašinskom sistemu i otvara prozor ovog programskog modula. Drugi način za aktiviranje ovog specijalizovanog modula je da se folder **stabilnost_vms** postavi kao trenutno aktivan u tekućem direktoriju MATLAB-a, i onda u komandni prozor upiše komanda **stabilnost_vms**.

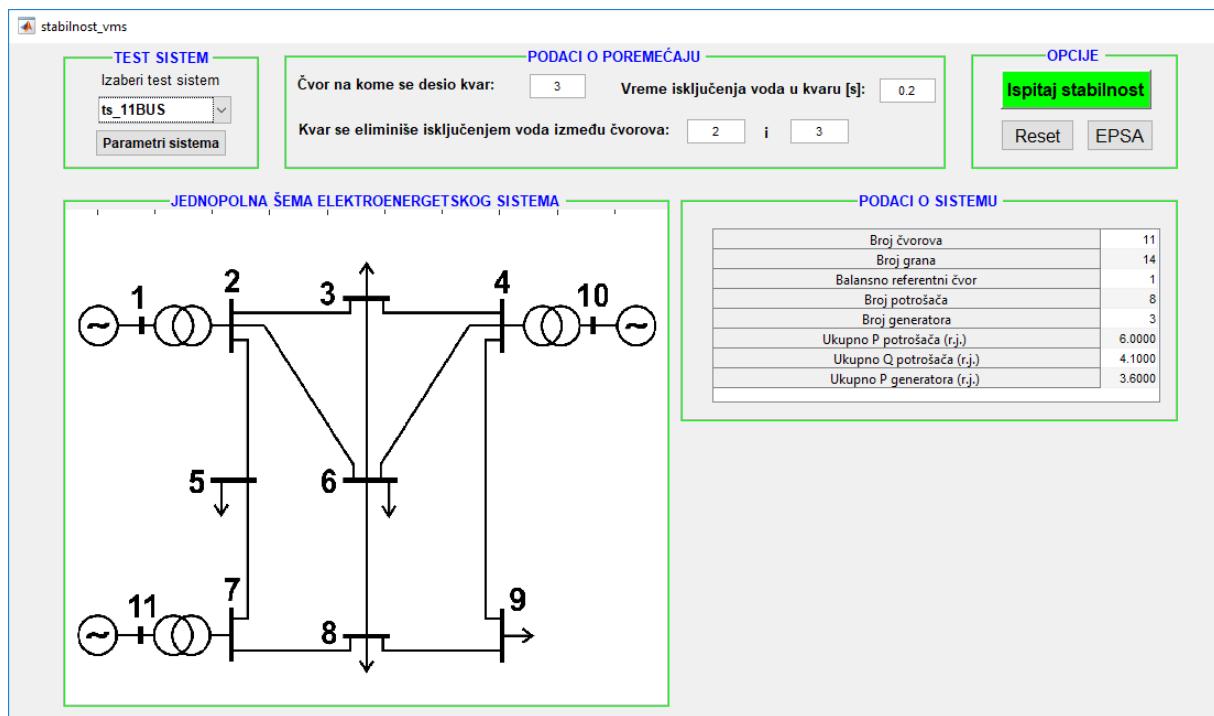


Slika 7.1 Modul **stabilnost_vms** nakon aktiviranja

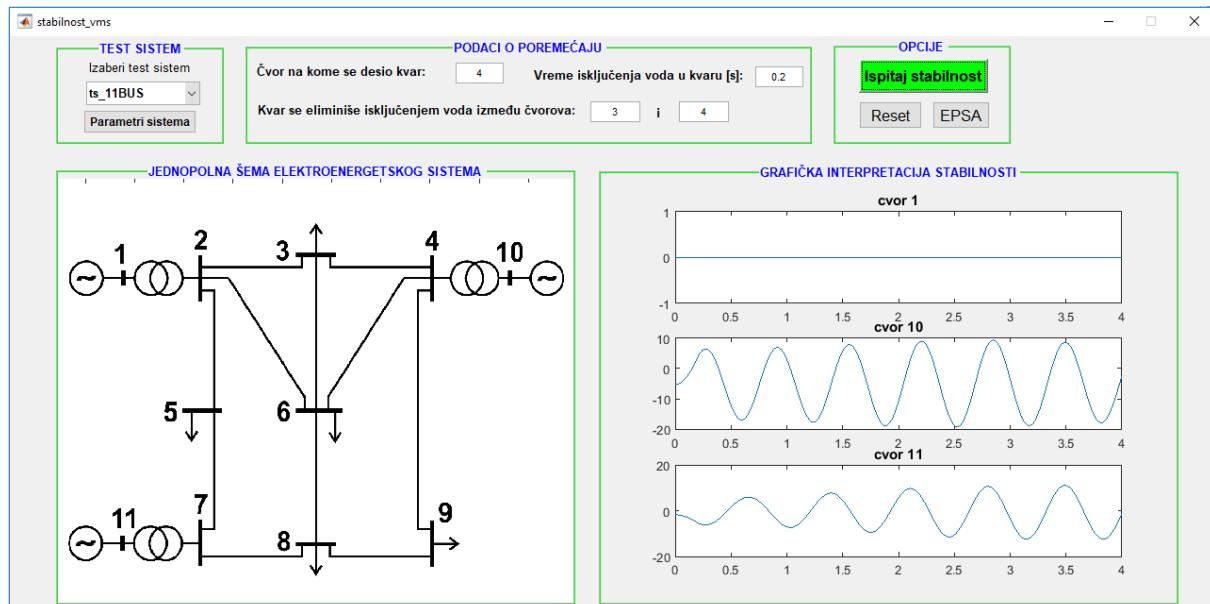
Na slici 7.1 prikazan je izgled prozora ovog modula. Kao što može videti on se sastoji od sledećih elemenata:

1. Panel TEST SISTEM, koji sadrži padajući meni u kome se vrši izbor test sistema za analizu. Rasploživo je 3 test sistema, uključujući uprošćeni 220 kV i 400 kV prenosni EES Srbije, kao i 2 standardna IEEE test sistema sa 11 i 39 čvorova. Selektovanjem test sistema, automatski se prikazuje jednopolna šema sistema i osnovni podaci o tom sistemu, kao na slici 7.2. Pritiskom na taster Parametri sistema otvara se ulazna datoteka koja sadrži podatke o izabranom test sistemu. To su podaci o konfiguraciji mreže, parametrima elemenata mreže, specificiranim snagama i naponima u čvorovima mreže, kao i karakteristikama generatora odnosno njihovim tranzijentnim reaktansama i vremenskim konstantama inercije. Korisnik može da menja ove podatke prema svojim potrebama.
2. U panelu PODACI O POREMEĆAJU korisnik upisuje podatke o lokaciji kvara, trajanju kvara i načinu elminacije kvara, tj. vodu na čijim krajevima reaguju prekidači radi izolovanja kvara. U ovom programu uzima se u obzir samo trofazni kratak spoj, kao najkritičniji kvar sa stanovišta stabilnosti.
3. Nakon izbora test sistema i definisanja poremećaja, pritiskom na taster Ispitaj stabilnost u panelu OPCIJE startuje se proračun.

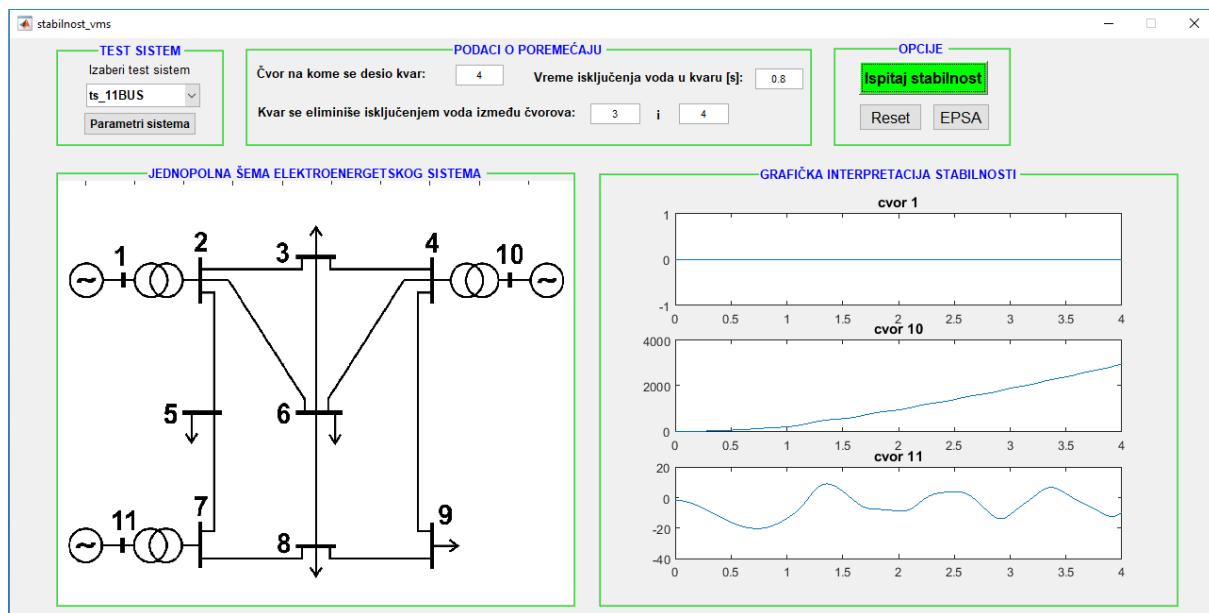
Na slikama 7.3 i 7.4 prikazani su rezultati primene programa na primeru test sistema sa 11 čvorova i 3 generatora za prepostavljeni trofazni kratak spoj na vodu 3-4, u blizini čvora 4, za dva različita trajanja kvara, 0.2 s i 0.8 s.



Slika 7. Modul **stabilnost_vms**: izbor test sistema.



Slika 7.3 Modul **stabilnost_vms**: sistem stabilan.



Slika 7.4 Modul **stabilnost_vms**: sistem nestabilan.

Literatura

1. Jordan Radosavljević, Analiza elektroenergetskih sistema, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, 2018.
2. [https://www.researchgate.net/publication/360359821_epsa_-
_edukativni_softverki_paket_za_analizu_elektroenergetskih_sistema](https://www.researchgate.net/publication/360359821_epsa_-_edukativni_softverki_paket_za_analizu_elektroenergetskih_sistema)