

AUTOSTLF: APLIKACIJA ZA KRATKOROČNU PROGNOZU POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA PROGNOŠTIČKU OBLAST DEFINISANU OD STRANE KORISNIKA

AUTOSTLF: AN APPLICATION FOR SHORT TERM LOAD FORECASTING FOR USER-DEFINED FORECAST AREA

Sovjetka KRSTONIJEVIĆ, Institut Mihajlo Pupin, Srbija

Goran JAKUPOVIĆ, Institut Mihajlo Pupin, Srbija

Pavle LUČIĆ, Institut Mihajlo Pupin, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U radu se predlaže unapređenje funkcionalnosti kratkoročne prognoze potrošnje koje uvažava uslove upravljanja u distributivnim sistemima. Postojeći prognostički alati koji su verifikovani u praksi, su, mahom, namenjeni centralizovanom upravljanju, značajno, razvijani za konkretnu potrošnju u prenosnom sistemu. Za funkcionalnost prognoziranja koja je karakteristična za distributivne sisteme, namenjene radu sa više potrošnji i za različite podoblasti sistema, ova generacija alata je neadekvatna i zahteva dalja unapređenja ili uvođenje novih pristupa. Ključni razlog je u heterogenosti profila potrošnje za različite oblasti sistema, usled različitih osnovnih faktora potrošnje (meteorologije, tipa i broja potrošača itd.), za koje se, postojećim alatima ne može postići zadovoljavajuća tačnost prognoze. Takođe, promene osnovnih faktora potrošnje u vremenu, nameću potrebu dinamičkog prilagođavanja prognostičkog modela, pogotovo, u prisustvu distribuiranih obnovljivih izvora, uticaja tržišta električne energije, te programa upravljanja potrošnjom (DSM) i odziva potrošnje (DR). *AutoSTLF* aplikacija, koja je opisana u radu, je razvijana sa ciljem povećanja fleksibilnosti i adaptibilnosti prognoziranja na različite potrošnje i u vremenu. Aplikacija je namenjena kratkoročnoj prognozi potrošnje za proizvoljnu prognostičku oblast, definisanu od strane korisnika. Za testiranje rada aplikacije koriste se otvorene baze podataka za koje se demonstrira način formiranja prognostičke oblasti i meri kvalitet prognoze *MAPE* greškom. Konačno, dat je predlog softverske realizacije razvijene funkcionalnosti u praksi.

Ključne reči: kratkoročna prognoza potrošnje električne energije, distributivni sistemi, prediktivni alati

ABSTRACT

This paper proposes the improvement of the short-term load forecasting functionality that takes into account conditions of distribution systems' management. Existing prognostic tools, verified in practice are, mostly, intended for centralized management, developed for specific consumption in the system. For distribution systems' forecasting functionality, which is multi-site application, intended for work with loads collected from different system sub-areas, these tools are inadequate and requires further improvements. Their limitations rely on inability to achieve the satisfactory accuracy of forecasts for heterogeneous load profiles, driven by different load factors (meteorology, type and number of consumers, etc.), for different system areas. In addition, changes in these load factors over time, impose the need for dynamic adjustment of the prognostic model, especially in the presence of renewable sources, the influence of the electricity market, consumption management programs (DSM) and demand response (DR). Developed *AutoSTLF* application, described in the paper, aims to increase the flexibility and adaptability of forecasting to different load in the system and in time. The application supports a short term load forecasting functionality for an arbitrary forecast area, defined by the user. For its testing, open databases are used to demonstrate how to define the forecast area, then the quality of forecast is measured with the MAPE error. Finally, the software implementation of the developed functionality in practice is proposed.

Key words: short-term load forecasting, distribution systems, predictive tools

1. UVOD

U radu [1] iz 2017. godine, koji se bavi aspektima tranzicije distributivnih sistema i daljom perspektivom, kao glavni mehanizmi njihovog efikasnijeg i 'inteligentnijeg' upravljanja navode se intenziviranje monitoringa rada, automatizacija, zaštita podataka i, značajno, unapređenje modela i prediktivnih alata. Generalno, budući elektroenergetski sistemi (EES) se, suštinski, zasnivaju na *real-time* podacima za praćenje i akviziciju stanja u mreži i na tržištu električne energije, kao i na softverskim alatima koji te podatke koriste za blagovremeno odlučivanje i lokalno delovanje. S obzirom na kritične vremenske okvire i veliki protok podataka, od posebnog je značaja da sva rešenja budu automatizovana i da obezbeđuju zadati nivo fleksibilnosti i prilagodljivosti, autonomno, bez intervencije čoveka. Pravovremene odluke i aktivnosti u EES-u su zasnovane na procenama stanja sistema i relevantnih veličina za kraće i duže buduće periode, gde je njihova tačnost ekonomski i tehnički kritična varijabla. Iz tog razloga su prognostički alati ključni za njegovo efikasno upravljanje, od kojih oni namenjeni prognozi potrošnje električne energije od najvećeg značaja [2]. Vremenski horizonti prognoziranja koji su od interesa obuhvataju periode od narednog minuta do nekoliko godina unapred, kategorizovano u vrlo kratkoročnu, kratkoročnu, srednjeročnu i dugoročnu funkcionalnost. Međutim, za većinu operativnih dnevnih zadataka u sistemu od najvećeg značaja su prognoze za naredni narednog koraka (sata, polusata, 15-minuta) do narednog dana, odnosno, *intra-day* i *day-ahead* funkcionalnosti, koje potpadaju u domen kratkoročne prognoze potrošnje, odnosno, *short term load forecasting*, *STLF*.

STLF alati koji su trenutno u upotrebi, mahom su namenjeni centralizovanom upravljanju, na nivou sistema ili veće grupe potrošača, značajno, razvijani i prilagođeni podacima prikupljenim sa konkretnog mesta u sistemu i prilagođeni konkretnoj potrošnji. Međutim, *STLF* funkcionalnost na distributivnom nivou je namenjena prognoziranju većeg broja potrošnji, za različite prognostičke oblasti, koje se, generalno razlikuju po broju potrošača i nivou potrošnje, faktorima potrošnje (zavisnost od kalendara, uticaj meteorologije i ekonomskih parametara), prisustvu obnovljivih izvora energije, itd. Kako je razvoj zasebnih prognostičkih alata za svaku od potrošnji praktično neodrživ, izazov u razvoju *STLF* funkcionalnosti predstavljala, upravo, različitost u njenim profilima za različite oblasti. Posledično, osnovna stavka pri specifikaciji *STLF* alata koji je namenjen upotrebi u distributivnim sistemima je mogućnost generalizacije prognoze za više heterogenih potrošnji, za različite prognostičke oblasti. Takođe, promene osnovnih faktora potrošnje u vremenu, generalno, nameću potrebu za dinamičkim prilagođavanjem algoritama. Model, na kome se zasniva prognoza, obučen nad datim vrednostima, vremenom više nije aktuelan i ne daje dobre rezultate, te je potrebno njegovo ponovno obučavanje. Potreba za dinamičkim prilagođavanjem je izraženija u novim uslovima u sistemu, u prisustvu obnovljivih izvora i implementiranih programa odziva i upravljanja potrošnjom (*DSM/DR*), gde se promene dešavaju na kraćim vremenskim intervalima. Kako bi se očuvao kvalitet prognoze tokom vremena, potrebno je obezbediti metodologiju njegove adaptacije na izmenjene uslove prognoziranja.

Sa aspekta realizacije konkretne *STLF* funkcionalnosti, osnovni problemi i nedostaci postojećih, standardno korišćenih prediktivnih alata su dugo vreme obučavanja modela koje onemogućava periodično remodelovanje, nestabilni optimizacioni algoritmi i velika osetljivost prognostičkih modela na hiperparametre modela, odnosno, strukturu modela, koju je potrebno podešavati za svaku potrošnju [3]. S obzirom na konkretne zahteve koji se imaju za *STLF* alat u distribuciji, kao i nedostatku odgovarajućih, u radu je predstavljena *AutoSTLF* aplikacija, zasnovana na modelu i propratnoj metodologiji koja obezbeđuju prilagođavanja konkretnoj prognostičkoj oblasti, kao i u vremenu, što je opisano u podpoglavlju 2. Rad aplikacije je testiran na rezultatima prognoze za nekoliko prognostičkih oblasti, koristeći se vrednostima za potrošnju i temperature prikupljenih iz otvorenih baza podataka, opisanih u podpoglavlju 3. Rezultati prognoze za odabrani podatke su dati u podpoglavlju 4, dok su aspekti realizacije *AutoSTLF* alata predloženi u poglavlju 4.

2. OPIS PREDLOŽENE METODOLOGIJE

Prognoziranje potrošnje električne energije se zasniva na modelu vremenske serije, čiji su ulazi osnovni faktori potrošnje. Osnovne karakteristike svake vremenske serije potrošnje električne energije, manje ili više izražene u zavisnosti od prognostičke oblasti, su dnevni, sedmični i godišnji profil, zavisnost od utrošene električne energije u prethodnom periodu (iz proteklog dana, protekle sedmice, prethodnih sati) i zavisnost od spoljašnjih faktora, pre svega, od meteoroloških parametara. Pored ovih osnovnih faktora, od značaja su i izmene u nivou potrošnje za specijalne dane (praznici), uticaj ekonomskih faktora, globalni trend potrošnje, kao i promene koje unosi prisustvo obnovljivih izvora energije, *DSM/DR* programa, itd.

Koraci razvoja metodologije koja je implementirana u *AutoSTLF* su:

- usvajanje fleksibilnog pristupa modelovanja, takvog da uvažava razlike u pobrojanim faktorima potrošnje koje postoje među prognostičkim oblastima za koje se *STLF* funkcionalnost razvija
- razvoj metodologije automatskog prilagođavanja konkretnoj prognostičkoj oblasti, odnosno izbor modela, a na osnovu istorijskih podataka za potrošnju i spoljašnje promenljive predmetne oblasti

- razvoj procedure prognoziranja koja na osnovu modela date prognostičke oblasti, aktuelnih i istorijskih vrednosti za potrošnju i spoljašnje faktore, i prognoziranih vrednosti spoljašnjih promenljivih, generiše prognoze za naredni dan.

Model koji je implementiran u *AutoSTLF* aplikaciji pripada grupi aditivnih, opisanih u referenci [4]. Kod ovih modela potrošnja je predstavljena zbirom funkcija kojima se zasebno modeluju pojedinačni faktori potrošnje, koji predstavljaju članove modela, kao što je dato jednačinom 1.

$$P = \sum_{i=1}^I f_i(x_i, N_i) \quad 1$$

Članovi modela u gornjoj jednačini su realizovani tehnikama splajna. Splajn je koristan matematički alat za modelovanje univerzalne nelinearnosti, čija je karakteristika da se, pri estimaciji modela, potpuno prilagođava podacima koje modeluje. U *AutoSTLF* aplikaciji se koriste penalizovani splajnovi, kod kojih je postupak prilagođavanja kontrolisan vrednostima hiperparametra K_i , za svaku od funkcija modela. Od praktičnog je značaja da ovakav pristup omogućava razvoj generičkih, *data-driven*, modela potrošnje, tako da konkretna struktura modela može poslužiti modelovanju potrošnji na različitim mestima u elektroenergetskom sistemu. Osnovna prednost usvojenog pristupa su brzi i jednostavni estimacioni algoritmi koji su verifikovani u praksi i imaju mogućnost prilagođavanja konkretnim zahtevima. Druga prednost je aditivna struktura koja obezbeđuje konfigurabilnost modela i omogućava njegovo jednostavno definisanje.

U test primeru koji je sproveden u ovom radu, zasebno su modelovane vremenske serije potrošnje koje odgovaraju vremenima u danu za koje postoji merenje, tako da se STLF funkcionalnost koja se razvija na bazi, na primer, satnih vrednosti potrošnje, sastoji iz 24 satna podmodela. Takođe, od spoljašnjih promenljivih se koristi srednja dnevna vrednost temperature. U Tabeli 2.1 je data lista članova modela koji se koriste za testiranje. Prikazana lista članova modela sadrži samo osnovne faktore potrošnje i moguće je njeno proširenje dodatnim članovima za, na primer, uključivanje uticaja brzine vetra, ili ostalih sekundarnih meteo varijabli, ekonomskih faktora, itd.

Tabela 2.1 - Lista modelovanih faktora potrošnje električne energije

Član modela	Faktor potrošnje
$f_t(\text{trend})$	Komponenta trenda potrošnje
$f_s(s)$	Sedmični profil potrošnje
$f_T(T)$	Zavisnost potrošnje od temperature
$f_2(P_t^{d-1}), f_7(P_t^{d-7})$	Zavisnost od potrošnje u istom satu iz prethodnog dana i od pre sedam dana
$f_7(P_{t-1})$	Zavisnost od potrošnje iz prethodnog sata

Izbor modela podrazumeva izbor odgovarajućih vrednosti hiperparametara K_i , za svaku funkciju u modelu, za svaku vremensku seriju koja odgovara svakom satu za datu oblast. Njime se kontroliše kompleksnost nelinearnosti kojom se modeluju članovi modela i vrši njihov izbor. U operativnom režimu, ove vrednosti se smatraju fiksnim i određuju se svaki put kad korisnik definiše novu oblast ili je potrebno redefinisati model za postojeću oblast. Postupak definisanja hiperparametara se obavlja u studijskom režimu, gde se, na osnovu istorijskih podataka pretražuje skup unapred zadatih vrednosti K_i i vrši odabir onih vrednosti za koje model ima najmanju grešku prognoze. Greška prognoze se formuliše kao *MAPE* (*mean absolute percentage error*) greška, koja je za potrošnju P_n , prognoziranu sa \hat{P}_n , procenjena za N vrednosti, definisana po formuli 2.

$$MAPE = 100 \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|P_n - \hat{P}_n|}{P_n} \quad 2$$

Procedura prognoziranja je *real-time* proces sa tzv. klizajućim prozorom dužine N , koji, u osnovnom režimu, sa svakim novim podatkom, preuzima N prethodnih vrednosti za potrošnju i temperature i vrši ponovnu kalkulaciju koeficijentata modela. Prekalkulisani model, na osnovu prognoziranih vrednosti za temperaturu za naredni period, generiše prognozu za naredni korak.

3. AUSGRID BAZA PODATAKA

Ausgrid je najveći distributer električne energije na istočnoj obali Australije, koji električnom energijom snabdeva oko 1.8 miliona potrošača za širu oblast Sidneja. On upravlja mrežom koja uključuje preko 180 TS 33/11kV, 66/11kV, 132/11kV trafostanica. Sastav potrošača koje obuhvataju trafo-rejoni uključuje rezidencijalne potrošače, mala preduzeća i velike multinacionalne korporacije, tako da baza podataka obuhvata različite profile potrošnje. Jednom godišnje *Ausgrid* na svom sajtu [5] objavljuje istorijske podatke za potrošnju, za proteklih 12 meseci. Istorijski podaci sadrže 15-minutna merenja potrošnje za većinu trafostanica koje se nadgledaju. Vrednosti predstavljaju 'sirova' merenja, koja nisu tretirana niti analizirana od strane operatera. Pregledom *Ausgrid* baze podataka konstatovano je da postoji veliki broj nedostajućih merenja, kratkotrajnih i dugotrajnih iskaknja izvan opsega merene potrošnje. S obzirom da je na raspolaganju veliki broj podataka, a kako bi se izbeglo njihovo opsežno preprocesiranje i predobrada, za potrebe testiranja u radu je izabrano 10 trafostanica, za koje su podaci bili korektni za 2014. godinu. Lista odabranih trafo objekata i prosečna potrošnja električne energije rejona koje pokrivaju, za odabrani vremenski period, data je Tabelom 3.1. Takođe, sa internet lokacije [6] preuzete su srednje dnevne vrednosti temperatura za Sidnej za 2014 godinu.

Tabela 3.1 - Lista i prosečna potrošnja odabranih *Ausgrid* trafo stanica

Prognostička oblast	Naziv trafo stanice (132/11kV)	Prosečna potrošnja (MW)
AU1	<i>Adamstown</i>	12
AU2	<i>Argenton</i>	15
AU3	<i>Burwood</i>	37
AU4	<i>Bankstown</i>	9
AU5	<i>Cronulla</i>	23
AU6	<i>Menai</i>	16
AU7	<i>Wyang</i>	14
AU8	<i>Clovelly</i>	37
AU9	<i>Berowra</i>	9
AU10	<i>Somerby</i>	8

Ausgrid podaci su iskrišćeni za testiranje metodologije na primeru realnog scenarija po kome je korisniku omogućen izbor proizvoljne prognostičke oblasti. Selekcijom trafostanice ili više njih, definiše se oblast obuhvaćena odgovarajućim rejonom za čiju ukupnu potrošnju se vrši prognoza. Za demonstraciju, formirane su dodatne prognostičke oblasti dobijene agregiranjem potrošnji za trafostanice od AU1 do AU6 i one od AU7 do AU9, čije su ukupne vrednosti potrošnje date Tabelom 3.2

Tabela 3.2 - Lista i prosečna potrošnja definisanih *Ausgrid* prognostičkih oblasti

Prognostička oblast	Prosečna vrednost (MW)
AU1:AU6	112
AU7:AU9	60

4. REZULTATI

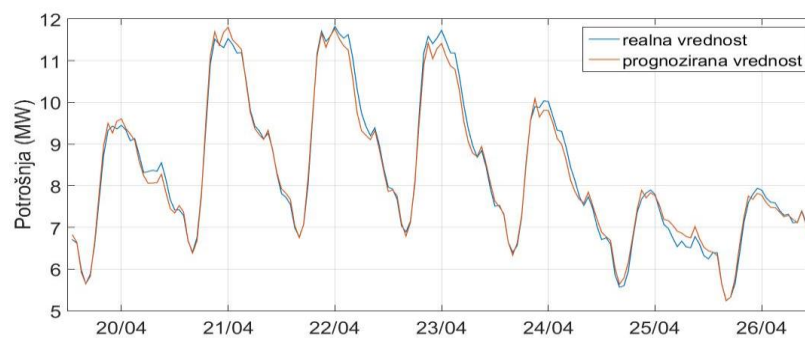
Kao priprema za testiranje, za sve prognostičke oblasti iz Tabele 3.1 i 3.2 formirane su satne vrednosti za ukupnu potrošnju i dnevne vrednosti temperature. U ovom primeru se pretpostavlja da su, za obučavanje modela, u svakom trenutku na raspolaganju $N=100$ prethodnih vrednosti za potrošnju i temperature. Test period za koji se

posmatraju rezultati prognoze obuhvataju interval od 15.03.2014 do 31.05.2014. Dobijena MAPE greška prognoze za dan unapred, za svaku od oblasti je data Tabelom 4.1.

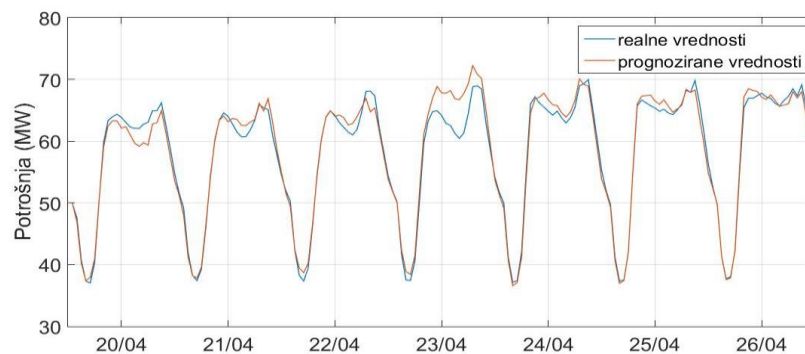
Tabela 4.1 - Vrednosti MAPE greške za odabrane prognostičke oblasti

Prognostička oblast	MAPE (%)
AU1	3.98
AU2	3.71
AU3	3.22
AU4	3.98
AU5	4.01
AU6	3.56
AU7	4.54
AU8	2.91
AU9	4.75
AU10	2.45
AU1:AU6	1.95
AU7:AU9	3.33

Slikama 4.1-2 su ilustrovani rezultati prognoziranja za AU10 i AU7:AU9 prognostičke oblasti, za period od 20-26/04/2014. godine.



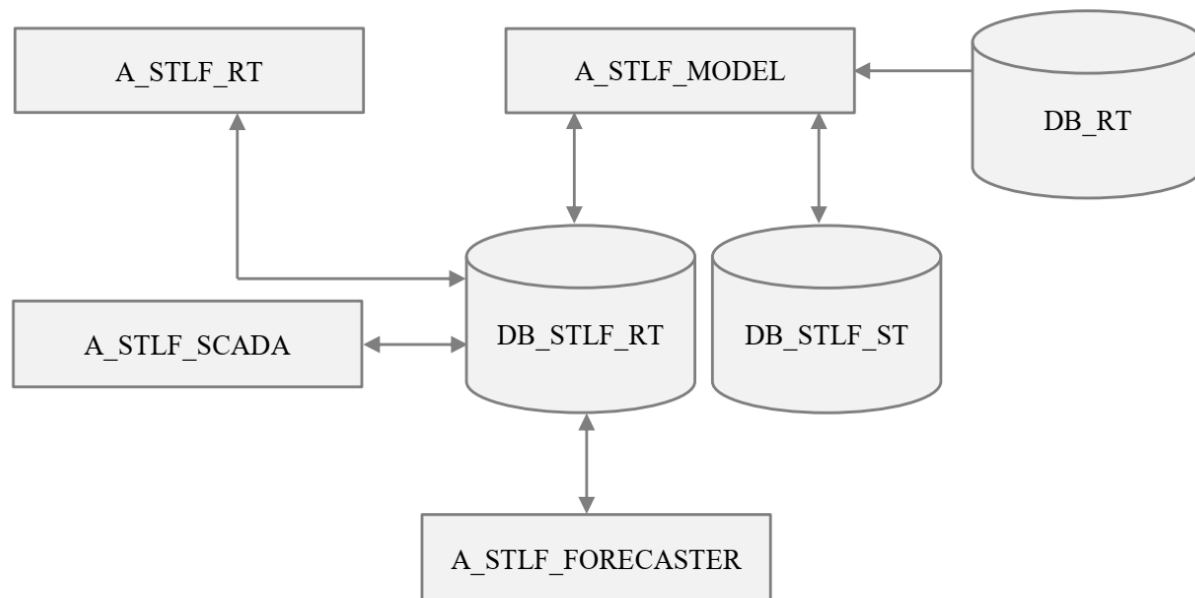
Slika 4.1 - Rezultati prognoze za AU10 prognostičku oblast



Slika 4.2 - Rezultati prognoze za AU7:AU9 prognostičku oblast

5. IMPLEMENTACIJA

Na slici je data blok šema osnovnih informacionih resursa i aplikacija koji su potrebni za realizaciju *AutoSTLF* funkcionalnosti.



Slika 5.1 - Realizacija *AutoSTLF* aplikacije

- DB_RT je baza podataka za rad u realnom vremenu. U njoj se nalaze informacije o kreiranim oblastima (aktuelni modeli oblasti, ostvarene istorijske srednje satne potrošnje oblasti, istorijski meteo podaci) za koje se vrši *real-time* prognoza, kao i same prognozirane vrednosti.
- DB_ST je baza podataka za studijski režim rada i sadrži istorijske podatke koji se koriste za razvoj modela pri definisanju nove prognostičke oblasti ili njegova adaptacija za postojeću oblast.
- DB_RT je baza podataka iz koje se dobija aktuelni model sistema na osnovu koga se modeluju oblasti prognoziranja.
- A_MODEL aplikacija koristi podatke iz DB_ST za razvoj modela i određivanje njegovih parametara. Izabrani parametri se smeštaju u DB_RT bazu i, na dalje, koriste za *real-time* prognoziranje.
- A_SCADA aplikacija automatski preuzima merenja sa SCADA-e za sve aktivne oblasti, izračunava prosečne satne vrednosti i smešta ih u DB_RT bazu.
- A_FORECASTER aplikacija, na svakih sat vremena, iz DB_RT automatski preuzima parametre modela i istorijske vrednosti potrošnje i meteoroloških veličina za sve aktivne oblasti prognoze. Na osnovu preuzetih veličina, vrši prognozu potrošnje za sve aktivne oblasti i rezultate vraća nazad u DB_RT bazu.
- A_RT aplikacija služi za praćenje prognoze u realnom vremenu koju izračunava A_FORECASTER. Ona omogućava pregled i poređenje ostvarenih i prognoziranih vrednosti potrošnje i meteo parametara.

Primer mogućih tehnologija kojima bi se realizovala *AutoSTLF* aplikacija dat je u radu [7].

6. ZAKLJUČAK

Zahtevi za kratkoročnom prognozom potrošnje koji se imaju u savremenim distributivnim mrežama, prevazilaze mogućnosti postojećih prediktivnih alata. Kao glavni problemi identifikovani su nemogućnost adaptacije implementiranih modela i prapatnih algoritama različitim izvorima podataka u distributivnim sistemima i na promene uslova prognoziranja, a time i postizanje zadovoljavajuće tačnosti prognoze. U radu je predložen, pre svega, model i algoritamsko rešenje namenjeno kartkoročnoj prognozi potrošnje za različite prognostičke oblasti u sistemu. Glavne karakteristike predložene *AutoSTLF* aplikacije su:

- jednostavnost u implementaciji i brzi estimacioni algoritmi koji omogućavaju primenu u *realtime* režimima,
- konfigurabilna struktura modela koja omogućava jednostavno dodavanje novih članova kojim bi se uključili i drugi faktori potrošnje (sekundarne meteo varijable, tarife)

- model koji je zasnovan na minimum *a priori* informacija o opštim karakteristikama vremenske serije potrošnje, što ga, generalno, čini upotrebljivim za širu primenu
- Nedostatak prikazanih rezultata je što su *MAPE* vrednosti u Tabeli 4.1 dobijene za realne vrednosti temperatura, dok su u praksi na raspolaganju prognoze. Konačno, u poglavlju 5 je dat i predlog softverske realizacije *AutoSTLF* aplikacije.

LITERATURA

- [1] G. Boyd, SPEN – DSO Vision, 24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 12-15 June 2017.
- [2] Utility analytics in 2017: Aligning data and analytics with business strategy, SAS.
- [3] T. -H. Dang-Ha, F. M. Bianchi and R. Olsson, "Local short term electricity load forecasting: Automatic approaches," *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Anchorage, AK, USA, 2017, 4267-4274, doi: 10.1109/IJCNN.2017.7966396.
- [4] T.Hastie, R.Tibshirani, J.Friedman *The Elements of Statistical Learning, Data Mining, Inference, and Prediction*, Second Edt. Springer Series in Statistics
- [5] <https://www.ausgrid.com.au/Industry/Our-Research/Data-to-share/Distribution-zone-substation-data>
- [6] www.wundercound.com
- [7] P.Lučić, G. Jakupović, S. Krstonijević, M. Stojić, N. Čukalevski, "Realizacija programske podrške aplikacije za kratkoročnu prognozu potrošnje u sklopu SCADA/EMS sistema", CIGRE Srbija,