

Matija Zečević, dipl. inž.
KONČAR – Inženjering za energetiku i transport d.d.,
Zagreb
matija.zecevic@koncar-ket.hr

Boris Krstulja, dipl. inž.
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka
boris.krstulja@hep.hr

KRA TKOROČNA PROGNOZA OPTEREĆENJA U DISTRIBUCIJSKIM ELEKTROENERGETSKIM MREŽAMA

SAŽETAK

Tijekom revitalizacije sustava daljinskog vođenja Operatora distribucijskog sustava Elektroprimorje Rijeka implementiran je podsustav prognoze opterećenja elektroenergetske mreže kao dio DMS sustava. Svrha spomenutog podsustava jest pomoći u pravovremenom prognoziranju potrošnje unutar pojedinih dijelova distribucijske mreže s ciljem unapređenja planiranja vođenja pogona pojedinih dijelova distribucijske mreže te time i povećanja razine sigurnosti cijelog distribucijskog sustava. Prognoziranje opterećenja mreže, odnosno potrošnje energije ima značajnu ulogu posebno u uvjetima liberaliziranog tržišta električne energije zbog potreba planiranja snage i energije gubitaka u distribucijskoj mreži, kao i planiranja načina njenog korištenja po pojedinim dijelovima.

U članku je dan opis implementiranog podsustava prognoze opterećenja u ODS Elektroprimorje Rijeka. Nadalje, opisan je način rada same aplikacije za prognoziranje opterećenja bazirane na Kalmanovom filtru te su prezentirani dobiveni rezultati za određenu mjernu točku.

Ključne riječi: kratkoročna prognoza opterećenja, prognoza opterećenja, Kalmanov filter

DISTRIBUTION SYSTEM SHORT-TERM LOAD FORECASTING

SUMMARY

During the revitalization of the Remote Control System of Distribution System Operator Elektroprimorje Rijeka the electric power system load forecasting subsystem as part of the DMS system was implemented. The purpose of the mentioned subsystem is to assist in the timely load forecasting within certain parts of the distribution network with the aim of improving the distribution network planning, operation and control which will in turn improve the security level of the whole distribution network. Load forecasting, i.e. energy consumption has a significant role particularly in terms of liberalized electric energy market due to the need for power and energy losses planning in distribution network as well as planning of ways of its use in some parts.

In the article, a description of load forecasting subsystem implemented in the ODS Elektroprimorje Rijeka is given. Furthermore, the description of the load forecasting application based on Kalman filter is given and the results obtained for a specific measurement point are presented.

Key words: short-term load forecasting, load forecast, Kalman filter

1. UVOD

Proces prognoziranja, odnosno predviđanja ima vrlo važnu ulogu u upravljanju svim vrstama dinamičkih sustava (društvenih, financijskih, energetske itd.). Prognoza posebice dolazi do izražaja kod upravljanja energetskim sustavima, poput plinskog ili elektroenergetskog sustava, gdje točno prognoziranje opterećenja može direktno utjecati na kvalitetu upravljanja cjelokupnim sustavom na dnevnoj bazi. Primjerice, kako se električna energija ne može pohranjivati u većim količinama, kvalitetna prognoza opterećenja uvelike može pomoći optimiranju proizvodnje i/ili kupnje električne energije i na taj način omogućiti značajne financijske uštede.

U elektroenergetskom sustavu se prognoziranje koristi kao podloga za različite razine planiranja. S jedne strane, potrebno je konstantno vršiti planiranje razvoja potrošnje električne energije koje je važno radi planiranja razvoja proizvodnih, prijenosnih i distribucijskih kapaciteta. Ovoj vrsti planiranja može pomoći srednjoročna (npr., na sezonskoj razini) ili dugoročna (npr., na godišnjoj razini) prognoza. S druge strane, kratkoročno prognoziranje se vrši za manji vremenski horizont (obično do 7 dana) te se koristi pri svakodnevnom upravljanju sustavom.

U elektroenergetskom sustavu koristi se najčešće postupak prognoziranja opterećenja pri kojem se definiraju dijagrami ovisnosti snage o vremenu, odnosno krivulje potrošnje energije određenog područja za neko buduće vremensko razdoblje. Osnovna namjena kratkoročnog prognoziranja opterećenja jest [2]:

- a) predviđanje opterećenja u svrhu planiranja proizvodnje i kupnje električne energije,
- b) pomoć pri procjeni sigurnosti djelovanja elektroenergetskog sustava i
- c) pomoć pri upravljanju samim sustavom (operaterima u upravljačkim centrima).

Prognoziranje opterećenja jest zahtjevan postupak čiji uspješan ishod ovisi podjednako o kvaliteti ulaznih podataka koji ulaze u model za prognoziranje i samom korištenom matematičkom modelu za prognoziranje.

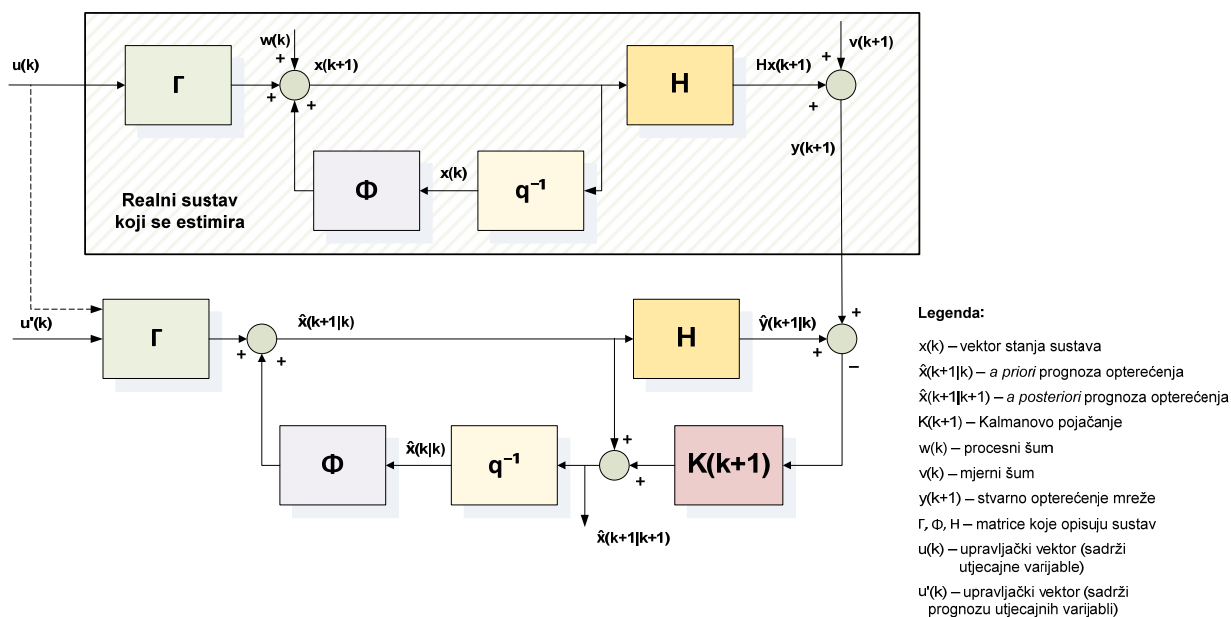
2. SUSTAV ZA PROGNOZIRANJE OPTEREĆENJA

2.1. Općenito

U sustav daljinskog vođenja Operatora distribucijskog sustava Elektroprimorje Rijeka implementiran je podsustav prognoze opterećenja elektroenergetske mreže kao dio DMS sustava. Kako je sustav prognoze opterećenja proizvod jedne njemačke tvrtke, njegov je matematički model zaštićen od neovlaštenog analiziranja tako da u jednom svom dijelu sustav predstavlja crnu kutiju. Međutim, kao što će biti prikazano dalje u radu, to ne sprečava da se njegovim pravilnim parametriranjem postigne uspješno prognoziranje željenih veličina.

2.2. Matematički algoritam za izračunavanje prognoze opterećenja

Matematički algoritam za izračunavanje prognoze opterećenja na kojem se bazira spomenuti integrirani sustav za prognoziranje jest tzv. Kalmanov filter. Algoritam je dobio ime po mađarskom inženjeru elektrotehnike i matematičaru dr. Rudolfu Emilu Kalmanu koji ga je prvi definirao i publicirao 1960. godine. Kalmanov filter je rekurzivni matematički model, odnosno tzv. rekurzivni stohastički optimalni estimator stanja dinamičkog sustava (slika 1) koji ima tzv. prediktor – korektor formu. U jednom diskretnom koraku je prisutna i predikcija i korekcija. Primjerice, u $k+1$ koraku se vrši tzv. *a priori* estimacija na temelju tzv. *a posteriori* estimirane vrijednosti stanja dinamičkog sustava u prethodnom, k -tom koraku (proces predikcije). Zatim se u istom koraku vrši korekcija te dobivene *a priori* estimacije (klasični princip povratne veze) uspoređujući nju i samu izmjerenu vrijednost u $k+1$ koraku što daje točniju *a posteriori* estimaciju za $k+1$ korak (proces korekcije) koja se onda koristi u sljedećem koraku za ponovno računanje *a priori* estimacije. Estimacija stanja sustava definira se težinskom funkcijom tzv. Kalmanovim pojačanjem (engl. Kalman gain) koja je optimizirana minimiziranjem *a posteriori* pogreške estimacije.



Slika 1. Prikaz osnovnog modela Kalmanovog filtra

Korelacijska analiza se koristi kako bi se definirala ovisnost utjecajnih veličina i veličine koja se želi prognozirati te se njezini rezultati koriste unutar samog Kalmanovog filtra.

2.3. Osnovne karakteristike sustava za prognoziranje opterećenja

Sustav prognoze opterećenja je integriran unutar povijesne baze podataka na tzv. UDW (engl. Utility Data Warehouse) poslužiteljima sustava daljinskog vođenja te se svi potrebni podaci za prognoziranje uzimaju iz te baze podataka, a i sama prognoza se pohranjuje u istu bazu. Algoritam za prognoziranje opterećenja kao ulazne vrijednosti koristi:

- povijesne vremenske nizove opterećenja koji mogu biti:
 - mjerene vrijednosti opterećenja pojedinih potrošača,
 - izračunate vrijednosti potrošnje u realnom vremenu (na temelju mjerenih vrijednosti opterećenja) za skupinu sličnih potrošača (npr., za neko veće promatrano područje poput dijela distribucijske mreže),
- povijesne vremenske nizove utjecajnih varijabli koje čine mjerene vrijednosti utjecajnih varijabli za svakog potrošača ili cjelinu koju želimo prognozirati i
- prognozirane vremenske nizove utjecajnih veličina koje čine prognozirane vrijednosti utjecajnih varijabli za svakog potrošača ili cjelinu koju želimo prognozirati.

U ovom sustavu za prognoziranje se može koristiti do šest utjecajnih varijabli: temperatura, vlaga, naoblaka, vjetar te još dvije utjecajne varijabla prema prosudbi korisnika.

Sustav prognoze opterećenja omogućuje kvalitetno prognoziranje na više razina:

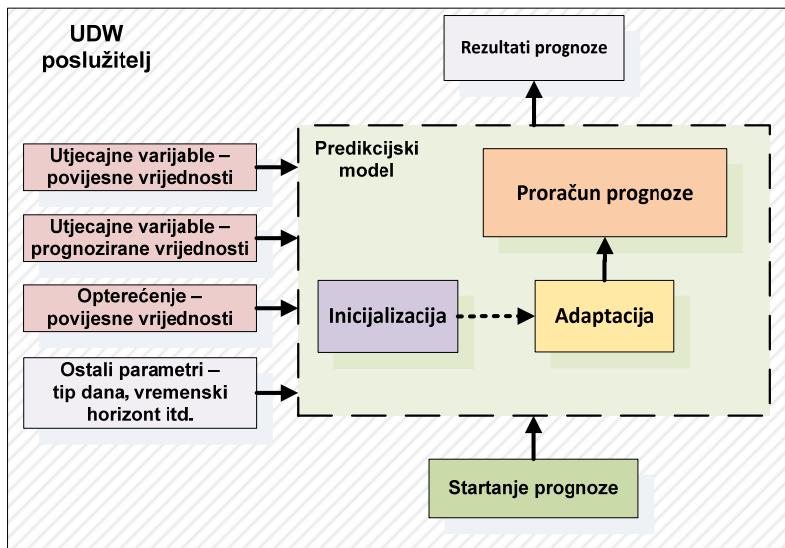
- jednog (privilegiranog) potrošača,
- jednog dijela elektroenergetske mreže i
- cjelokupnog sustava kojim se upravlja.

Za svakog potrošača ili skupinu potrošača promatranu kao cjelinu (npr. distribucijsko područje) čija se potrošnja planira prognozirati (u daljnjem tekstu objekt prognoze, odnosno prognozirani objekt) potrebno je definirati cijeli niz parametara prema njihovim individualnim zahtjevima, a koje je potrebno unijeti prije koraka inicijalizacije, odnosno stvaranja početnog prediktivnog modela određenog prognozirano objekta. U nastavku su navedeni neki od parametara:

- utjecajne varijable – između njih i opterećenja se vrši korelacija,
- veličina osnovnog vremenskog intervala u danu (cijeli dan, sat, 15 minuta i sl.) – utjecajne varijable i opterećenje mogu razlikovati u veličini tog osnovnog vremenskog intervala,
- tablice iz kojih se izvlače podaci i u koje se pohranjuju podaci,
- duljina horizonta predviđanja u rasponu od jednog dana do četiri tjedna,
- ciklički i ne ciklički blagdani i specijalni dani,

- f) tzv. tipovi dana u tjednu koji imaju karakteristično opterećenje – obično se definira 7 tipova dana gdje je svaki običan dan u tjednu zaseban tip dana, dok u tipičnu nedjelju još ulaze i svi blagdani koji padaju u bilo koji dan u tjednu,
- g) parametri za fino namještanje predikcijskog algoritma (definiranje raznih pogrešaka i sl.) itd.

Shemu ključnih faza, kao i ulazno – izlaznih podataka i važnijih parametara pri funkciji prognoziranja vidimo na slici 2.



Slika 2. Važne cjeline pri funkciji prognoziranja

Tri su glavna koraka koja se obavljaju unutar funkcije prognoze opterećenja:

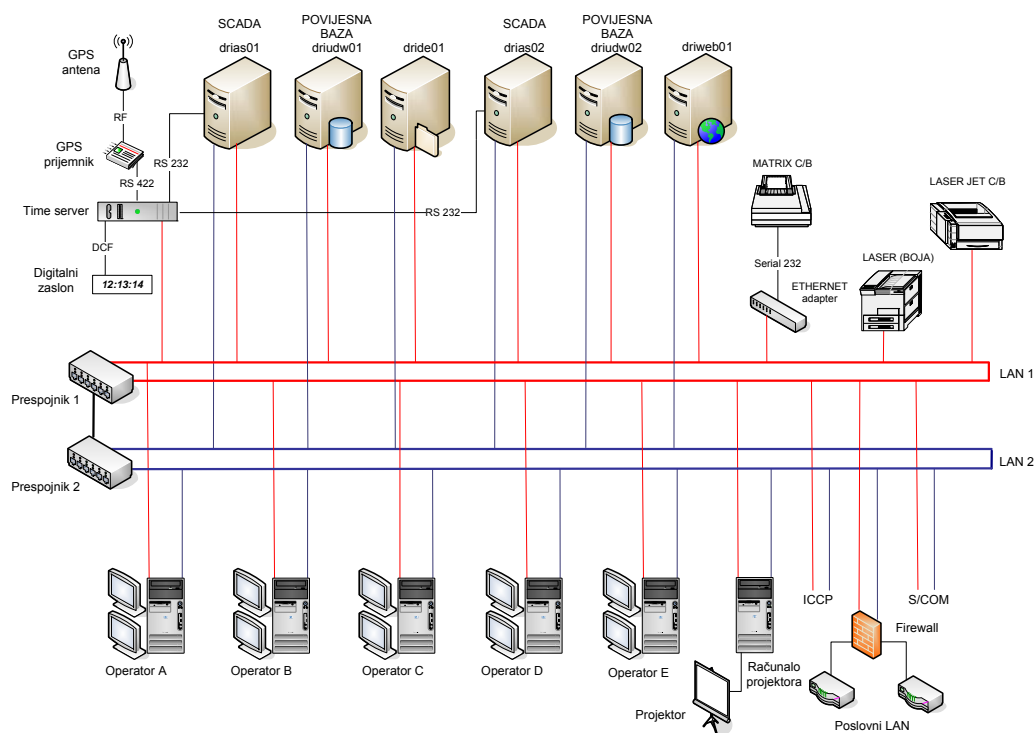
- a) Inicijalizacija – na temelju korelacije povijesnih podataka opterećenja i utjecajnih varijabli se generira početni prediktivni model određenog potrošača. Obavlja se samo jednom na početku procesa prognoziranja. Preporučena duljina povijesnog razdoblja je godina i više dana (minimalna dva tjedna), budući da se kvaliteta prediktivnog modela, odnosno same prognoze povećava veličinom dostupnog povijesnog razdoblja (pod uvjetom da su podaci valjani).
- b) Adaptacija – u ovom koraku, koji se uvijek ponavlja prije koraka predikcije, se vrši adaptacija, odnosno korekcija prediktivnog modela određenog potrošača koji je stvoren pri procesu inicijalizacije na osnovu zadnje pristiglih mjerenja potrošnje spomenutog potrošača i utjecajnih varijabli, a s ciljem da se postigne minimizacija pogreške prognoze.
- c) Predikcija – adaptirani prediktivni model uzima u obzir podatke za prognozu utjecajnih veličina i predviđa vrijednosti opterećenja.

Prognoze utjecajnih varijabli unose u model prognoze opterećenja dodatnu (vlastitu) pogrešku budući da i one same odstupaju od svojih stvarnih veličina. Također, točnost prognoza utjecajnih varijabli je najviša na početku vremenskog horizonta prognoziranja te se smanjuje kako se ide dalje u budućnost duž horizonta prognoziranja; posljedično, isto vrijedi i za točnost prognoze opterećenja.

U sustavu za prognoziranje opterećenja se definira lista poslova koji se mogu automatski izvoditi bilo ciklički bilo u predefinirano vrijeme. Također svaki od predefiniranih poslova može biti pokrenut i ručno. Poslovi koji se mogu automatski izvoditi su proračun adaptacije i proračun prognoziranja, tj. predikcija, dok se proračun inicijalizacije prediktivnog modela pojedinog objekta prognoze izvodi uvijek ručno uz nadgledanje administratora sustava.

2.4. Konfiguracija sustava za prognozu opterećenja

U dispečerskom centru ODS Elektroprimorje Rijeka instalirana je hardverska konfiguracija sustava daljinskog vođenja prikazana na slici 3. Programske funkcije sustava prognoze opterećenja realizirane su na Oracle bazi podataka UDW poslužitelja i na grafičkom sučelju MS Excel-a na tzv. DE (engl. Data Engineering) poslužitelju koristeći programski jezik Visual Basic.



Slika 3. Hardverska konfiguracija sustava daljinskog vođenja dispečerskog centra Elektroprimorja u Rijeci

Programske funkcije instalirane na DE poslužitelju sastoje se od tri dijela:

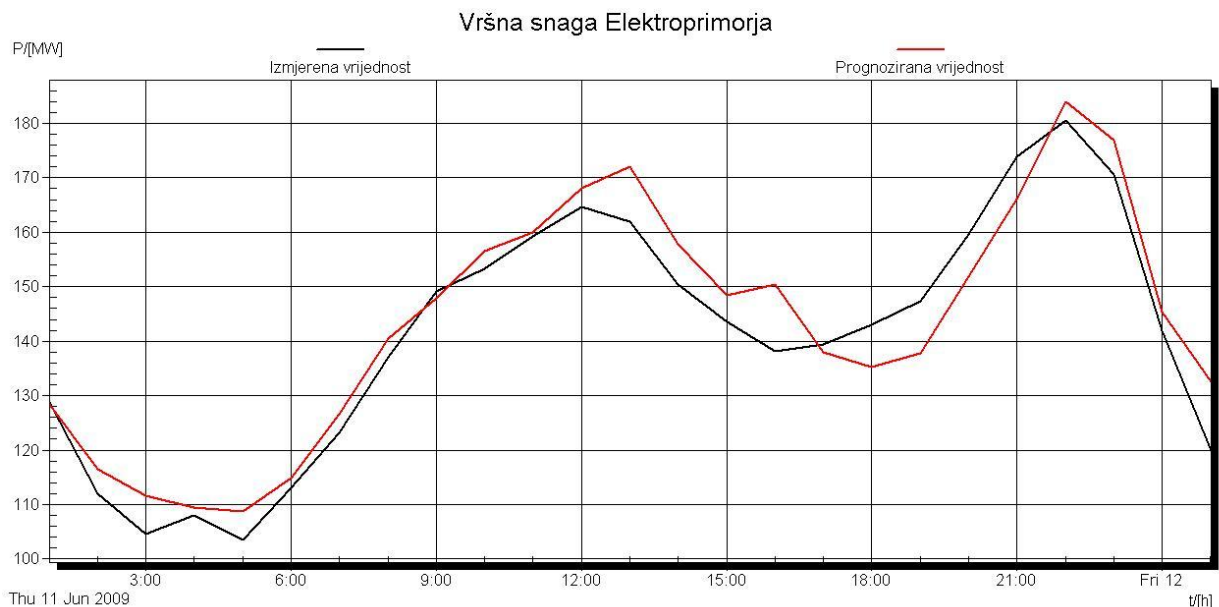
- administratorskog – obuhvaća konfiguracijsku bazu podataka gdje se definiraju potrošači koji se žele prognozirati, kao i svi parametri nužni za rad sustava za prognožiranje opterećenja - nakon obavljenog konfiguriranja sustava, konfiguracijska baza se importira u Oracle bazu podataka na UDW poslužiteljima,
- serverskog – obuhvaća servis koji se brine o obavljanju potrebnih poslova u Oracle bazi podataka na UDW poslužiteljima opisanih u prošlom potpoglavlju,
- korisničkog (može biti instaliran i na nekoj od radnih stanica).

Glavno grafičko sučelje za rad s programskim funkcijama sustava prognoze opterećenja u MS Excel-u sadrži dodatni izbornik preko kojeg se pozivaju dodatna radna sučelja, a kroz koje je moguće promatrati rezultate prognoze i povijesne podatke, pokretati ručno poslove vezane za prognožiranje i sl. Osim u grafičkom sučelju u MS Excelu na DE serveru, sve rezultate prognoze i povijesne podatke moguće je vidjeti i kao trendove ili u jednodimenzionalnim dijagramima na operatorskoj aplikaciji WS500 na radnim stanicama.

2.5. Primjer prognoze opterećenja u sustavu daljinskog vođenja Elektroprimorje Rijeka

Svrha implementiranog podsustava za prognožiranje opterećenja unutar sustava daljinskog vođenja Operatora distribucijskog sustava Elektroprimorje Rijeka jest pomoći u pravovremenom prognožiranju potrošnje unutar pojedinih dijelova distribucijske mreže s ciljem unapređenja planiranja vođenja pogona pojedinih dijelova distribucijske mreže te time i povećanja razine sigurnosti cijelog distribucijskog sustava.

Unutar samog sustava za prognožiranje izvršena je konfiguracija za prognožiranje vršne snage cjelokupnog distribucijskog područja kojim upravlja Elektroprimorje Rijeka. Temperatura se koristi kao jedina utjecajna varijabla. Mjerenja temperature se dobivaju iz transformatorske stanice „Centar“ u Rijeci koja je ocijenjena kao referentna temperaturna točka, dok se vremenski satni nizovi prognozirane temperature za grad Rijeku za sljedećih pet dana svakodnevno dobivaju od Državnog hidrometeorološkog zavoda. Uz redovne državne blagdane, definiran je Badnjak kao dodatni „blagdan“, a Stara godina (31.12) kao specijalni dan. Stvaranje prediktivnog modela za prognožiranje prethodno spomenute veličine učinjeno je neposredno nakon konfiguriranja osnovnih postavaka sustava, dok se adaptacija prediktivnog modela, kao i samo prognožiranje obavlja svakodnevno u 6 i 22 sata za sljedećih 5 dana. Na slici 4 prikazane su krivulje stvarnog i prognožiranog opterećenja vršne snage distribucijskog područja Elektroprimorje Rijeka dana 11.06.2009. godine.



Slika 4. Krivulje stvarnog i prognozirano opterećenja vršne snage distribucijskog područja Elektroprimorje Rijeka dana 11.06.2009. godine

Vidljivo je da prognozirana krivulja opterećenja vrlo dobro prati stvarne, tj. izmjerene vrijednosti. Izračunata vrijednost srednje apsolutne postotne pogreške (engl. Mean absolute percentage error – MAPE) iznosi za spomenuti dan 3,69%. Srednja apsolutna postotna pogreška se računa prema formuli (1):

$$MAPE = \frac{100}{h} \sum_{i=1}^h \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (1)$$

gdje su:

h - broj vremenskih intervala (u ovom primjeru sati) za koji se vrši prognoza,

y - izmjerena vrijednost opterećenja i

\hat{y} - prognozirana vrijednost opterećenja.

Za dulje vremensko razdoblje, primjerice tijekom veljače 2009., srednja apsolutna postotna pogreška iznosi 4,32% te se stoga može zaključiti da je prediktivni model koji se primjenjuje za prognožiranje spomenute veličine dobar, budući da se u literaturi tolerira točnost do 5%.

3. ZAKLJUČAK

U radu je dan opis podsustava prognoze opterećenja implementiranog unutar sustava daljinskog vođenja ODS Elektroprimorje Rijeka koji se temelji na matematičkom modelu Kalmanovog filtra.

Prikazani su rezultati prognožiranja vršne snage cijelog distribucijskog područja Elektroprimorje Rijeka te je potvrđeno da korišteni prediktivni model dobro prognožira željenu veličinu.

Proširivanjem prognožiranja opterećenja na nove objekte prognoze (npr., prognožiranje pojedinih dijelova distribucijskog područja uz definiranje više referentnih temperatura za karakteristična mikroklimatska područja) uz poboljšanje prognožiranja postojećih objekata finim parametriranjem opisani sustav prognoze opterećenja će znatno doprinijeti podizanju kvalitete planiranja i vođenja distribucijskog sustava Elektroprimorje Rijeka.

LITERATURA

- [1] G. Bishop, G. Welch: "An Introduction to the Kalman Filter", University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, USA, 2001.

- [2] K. Tačković, S. Nikolovski, V. Boras: "Kratkoročno prognoziranje opterećenja primjenom modela umjetne neuronske mreže", Energija, HEP, listopad 2008.
- [3] "Implementation Manual – Load Forecast", Network Manager SCADA/EMS/DMS, ABB, 2006.