

# Upravljačko – nadzorni sistem pogona za proizvodnju biodizela

Stanko P. Stankov

Universitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija

## Izvod

U radu je opisan sistem za upravljanje i nadzor postrojenja za proizvodnju ekološki čistog goriva biodizela, koje se dobija transformacijom biljnih ulja u metilestre masnih kiselina reakcijom transesterifikacije. Proces je automatizovan, čime se obezbeđuje sinhronizovan rad uređaja i opreme, optimalna potrošnja energije, eliminiše se uticaj subjektivnog faktora, povećava se efikasnost rada pogona i postiže se dobar kvalitet proizvoda. Upravljačko – nadzorni sistem je zasnovan na PLC i SCADA konfiguraciji sa decentralizovanim distribuiranim upravljanjem tehnološkim celinama - sastavnim delovima postrojenja. Upravljačke jedinice (lokalni PLC kontroleri u sprezi sa operatorskim panelima) smeštene u ormarima duž pogona, vrše prikupljanje lokalnih digitalnih i analognih vrednosti procesnih veličina i prosleđuju upravljačke signale izvršnim organima. Određena odstupanja regulisanih veličina od zadatih vrednosti izazivaju oglašavanje alarma, koji se u vidu svetlosnih i zvučnih upozorenja javljaju na lokalnim panelima i monitoru u dispečerskom centru (DC). Uz to ispisuje se poruka o uzroku, mestu i vremenu nastajanja poremećaja, pri čemu se zahteva od operatera da potvrdi alarm. Ove informacije olakšavaju rad službi održavanja. Vizuelna interpretacija sastavnih celina pogona, tabelarni i grafički prikazi karakterističnih veličina preko dinamičkih ekrana omogućavaju operateru uvid u stanje procesa proizvodnje. Sistem vrši arhiviranje relevantnih podataka, prati istorijat proizvodnog procesa, i generiše dnevne i periodične izveštaje.

*Ključne reči:* nadzor; upravljanje; sirovo ulje; transesterifikacija.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

STRUČNI RAD

UDC 681.518:681.513.5: 665.7

Hem. Ind. 72 (6) 315–328 (2018)

## 1. UVOD

Resursi fosilnih goriva su ograničeni i pri njihovoj eksploataciji nastaju produkti štetni po okolinu. S druge strane, česte političke krize koje destabilizuju tržište goriva nametnule su veliku potrebu za alternativnim izvorima energije koji su obnovljivi i nisu štetni za životnu sredinu [1,2]. Istraživanja su pokazala da su najperspektivnija alternativna goriva dobijena iz biomase. Takvo gorivo je biodizel koji nije toksičan, a pri eksploataciji značajno manje se emituju štetni gasovi koji stvaraju efekat staklene bašte. Sagorevanjem biodizela nastaje onoliko CO<sub>2</sub> koliko biljke od kojih se dobija potroše u procesu fotosinteze [3-5]. Biodizel (komercijalni naziv za metil estar biljnih ulja - MEBU) nastaje u relativno složenom procesu transesterifikacije triglicerida masnih kiselina u metilestre. Sirova biljna ulja koja se dobijaju iz uljane repice, suncokreta, soje, ricinusa, kao i otpadna jestiva ulja sadrže pomenute trigliceride [6,7]. Automatizacija pogona za proizvodnju biodizela izvedena je primenom savremenih tehnika upravljanja, koje su implementirane u PLC (engl. Programmable Logic Controller) i SCADA (engl. Supervisory Control and Data Acquisition) sistemima, što omogućava pouzdan i siguran rad postrojenja, visoku produktivnost, ponovljivost kvaliteta proizvoda, optimalno iskorišćavanje sirovina, s minimalnom potrošnjom energetske resursa [8-10]. Pogon za proizvodnju biodizela razmatran u ovom radu, je kompleksan u tehničkom i tehnološkom pogledu. Namenjen je za kontinualnu proizvodnju. Instalirana raznovrsna oprema i uređaji proizvedeni od strane renomiranih svetskih kompanija garantuju pouzdanost i sigurnost u radu. Deo električnih instalacija u proizvodnom pogonu pripada specijalnim električnim instalacijama gde se primenjuju protiveksplozijski električni uređaji, koji su namenjeni za rad u prostorima ugroženim eksplozivnom atmosferom, zapaljivim gasovima, parama ili prašinom. Potencijalno ugroženi prostori su: određeni delovi proizvodne linije, prostorije za katalizatore, destilaciju i aditiviranje. Ovaj problem je rešen primenom ventilacije čime se obezbeđuje potreban broj izmena vazduha u jedinici vremena (stvara se podpritisak u kritičnoj prostoriji većom količinom odsisnog u odnosu na usisni vazduh, čime se sprečava nekontrolisano širenje eksplozivnih para i prašina). U sistemu ventilacije eksplozivne

Korespondencija: Stanko P. Stankov, Universitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Srbija;

Tel. +381 18 529 364, mob. +381 60 359 2328

E-mail: [stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs](mailto:stanko.stankov@elfak.ni.ac.rs)

Rad primljen: 26. jula 2018.

Rad prihvaćen: 29. novembra 2018.

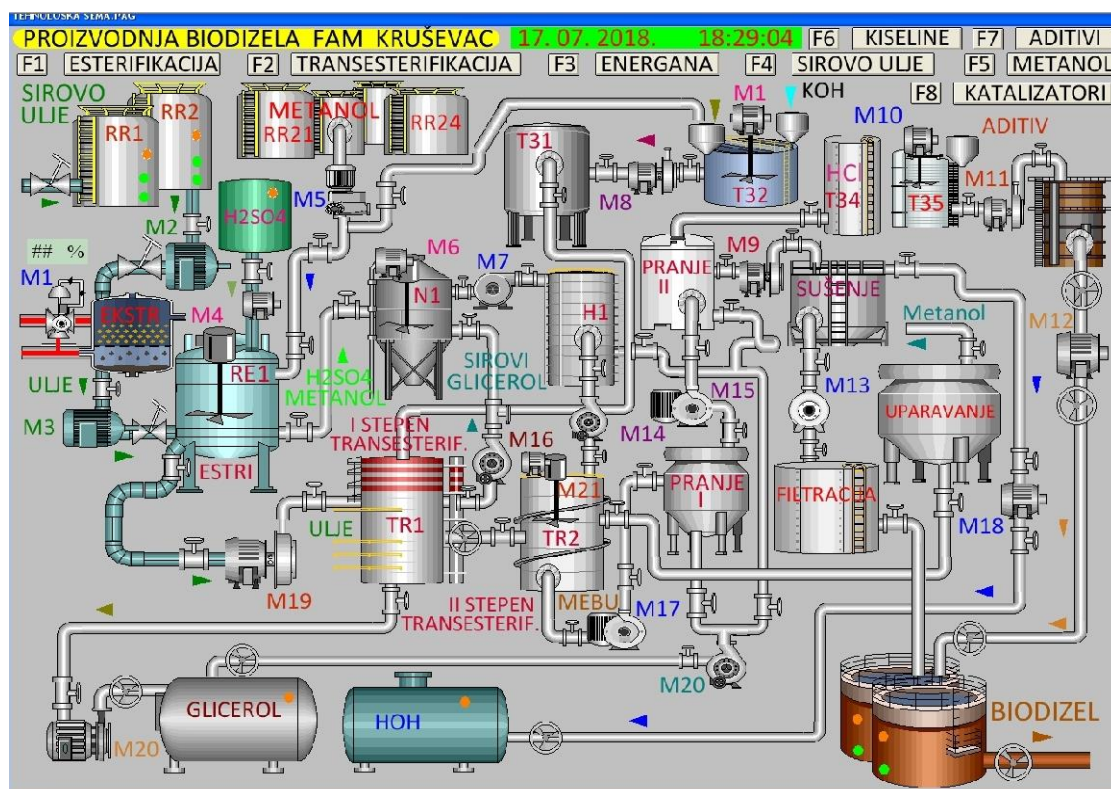
<https://doi.org/10.2298/HEMIND180726024S>



atmosfere koncentracija zapaljivih čestica mora biti manja od 50 % donje granice eksplozivnosti, a temperatura ograničena na najviše 80 % temperature paljenja čestica s najmanjom temperaturom zapaljivosti. U svim tehnološkim celinama postoji veliki broj elemenata automatizacije (analogni merni elementi: nivoa, temperature, pritiska, brzine, protoka, pozicije; sigurnosni elementi: presostati, kontaktni manometri, granični merači nivoa, sigurnosni termostati i dr.). Instaliran je veliki broj izvršnih organa: jednobrzinskih i dvobrzinskih ventilatora u protiveksplozivnoj zaštiti, klasičnih ventilatora, veliki broj elektromotora različitih snaga koji služe za pokretanje pumpi, mešalica i transportera. Osim toga instaliran je veliki broj elektropneumatskih on/off i regulacionih ventila, elektromagnetnih ventila i elektromotornih pogona za protivpožarne klapne.

## 2. STRUKTURA POGONA ZA PROIZVODNJU

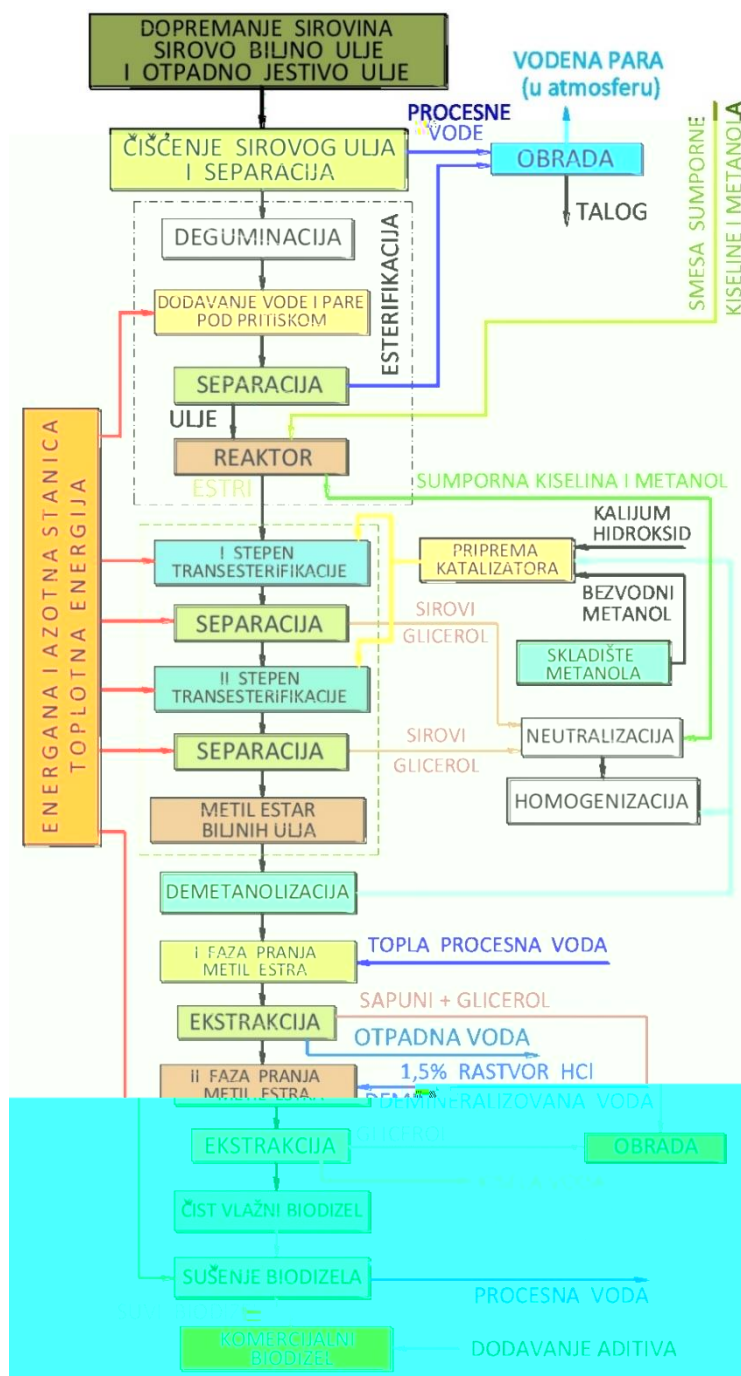
Proizvodni pogon se sastoji iz nekoliko tehničko-tehnoloških celina (slika 1 prikazuje jedan SCADA ekran pogona): skladišta s pretakalištama sirovog ulja, metanola, glicerola, kiselina; linija za čišćenje sirovog ulja, za esterifikaciju, za pripremu katalizatora, aditiva, linija za transesterifikaciju i aditiviranje. Neophodna toplotna energija se dobija iz energane u čijem su sastavu azotna stanica i kompresori. U sklopu proizvodnje je hemijska laboratorija u kojoj se pripremaju recepture, vrše analize uzoraka iz proizvodnje, i prati dinamika procesa i kvalitet proizvoda [8].



*Slika 1. Struktura pogona za proizvodnju biodizela*

Figure 1. Structure of the biodiesel production plant

Blok šema procesa proizvodnje prikazana je na slici 2. Posmatrajući slike 1 i 2 može se pratiti procedura tehnološkog procesa proizvodnje. Dopremljeno sirovo ulje se najpre čisti pri čemu se izdvaja procesna voda koja isparava i ostaje talog. Proces se dalje odvija kroz postupak esterifikacije gde se vrši tzv. deguminacija ulja (izdvajanje sluznih materija poput fosfolipida, proteina, lipoproteina i sl.) [12]. Ulju se dodaju voda i para pod pritiskom na temperaturi od 60 °C, uz intenzivno mešanje.



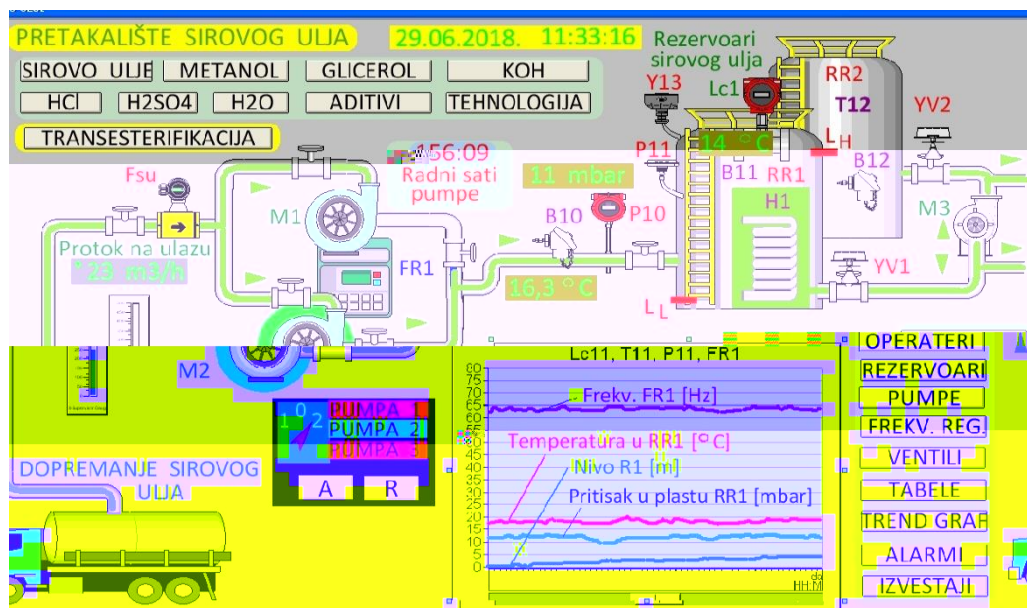
Slika 2. Blok šema procesa proizvodnje biodizela  
Figure 2. Block diagram of the biodiesel production process

Okavio tretirano ulje vodi se u separator gde nastaje izdvajanje vode, a ulje se zajedno sa otpadnim uljem iz procesa proizvodnje uvodi u reaktor RE1 gde se dodaju sumporna kiselina i metanol. Tokom esterifikacije dobijaju se estri slobodnih masnih kiselina. Uljni deo koji je lakši od metanola i sumporne kiseline se odvaja i ide u postupak transesterifikacije. Kiselina i metanol se kasnije neutrališu u neutralizatoru N1 do pH 7, pomoću glicerola nastalog u procesu transesterifikacije. Po završetku neutralizacije smesa se odvodi u homogenizator H1 uz dodavanje metanola, a zatim se ova smesa odvodi na dekanter u kome se odvaja uljni deo i pasta kalijum sulfata od sirovog glicerola [5-8]. Ulju se dodaje smesa katalizatora (kalijum hidroksid) i bezvodnog metanola kada se sprovodi prva faza transesterifikacije. Proces zatim prolazi drugu fazu transesterifikacije, pri čemu se opet izdvaja zaostali glicerol i dobija se MEBU. Uparavanjem se sprovodi demetanolizacija, a izdvojeni metanol se vraća u proces proizvodnje. Nakon toga vrši se pranje biodizela u dva koraka. U prvom nastaje izdvajanje sapuna, glicerola i otpadne vode, a u drugom koraku se dodaje rastvor HCl i demineralizovane vode, pri čemu se izdvajaju glicerol i kisele vode. Dobija se čist vlažni biodizel koji se

podvrgava sušenju u vakuum destilacionoj koloni. Svi prethodno pomenuti postupci se odvijaju na odgovarajućoj temperaturi (toplotna energija se dobija iz energane). Kvalitet proizvedenog biodizela se poboljšava dodavanjem aditiva - hemijskih supstanci ("toluen" i "wintron XC-30" u količini 0,01 % do 0,1 %) koje deluju kao antioksidanti, baktericidi i snižavaju tačku tečenja biodizela. Aditivi se skladište u posebnim rezervoarima iz kojih se vrši doziranje određene količine pomoću pumpe. Homogenizacijom smeše biodizela i aditiva dobija se finalni proizvod - biodizel.

### 3. SKLADIŠTA S PRETAKALIŠTIMA

Skladišta s pretakalištima sirovog ulja, metanola, glicerola, kiselina, slične su konfiguracije, imaju određen broj rezervoara s duplim plaštovima, pumpne agregate, odgovarajuću mernu i regulacionu infrastrukturu. Pumpe se napajaju iz sopstvenih frekvencijskih regulatora (FR) ili soft startera, čime se obezbeđuje regulacija broja obrtaja i brojne zaštitne funkcije. Upravljački napon frekvencijskih pretvarača je spoljnji, dakle iz posebnog izvora pri čemu se na jednostavan način omogućava uključivanje energetskog kola pretvarača kada postoji signal za pokretanje pumpe. Na taj način se dodatno štedi energija, odnosno ne proizvode se gubici kada je to nepotrebno [8-10]. Mere se diskretno i kontinualno nivoi i temperature u rezervoarima, protoci i pritisci. Na vratima ormara postavljeni su za svaku pumpu izborni prekidači kojima se mogu izabrati režimi rada: 1 – Blokada, 2 – Ručno, 3 – Automatski. Režim blokada se koristi za slučaj kvara elektromotornog pogona ili pumpe, pri čemu se vrši isključenje konkretnog agregata uz signalizaciju na operatorskom panelu i SCADA sistemu. Ručni režimi rada se mogu ostvariti i u slučajevima potpune nefunkcionalnosti PLC i SCADA sistema, dok je automatski rad moguć ako je ispravan lokalni PLC (lokalni režim), odnosno PLC i SCADA sistem (daljinski režim). Automatski režim rada je uobičajen, dok je ručni mod havarijski, bez regulacije protoka u potisnim cevovodima, ali sa implementiranim odgovarajućim zaštitama pumpi. Pored toga ručni režim rada se aktivira kada se želi proba pojedinih pumpnih agregata, npr. prilikom prvog puštanja u rad, servisiranja, održavanja i sl. Na lokalnim operatorskim panelima mogu se pratiti stanja agregata, izvršiti dijagnostika eventualnih upozorenja i alarmnih stanja i po potrebi poništiti pojedine greške i alarmi. Dodatno se parametri pojedinih agregata mogu pratiti na lokalnim operatorskim panelima FR. Na slici 3 je prikazan SCADA ekran skladišta sirovog ulja.



Slika 3. Skladište sirovog ulja

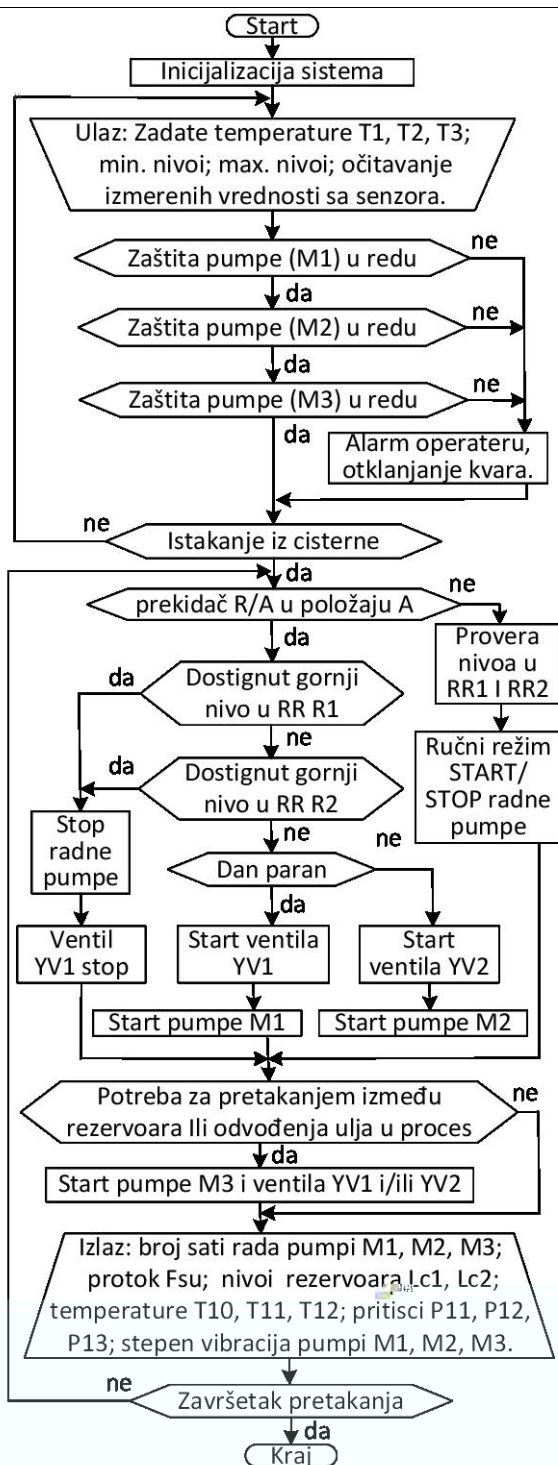
Figure 3. Storage of crude oil

Skladištenje sirovog ulja, koje se doprema autocisternama vrši se u rezervoarima RR1 i RR2 pomoću centrifugalnih pumpi M1 i M2 (rezervna i radna). Pozadina radne pumpe je obojena zeleno. Kapacitet pumpe (20-40 m<sup>3</sup>/h) je određen brzinom motora koja se reguliše preko FR. Cevovodi DN 80 omogućavaju da se pri kapacitetu pumpe 20 m<sup>3</sup>/h postiže brzina strujanja ulja od 1,1 m/s, a pri kapacitetu od 40 m<sup>3</sup>/h strujanje se odvija brzinom 2,2 m/s. Na grafiku (slika 3) mogu se pratiti parametri rezervoara RR1 (nivo i temperatura ulja, pritisak u plaštu, frekvencija rada motora radne pumpe M2 je 64 Hz). Prilikom istakanja iz cisterne vrši se merenje protoka ulja pomoću masenog merača protoka – Fsu, koji poseduje lokalni displej, pri čemu se kontinualno nadgledaju i memorišu: maseni protok, trenutna gustina i



temperatura sirovog ulja. Pretakanje iz jednog u drugi rezervoar, kao i odvod sirovog ulja u proces proizvodnje vrši se pomoću regulacionih elektropneumatskih ventila YV1, YV2 i pumpe M3.

Prednosti savremenog upravljanja pumpama su: održavanje konstantnog, unapred zadatog protoka; potrebne brzine strujanja kroz cevovod; meki start pumpi, što elimiše strujne udare u električnoj mreži; zaštita motora u električnom i mehaničkom smislu; eliminisanje hidrauličkih udara; ušteda energije; veliki broj zaštitnih funkcija elektromotora (ispad faze, prekostrujno opterećenje, podnapon, prenapon, kratak spoj, temperaturna zaštita, zaštita od zemljospoja, prodora vlage, kompenzacija kratkotrajnog prekida napajanja). Rad podsistema proizvodnog kompleksa odvija se prema određenim algoritmima. Uprošćena šema jednog takvog algoritma (konkretno za skladištenje i pretakanje sirovog ulja) data je na slici 4.

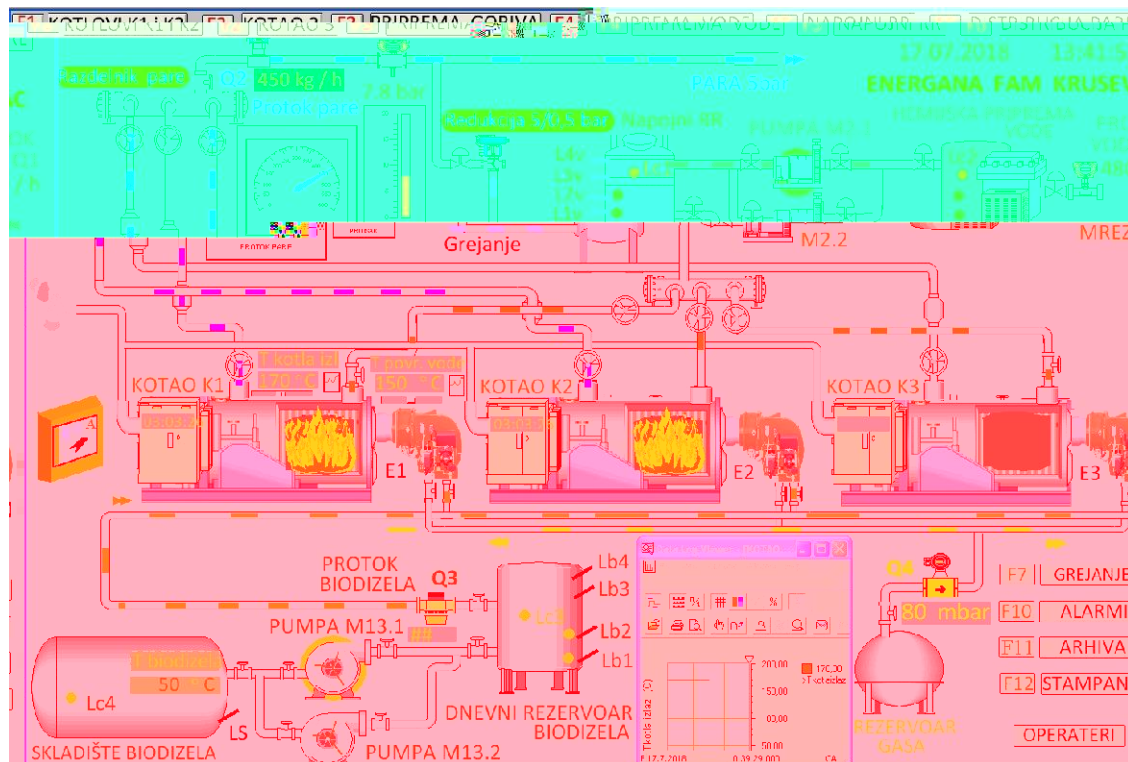


*Slika 4. Algoritam rada skladišta sirovog ulja*

Figure 4. Algorithm for the operation of the crude oil storage

#### 4. ENERGANA

Energetske potrebe pogona - grejanje prostorija, vodena para za odvijanje tehnoloških procesa, kompresorsko postrojenje, azotna stanica (za pokretanje elektropneumatskih on/off i regulacionih ventila koristi se inertni gas azot, koji ne mrzne do  $-40^{\circ}\text{C}$ ) obezbeđuju se iz kompleksa energane. Na slici 5 je dat jedan SCADA ekran energane (prkazana je kotlarnica s parnim kotlovima). Energenti su gas ili biodizel. Napojna voda, pre uvođenja u kotlove prolazi fazu hemijske pripreme (omekšavanja) i predgrevanja. Dva kotla su radna, a treći je u stanju pripravnosti („stand-by“) kao rezervni. Ovde se mere karakteristične veličine – temperature izlazne i povratne vode u kotlovima, pritisak generisane vodene pare, nivoi u rezervoarima goriva i vode, protoci vode, pare, gasa i biodizela (Q1, Q2, Q3 i Q4, redom). Slika prikazuje tekuće vrednosti procesnih veličina. Grafik u okviru slike prikazuje temperaturu izlazne pare kotla 1 ( $170^{\circ}\text{C}$ ) [8]. Izbor prikaza se vrši pritiskom na određeni funkcijski taster ili odabirom označenog pravougaonika.



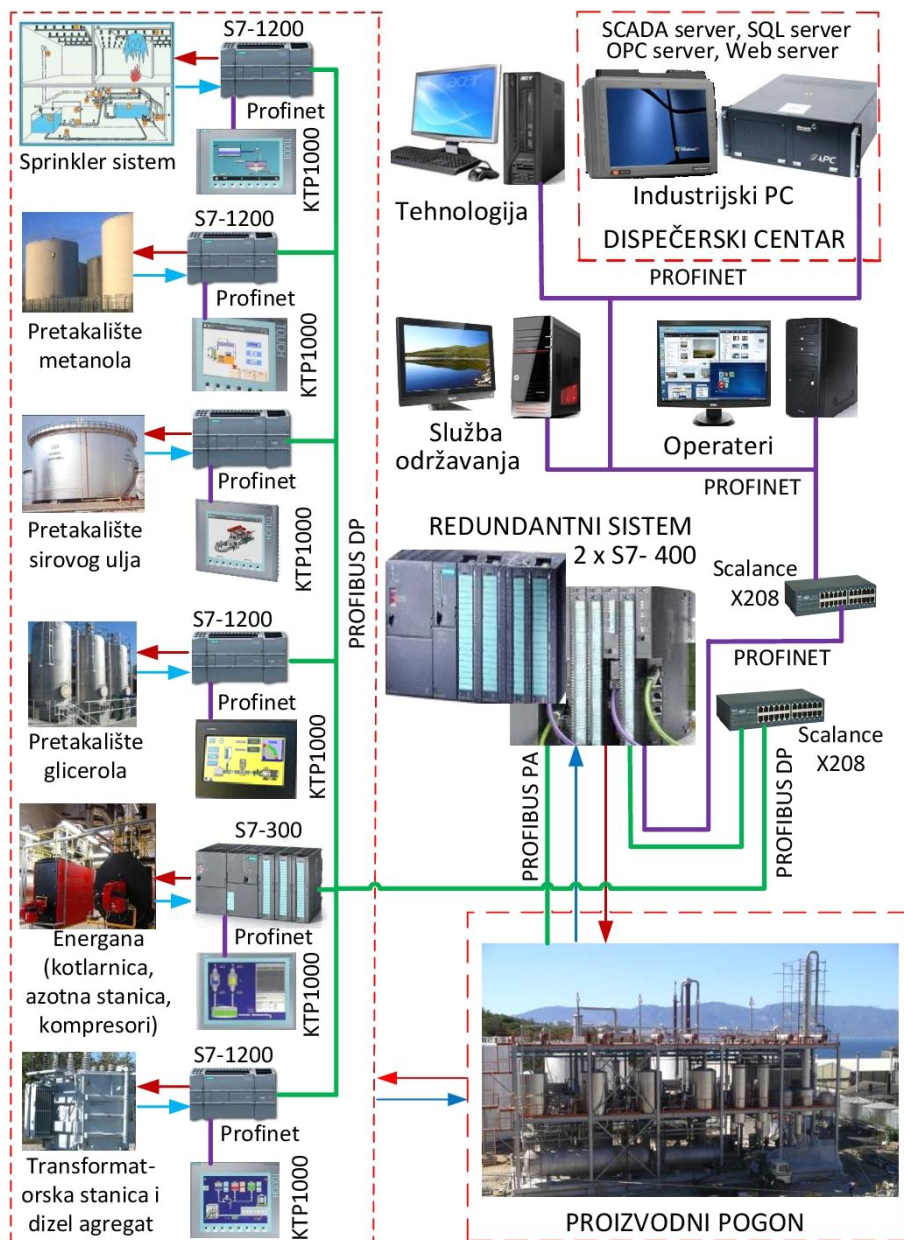
Slika 5. SCADA ekran energane

Figure 5. SCADA screen of the energy supply

#### 5. UPRAVLJANJE I NADZOR

Automatizacija celokupnog postrojenja izvedena je integralno s hardverskim i softverskim komponentama jednog sistema, u ovom slučaju sistema "Simatic", proizvoda kompanije Siemens svetskog lidera u oblasti automatizacije. Na ovaj način korisnik je nezavisan u pogledu hardvera, omogućena je brza i jednostavna zamena u slučaju havarija i obezbeđena je izuzetna fleksibilnost ako se kasnije javi potreba za proširenjem upravljačke logike. Hardverska platforma je otporna na vibracije, termičke stresove i elektromagnetne smetnje karakteristične za industrijsko okruženje. Linijom za proizvodnju biodizela upravlja robusni tandem spoj dva kontrolera Simatic S7-400. Ovi kontroleri su namenjeni za sistemsko rešenja u procesnoj industriji s vrlo zahtevnim aplikacijama. Njihove osnovne odlike su: velika brzina izvršavanja instrukcija, realizacija brzih komunikacionih procedura i mogućnost zamene modula tokom rada [9, 10]. Upravljanje pojedinim tehnološkim celinama kao što su: transformatorska stanica i dizel agregat, skladišta i pretakališta sirovog ulja, metanola i glicerola, sistem za gašenje požara – sprinkler sistem, vrše lokalni kontroleri SIMATIC S7-1200, a energanom sa azotnom stanicom i kompresorima upravlja kontroler S7-300. Pomenuti kontroleri imaju modularnu strukturu. Zadavanje i pregled parametara i veličina određene tehnološke celine vrši se na operatorskom kolor panelu KTP, koji povezani s PLC kontrolerom čine upravljački sistem. Kontroleri su sa master PLC kontrolerom povezani preko industrijske mreže Profibus. Konfiguracija i programiranje ovih kontrolera kao i razvoj upravljačko - nadzornog programa za SCADA PC računar i operatorske panele vrši se pomoću Simensovog programskog paketa TIA Portal (Totally Integrated

Automation). Ova objedinjena razvojna softverska platforma, zasnovana na naprednoj objektno-orijentisanoj arhitekturi i centralizovanom upravljanju podacima, obezbeđuje visok nivo efikasnosti kroz celokupan projekat automatizacije [9,10]. Arhitektura upravljačko-nadzornog sistema proizvodnog pogona prikazana je na slici 6. Veza između procesa i upravljačkih jedinica ostvaruje se preko digitalnih i analognih ulaznih i izlaznih modula. Statusi prekidačkih elemenata (glavni prekidač i osigurači transformatorske stanice, prekidači i osigurači ormara pojedinih tehnoloških celina, osigurači motora, termorelea, merači graničnih nivoa fluida, sigurnosni termostati, kontakti manometri, presostati) vode se na digitalne ulazne module. Signali sa senzora nivoa, pritiska, temperature, protoka, brzine, koncentracije gasova povezani su na analogne ulaze. Preko digitalnih i analognih izlaza šalju se upravljački signali izvršnim organima (pumpe, ventilatori, mešalice, elektromagnetni i elektropneumatski on/off i regulacioni ventili, gorionici). Soft starteri i frekvencijski regulatori povezani su sa upravljačkim jedinicama preko komunikacije (Simensov standard PROFIBUS PA - Process Automation) [8].



Slika 6. Blok šema upravljačko-nadzornog sistema

Figure 6. Block diagram of a supervisory control system

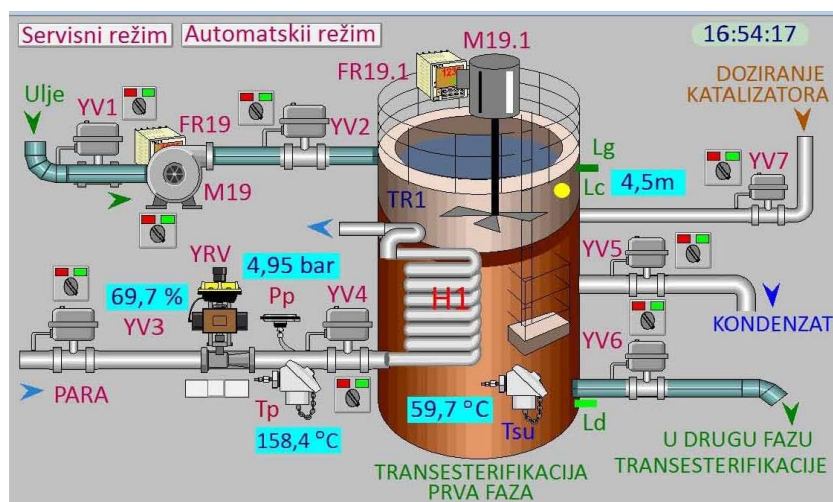
SCADA upravljački sistem je koncipiran u vidu menija i podmenija, pri čemu se prikazuje funkcionalnost sistema uz određene animacije (npr. rad pumpe, elektropneumatskih ventila, gorionika u kotlovima i dr.), daje se prikaz promene

neke veličine u realnom vremenu u vidu grafičke zavisnosti ili u digitalnom obliku (nivoi, protoci, temperature itd.), a dostizanje graničnih vrednosti se signalizira kao alarmna poruka uz zvučnu i svetlosnu signalizaciju. Prilikom sagledavanja kapaciteta SCADA sistema polazi se od ulaznih i izlaznih veličina i parametara upravljanog postrojenja. Na osnovu toga vrši se projektovanje hardverske konfiguracije upravljačkog sistema i određivanje broja ulaznih i izlaznih signala (digitalnih i analognih) i planira se broj tagova SCADA [8-10]. SCADA sistem izvršava sledeće zadatke: prikupljanje digitalnih i analognih podataka sa svih objekata povezanih u sistemu u realnom vremenu (veliki broj tagova); arhiviranje relevantnih informacija dobijenih na osnovu akvizicije u relacionoj bazi podataka; prezentacija podataka u realnom vremenu i arhiviranih podataka putem sinoptičkih ekrana, trendova, grafikona i tabela; upravljanje u realnom vremenu i monitoring tehničko-tehnoloških celina pogona.

Skladištenje i prezentovanje informacija sa svih objekata vrši se u dispečerskom centru (DC) u kome su instalirani serveri i radne stanice:

- master SCADA server - glavni server u sistemu u kome se nalaze podaci u realnom vremenu sa svih objekata i on vrši prezentaciju ovih podataka za radne stanice (veliki broj ekrana) i generiše sve vrste grafičkih i tabelarnih izveštaja na osnovu arhiviranih podataka;
- master SQL server skladišti u relacionu bazu podataka sve tipova informacija koje su prikupljene u glavnom SCADA serveru, kako bi se te informacije kasnije prikazale i analizirale;
- rezervni (engl. "backup") SQL server - redundantni server u sistemu, koji dobija podatke "replikacijom" od master SQL servera;
- domenski (engl. "domain control") server obezbeđuje ispravan domenski rad celog SCADA sistema sa svim servisima koje zahteva ovakav kompleks;
- Web server omogućava autorizovanim korisnicima distribuciju i prezentovanje podataka arhiviranih u SCADA i SQL serverima preko interneta. Prikazivanje podataka na Web-u se izvršava spajanjem OPC (engl. "Object Linking and Embedding for Process Control") servera i HTTP (engl. "Hypertext Transfer Protocol") servera, pri čemu se podaci iz OPC servera transformišu u HTML (engl. "HyperText Markup Language") oblik [8]. Pomenuti serverski sistemi i klijent računari instalirani u DC, službi održavanja i tehnologiji su podržani adekvatnim hardverskim platformama (snažni procesori, RAM i hard diskovi odgovarajućih kapaciteta, ethernet kartice, monitori).

Ilustracije radi naveden je primer regulacije zagrevanja sirovog ulja u prvoj fazi transesterifikacije. U reaktor TR1 (zapremine 10 m<sup>3</sup>), dovodi se sirovo ulje preko on/off elektropneumatskih ventila YV1, YV2 i pumpe M19 čija se brzina reguliše pomoću FR19 (SCADA ekran na panelu osetljivom na dodir - slika 7).



Slika 7. Konfiguracija linije za prvu fazu transesterifikacije

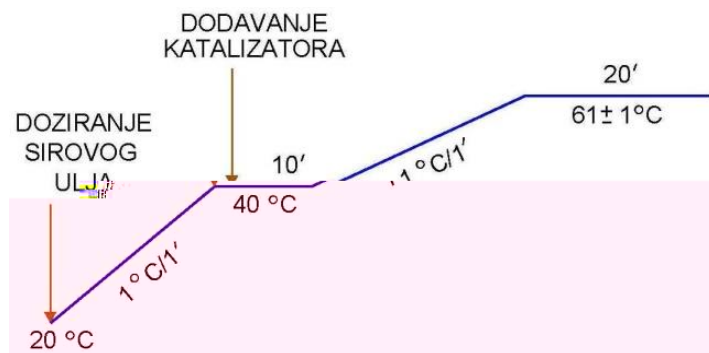
Figure 7. Configuration of the line for the first phase of transesterification

Ulje se postepeno zagreva na temperaturu  $61 \pm 1$  °C, prema temperaturno - vremenskom dijagramu (slika 8), vodenom parom čija je temperatura 170 °C, a pritisak 5 bar. U određenom trenutku ulju se dodaje katalizator radi ubrzanja reakcije. Mešalicom M19.1, čija se brzina reguliše takođe promenom frekvencije (regulator FR19.1), vrši se mešanje ulja i katalizatora.

Ovde se mere diskretni nivoi (Ld i Lg) i kontinualni nivo (Lc - kapacitivni merač) u reaktoru, temperature ulja Tsu i pare Tp (Pt100 senzori s mernim pretvaračima čiji su izlazni signali 4 – 20 mA) kao i pritisak pare Pp (4 - 20 mA). Protok pare se odvija preko elektropneumatskih ventila: dva on/off (YV3, YV4) i jednog regulacionog (YRV), kao i spiralnog



grejača H1. Ventil YV5 služi za ispuštanje kondenzata, a preko ventila YV6 ulje ide u drugu fazu transesterifikacije. Dodavanje katalizatora se vrši preko ventila YV7. Linija može raditi u servisnom ili automatskom modu. U servisnom režimu mogu se uključivati, pomoću prekidača na panelu, on/off ventili i pumpa, a otvorenost regulacionog ventila se može menjati potencijometrom. Upravljačka logika (PLC), na osnovu zadate vrednosti temperature ulja i izmerene tekuće vrednosti, preko PI zakona, koji je u ovom slučaju primenjen, reguliše pogon motora male snage, koji se nalazi u pozicioneru ventila. Motor pokreće za određeni procenat loptasti zatvarač ventila u jednom ili drugom smeru. Kroz otvor ventila propušta se komprimovani vazduh potreban za zakretanje mehanizma u sklopu ventila u parnom cevovodu, čime se reguliše vrlo precizno protok pare u opsegu 0 – 100 %, s korakom 0,1 %. U konkretnom slučaju koristi se regulacioni ventil DN100 nemačkog proizvođača „Festo“ s pozicionerom „CMSX-P-S“. Trenutna pozicija ventila se dobija na osnovu signala 4 – 20 mA. Vreme potpunog otvaranja parovoda u ovom slučaju je 16 s.



Slika 8. Temperaturno – vremenski dijagram prve faze transesterifikacije

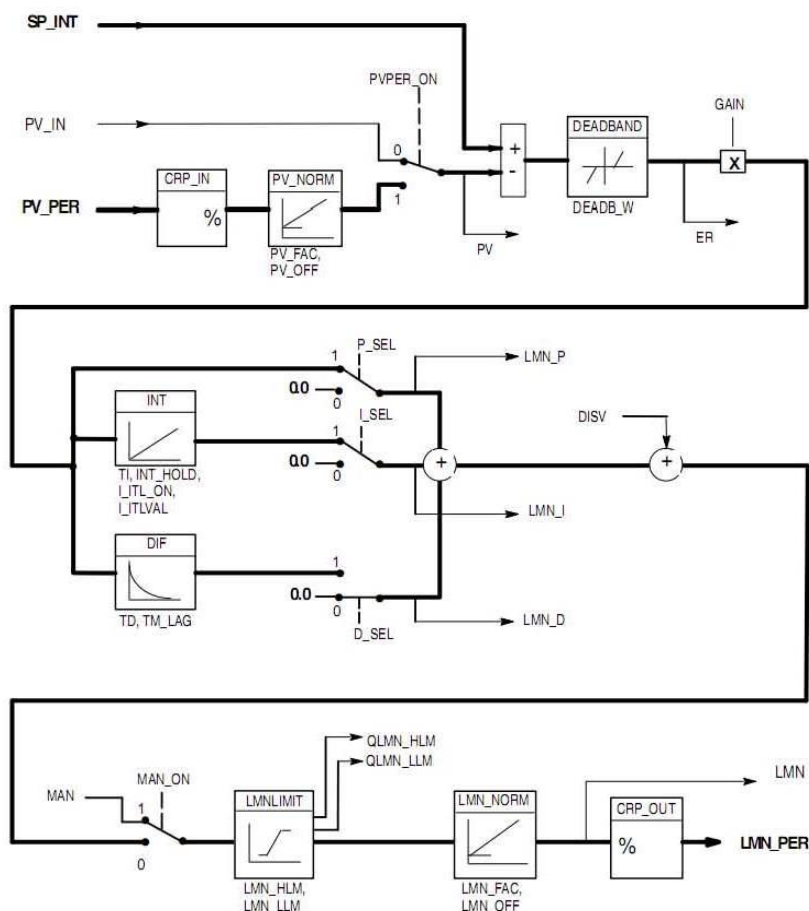
Figure 8. Temperature - time diagram of the first phase of transesterification

Upravljačka jedinica PLC sadrži standardne programske module PID regulatora u digitalnoj formi, koji se dobijaju diskretizacijom odabrane strukture analognog PID nekom od uobičajenih metoda aproksimacije (Ojlerova, Tustinova). Pravilan izbor vremena odabiranja omogućava da se digitalni regulator ponaša približno kao analogni. PLC preko svojih analognih ulaza i A/D konvertora prihvata analogne veličine iz upravljanog procesa, obrađuje dobijene informacije i na kraju pomoću D/A konvertora šalje analogni upravljački signal izvršnom organu (frekvencijskom regulatoru, regulacionom ventilu i sl.). Obrada dobijenih informacija se odvija korišćenjem PID algoritma, koji je integrisan u izvršni program PLC kontrolera.

Programske realizacije PID regulatora, u razvojnim platformama, znatno se razlikuju od proizvođača do proizvođača. Naime, osim osnovnog algoritma u kome je sadržano P, I i D dejstvo, programski regulator je dopunjen, zavisno od realizacije, funkcijama limitiranja, skaliranja, funkcijama za prelazni režim, s mogućnošću biranja oblika izlaznog upravljačkog signala (binarni–PWM, ternarni, analogni). Kod kontrolera familije “Siemens S7”, u okviru razvojnog okruženja “SIMATIC Manager”, koristi se standardna biblioteka s funkcijskim blokovima u kojima je realizovan PID zakon - slika 9 [11]. Ovi blokovi su unapred programirani i smešteni u memoriji kontrolera odakle se lako integrišu u korisnički program kojim se rešava konkretan problem regulacije. Postoje tri funkcijska bloka: FB41 “CONT\_C” (ovaj blok se koristi u slučaju upravljanja s kontinualnim ulaznim i izlaznim veličinama, kao što je u opisanom procesu), FB42 “CONT\_S” (regulacija procesa kod kojih je primenjen regulator s digitalnim izlazom npr. pojačavači snage) i FB43 “PULSGEN” (blok koji pretvara amplitudu signala u trajanje impulsa, što je u suštini širinsko–impulsna modulacija).

Pomenutim blokovima odgovaraju sistemski funkcijski blokovi SFB41, SFB42 i SFB43 redom. Blok FB41 se poziva u organizacioni blok OB35, koji je namenjen za ciklični prekid, što omogućava konstantnu periodu odabiranja. Svakom regulatoru je iznad bloka PID potrebno pridružiti njegov blok podataka. Na taj način se podaci svih parametara PID algoritma pripremaju u pridruženom bloku podataka, a blok FB41 se praktično može pozivati neograničen broj puta.

Referentna vrednost regulisane procesne veličine SP\_INT zadaje se u procentima, a izmerena vrednost može biti ili PV\_IN što znači da je interna iz programa ili dovedena preko analognog ulaza PV\_PER. Izbor se vrši preko promenljive (preklopnika) PVPER\_ON da bi se željena i odabrana vrednost procesne promenljive dovele u sabirač. Na izlazu sabirača, greška (regulaciono odstupanje) se množi s proporcionalnim pojačanjem i vodi na obradu u tri paralelne grane (P, I i D dejstvo). Promenljive (preklopnici) P\_SEL, I\_SEL i D\_SEL dozvoljavaju pojedinačno delovanje. Prekidač MAN\_ON daje mogućnost slanja upravljačkog signala dobijenog izvršenim algoritmom ili ručno generisanog signala MAN. Nezavisno od izbora upravljačkog signala, definišu se gornja i donja granična vrednost (QLMN\_HLM, QLMN\_LLM), vrši se normiranje i dobija se vrednost upravljačke promenljive LMN. Upravljačka vrednost LMN\_PER je izražena u procentima posle bloka CRP i može se poslati direktno na analogni izlaz. Očigledno je, sa strukturne šeme, da se funkcijski blok FB41 izvršava prema jednačini:



Slika 9. Strukturna šema PID algoritma realizovanog u funkcijskom bloku FB41

Figure 9. Structural scheme of the PID algorithm realized in the function block FB41

$$LMN = GAIN \left[ ( ) + \frac{1}{i} \int ( ) d + d \frac{d ( )}{d} \right] \quad (1)$$

gde su: LMN – vrednost upravljačke veličine, GAIN – pojačanje regulatora,  $e(t)$  – greška,  $T_i$  – integraciona vremenska konstanta,  $T_d$  – diferencijalna vremenska konstanta i  $t$  – vreme. Parametri PID regulatora podešavaju se u aplikaciji PID Control Parameter Assignment. U okviru aplikacije bira se pridruženi blok podataka u kome se pripremaju podaci za PID, a zatim se otvara prozor za podešavanje parametara P, I i D. Može se vršiti izbor prema tome da li regulator prati procesnu promenljivu sa analognog ulaza ili internu vrednost. Svi parametri PID regulatora se mogu podesiti direktno u pridruženom bloku podataka unutar razvojnog okruženja "SIMATIC Manager". U tabeli 1 [11] dati su izlazni parametri bloka FB41.

Funkcija prenosa procesa zagrevanja ulja u reaktoru napunjenom sa 8 m<sup>3</sup>, predstavljena je inercionim elementom prvog reda s transportnim kašnjenjem:

$$( ) = \frac{K}{1 + T s} e^{-\tau s} \quad (2)$$

gde je  $K$  statičko pojačanje procesa,  $T$  vremenska konstanta procesa, a  $\tau$  transportno kašnjenje. Odziv dobijen snimanjem odskočne pobude s raskinutom povratnom spregom je aperiodičan. U konkretnom slučaju je:  $K=1,06$ ;  $\tau=92$  s,  $T=382$  s, tako da jednačina (2) postaje:

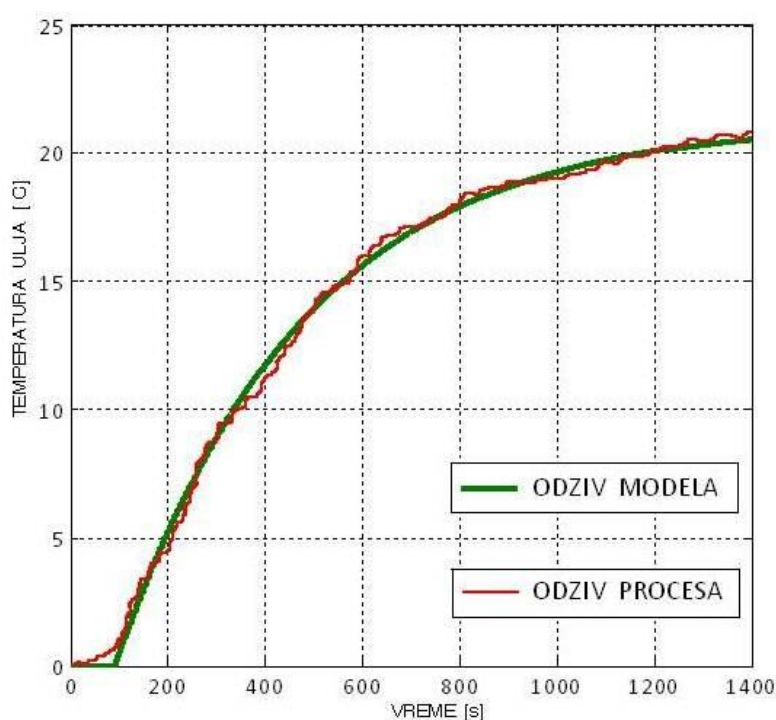
$$( ) = \frac{1,06}{1 + 382s} e^{-92s} \quad (3)$$

Evidentno je da se radi o inernom procesu. Slika 10 prikazuje odskočni odziv za temperaturni interval (20 – 40) °C.

Tabela 1. Izlazni parametri funkcijskog bloka FB41

Table 1. Output Parameters of the Function Block FB41

Parametar	Tip	Vrednosti u radnoj tački	Podrazumevane vrednosti	Opis
LMN	Real	40.0	0.0	Efektivni izlaz regulatora je u formatu pokretnog zareza
LMN_PER	Word	W#2B33	W#16#0000	Konvertovani izlaz regulatora koji se može spojiti na proces preko analognog izlaza
QLMN_HLM	Bool	False	False	Dostignuta gornja granica izlaza regulatora
QLMN_LLM	Bool	False	False	Dostignuta donja granica izlaza regulatora
LMN_P	Real	1.45	0.0	Proporcionalni član
LMN_I	Real	458.4	0.0	Integralni član
LMN_D	Real	0.0	0.0	Diferencijalni član
PV	Real	38.7	0.0	Procesna promenljiva
ER	Real	1.3	0.0	Signal razlike



Slika 10. Odskočni odziv procesa zagrevanja sirovog ulja

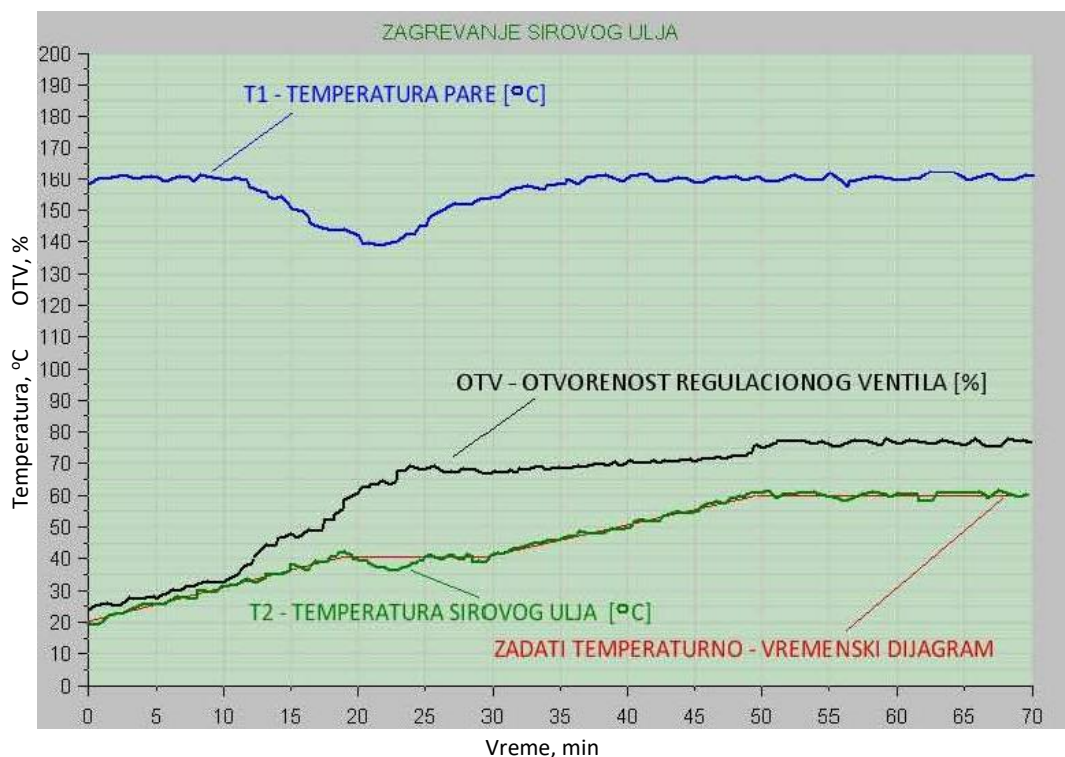
Figure 10. Step response of the crude oil heating process

Zbog lakšeg praćenja izvršeno je preskaliranje na opseg (0 – 20) °C. Podešavanje parametara PI regulatora, koji je primenjen u ovom slučaju, izvedeno je prema empirijskim obrascima Čijen-Hrejns-Rezeviča (Chien – Hranes – Resewich):

$$\text{GAIN} = \frac{0.35}{\tau} = 1.45; \quad T_i = 1.2T = 458.4 [\text{s}].$$

Na slici 11 je dat grafik zagrevanja sirovog ulja u procesu prve faze transesterifikacije (prema zadatoj dinamici sa slike 8). Početna temperatura ulja je oko 20 °C, a procedura zagrevanja traje 70 minuta. Ulje se zagreva do 40 °C s priraštajem 1 °C/min. Regulacioni ventil je otvoren na 34 %. Održavanje ove temperature traje 10 min, a zatim se povećanjem protoka pare ulje zagreva 1 °C/min. do temperature od 61 ± 1 °C i ovo stanje traje 20 minuta.

Primitan je poremećaj u sistemu u trenutku  $t = 12$  min u vidu opadanja temperature pare kojom se greje ulje. Ovaj poremećaj traje do dvadeset prvog minuta. Usled poremećaja, temperatura ulja počinje da opada nekoliko minuta za iznos od 4 °C. Upravljačka struktura nastoji da eliminiše poremećaj povećanjem otvora parovoda preko regulacionog ventila YVR.



Slika 11. Grafik vremenske zavisnosti temperature pare, otvorenosti regulacionog ventila i temperature ulja  
 Figure 11. Time dependences of steam temperature, openness of the regulation valve and the oil temperature

Nakon 4 minuta dostiže se ponovo zadata vrednost i uspostavlja se stacionarno stanje. U trenutku  $t = 20$  min nastao je drugi poremećaj – dodavanje katalizatora čija je temperatura za desetak °C manja od temperature ulja koje se već zagrijalo na 40 °C. Upravljačka logika se i protiv ovog poremećaja bori većim otvaranjem regulacionog ventila za određeni procenat. Oko dvadeset šestog minuta, uz intenzivno mešanje, izjednačava se temperatura smese ulja i katalizatora i upravljačka struktura nadalje prati zadati temperaturno – vremenski dijagram. Da bi upravljački sistem uspešno izvršavao postavljeni zadatak potrebno je pored izbora strukture regulatora i podešavanje njegovih parametara, i pravilno dimenzionisanje i usklađenost svih delova upravljanog sistema (u opisanom slučaju DN parovoda, DN on/off i regulacionog ventila u odnosu na kapacitet reaktora, kao i kapacitet akumulatora pare).

## 6. ZAKLJUČAK

Proces industrijske proizvodnje biodizela sastoji se od reakcije triglicerida (u čijem su sastavu masti i ulja) s metanolom, uz prisustvo katalizatora. Tokom ove reakcije se u vidu sporednog proizvoda dobija glicerol, koji prečišćen ima primenu u farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji. U radu je prikazano automatizovano postrojenje za proizvodnju biodizela. Automatizacija je zasnovana na primeni PLC i SCADA sistema. Upravljački sistem ima uvid u status instaliranih uređaja i opreme. Nadgledaju se sve tehničke celine postrojenja (transformatorska stanica, dizel agregat, skladišta s pretakalištima sirovog ulja, metanola, glicerola i finalnog proizvoda – biodizela, energana sa azotnom stanicom i kompresorskim postrojenjem, sam proizvodni proces i protivpožarni sistem). Pojedine tehnološke celine su pod nadzorom i upravljanjem lokalnih kontrolera, koji su povezani sa operatorskim panelima na kojima se vrši zadavanje i pregled karakterističnih veličina i parametara. Lokalni kontroleri su u sprezi s master kontrolerom putem profibus protokola komunikacije. Uvid u stanje svake celine je omogućen i na SCADA sistemu u dispečerskom centru (DC). Master kontroler je povezan sa industrijskim PC računarom (SCADA računar) u DC. Upravljanjem i nadzorom obezbeđuju se: merenja procesnih parametara i veličina; prijem, obrada i prikaz procesnih merenja u vidu tabela i grafika vremenskih zavisnosti mernih veličina; vizuelizacija statusa pogona; hronologija događaja i analiza; praćenje i obrada signala upozorenja i alarma; mogućnost lokalnog, daljinskog automatskog i daljinskog ručnog vođenja pojedinih objekata upravljanja; generisanje i prezentovanje dnevnih i periodičnih izveštaja. Automatizacijom proizvodnog procesa omogućeno je postizanje željenog kvaliteta proizvoda, optimalna potrošnja energije, predviđanje i dijagnoza kvarova i sprečavanje havarijskih situacija, čime se obezbeđuje kvalitetno održavanje sistema i kontinualna proizvodnja.



**Zahvalnica:** Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja u okviru projekata br. TR 35005 i TR III 44006 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za period 2011–2018.

## LITERATURA

- [1] Gerpen VJ. Iowa State University, U.S.A; Clements, D. Renewable Products development Laboratory; Knothe G. USDA/NCAUR: Biodiesel Production Technology, 2004.
- [2] Knothe G. National Center for Agricultural Utilization Research Agriculture Research Service U.S. Department of Research Agriculture, Peoria, Illinois, U.S.A.; Gerpen VJ. Department of Mechanical Engineering Iowa State University, Ames, Iowa, U.S.A.; Krahl J. University of Applied Sciences, Coburg, Germany: The Biodiesel Handbook, 2005.
- [3] Gerpen VJ. Biodiesel processing and production, University of Idaho, Moscow, Fuel Processing Technology 2005;86: 1097–1107.
- [4] Körbitz W. New Trends in Developing Biodiesel World – Wide, Evaluating & Exploiting the Comercial Uses of Ethanol, Fuel Alcohol & Biodiesel, Singapore 2002.
- [5] Bockey D. Situation and Development Potential for the Production of Biodiesel - An International Study, Union zur Förderung von Oel-und Proteinflanzen e. v., Germany, 2002.
- [6] Petrus L. Shell Global Solutions, Global Alternative Fuels Forum for Automotive Applications, Munich 2003.
- [7] Bacovsky D, Körbitz W, Mittelbach M, Wörgetter M. Biodiesel Production: Technologies and European Providers, 2007.
- [8] Stankov S. Glavni elektro projekat energetike i automatike Pogona za proizvodnju metil estra biljnih ulja u fabrici FAM ad Kruševac, 2011. (In Serbian)
- [9] Berger H. Automating with SIMATIC S7-1200 Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Basic Visualization with HMI Basic, 2nd revised edition, Erlangen, 2013.
- [10] Berger H. Automating with Simatic Integrated Automation with Simatic S7-300/400, Controllers, Software, Programming, Data Communication, Operator Control and Process Monitoring, 2nd revised edition, Erlangen, 2003.
- [11] Siemens: Simatic, Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control - User manual, Siemens AG Automation Group, Industrial Automation Systems, Nürnberg, 2006. <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/S7pidcob.pdf> (pristup 17. 05. 2018.)
- [12] Dimić E. Hladno ceđena ulja, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2005. (In Serbian)

## SUMMARY

### A supervisory control system of a biodiesel production plant

Stanko P. Stankov

*University of Niš, Faculty of Electronic Engineering, Aleksandra Medvedeva 14, Niš, Serbia*

(Technical paper)

This paper describes a system for control and monitoring of plants for production of ecologically pure fuel biodiesel, which is obtained by transforming vegetable oils into fatty acid methyl esters by the reaction of transesterification. The automation provides synchronized operation of installed devices and equipment, protection and blockage of devices in the cases of irregularities, optimum energy consumption, elimination of subjective factor influences, increased efficiency of the plant and achievement of required product quality. It also enables prediction and diagnosis of faults, prevention of the occurrence of anomalies and ensures quality system maintenance and continual production. The supervisory control system is based on PLC and SCADA configuration with decentralized and distributed control of the component parts of the plant. All technical units are monitored (transformer station, diesel generator, storages with decanters of crude vegetable oil, methanol, glycerol, acids, additives and the final products - biodiesel, energy supply unit with a nitrogen station and a compressor plant, production process, as well as the fire protection system). Control units (local PLCs in feedback with operator panels), which are located in cabinets along the drives, collect local digital and analog values of process variables and forward control signals to the actuators. Certain deviations of the regulated values from the setup values cause the alarm set off in the form of light and sound warnings on local panels and the monitor at the dispatch center, with the message relating to the cause, location and time of the disturbance and requiring from the operator to confirm the notice of the alarm. Visual interpretation of the drive components, tabular and graphical representation of characteristic values on dynamic screens enables the operator to monitor the entire production process. Monitoring of the status of each component is also enabled at SCADA in the dispatch center. Control and supervision provide: measurement of process parameters and variables; receiving, processing and displaying the process measurements in the form of tables and trend graphs; visualization of drive status; chronology of events and analysis; monitoring and processing of warning and alarm signals; the possibility of local, remote automatic and remote manual control of individual objects, as well as generating and presenting daily and periodical reports.

**Keywords:** supervision, control, crude oil, transesterification