

UPRAVLJANJE I REGULACIJA PLINSKE TURBINE – NA PRIMJERU TURBINE MS6001FA

Mr. sc. Miroslav Š a n d e r, Zagreb

UDK 621.165–531
PREGLEDNI ČLANAK

U članku je prikazano upravljanje i regulacija plinskom turbinom na primjeru GE turbine MS6001FA. Namjera je prikazati općenite principe upravljanja i regulacije turbine, ali uzevši kao primjer poznati i konkretni stroj kakav u svom vlasništvu ima HEP. Turbinu ćemo promatrati kao sastavni dio kombikogeneracijskog postrojenja, tj. uzeti u obzir neke funkcije (propuhivanje) koje su karakteristične za rad u kombi procesu. Prikazan je upravljački sustav na vratima logike izbora minimalne vrijednosti te onda posebice pri upuštanju, zatim u upravljanju i regulaciji brzine vrtnje, ubrzanja, temperature, obustvi, ručnom upravljanju. Regulacija goriva je ona na koju se djeluje u svim modovima upravljanja preko signala položaja ventila FSR. Zaštitni sustav plinske turbine djeluje za vrijeme svakog normalnog upuštanja i obustave, a i u tijeku normalnog pogona s time da je angažiranost pojedinih komponenti sustava u pojedinim situacijama različita. Posebna važnost se pridaje zaštiti od previsoke brzine vrtnje, previsoke temperature, zaštiti od nestanka plamena i detekciji plamena, zaštiti od vibracija te nadzoru izgaranja.

Ključne riječi: upravljački procesori, modovi upravljanja, izborna logika minimalne vrijednosti, brzina vrtnje, ubrzanje, temperatura, upuštanje, obustava, pogon, zaštita plinske turbine.

1. UVOD

U plinskoturbinskom ciklusu mijenja se tlak, temperatura, masa i volumenski protok goriva i zraka. Kompresor uvlači zrak kroz usisni filtar s relativno malim padom tlaka. Zrak se tlači u kompresoru te se šalje u komoru izgaranja gdje gorivo direktno izgara. Relativno mali pad tlaka i veliki porast temperature se zbiva duž komore izgaranja. Visokotemperaturni plinovi izgaranja ekspandiraju u turbini proizvodeći veću snagu od one koju troši kompresor. Višak snage svladava mehaničke gubitke, te se predaje generatoru električne energije. Ispušni plinovi koji napuštaju turbinu su na tlaku nešto većem nego što je atmosferski, ali zato imaju znatno veću temperaturu. Toplina ispušnih plinova koristi se u kotlu na ispušne plinove za proizvodnju pare. Količina masenog protoka zraka koji se usisava u kompresor uvelike je pod utjecajem okolnih ulaznih uvjeta, tj. temperature i tlaka (kao i položaja ulaznih privodnih lopatica). Plinska turbina proizvodi veću izlaznu snagu kada je okolna temperatura niža, tj. kada je hladnije, a manju kada je vani toplije. Stvarna snaga turbine je funkcija topline oslobođene u sustavu izgaranja, a ona je u biti direktna trenutačna funkcija protoka goriva. Stoga puno postignuće sposobnosti turbinske snage niskih temperatura zahtijeva proporcionalno povećanje u protoku goriva koje je samo neznatno modificirano varijacijama u stupnju djelovanja stroja. Očekivana snaga,

izlazni zakretni moment i očekivana ispušna temperatura kao funkcije protoka goriva se mogu procijeniti korištenjem sljedećih jednadžbi [1].

Snaga turbine u MW = KOEFICJENT X N X ZAKRETNIMOMENT

$$\text{ZAKRETNIMOMENT} = 1.3 X (W_f - 23) X 0.5 (100 - N) \\ T_x = [1 / (1 X 0.005 (15 - T_a))] [Tr - 0.6 (15 - T_a) - 3.9 (100 - W_f) + 3.1 (100 - N)] \text{ } ^\circ\text{C}$$

Izlazni zakretni moment je dan u % pa se zato izraz na desnoj strani množi s koeficijentom da bi se dobila snaga u MW. Vrijednosti u jednadžbama su (korigirano na okolnu temperaturu).

W_f = protok goriva u % od ISO baznog opterećenja

N = brzina vrtnje u % od ISO baznog opterećenja

T_x = turbinaska ispušna temperatura u $^\circ\text{C}$

T_r = nazivna temperatura ispuha u $^\circ\text{C}$

T_a = okolna temperatura u $^\circ\text{C}$

Minimalna količina goriva je protok goriva nužan da bi održao plamen u komori izgaranja. Maksimalna količina goriva je povezana sa sposobnošću "punog hoda" sustava goriva te premašuje vrijednosti za nazivnu količinu.

Redundancija (Zalihost) se primjenjuje u sve plinsko-turbinske sustave, uključujući filtre, crpke, motore i

slično. Zalihost kod aparata i dupliciranje energetskog napajanja uključuje i unakrsne izvore, transformatore, sklopna i razvodna postrojenja za srednji i niski napon te istosmjerne ispravljače i akumulatore za besprekidno napajanje što osigurava pouzdanost za vrijeme pogona, za vrijeme upuštanja i sigurnost opreme.

Plinske turbine su građene prvenstveno za loženje plinom, ali isto tako koriste i tekuće gorivo. Sustav plinskog goriva regulira protok goriva prema plinskoj turbini da bi optimizirao stupanj djelovanja te minimizirao ispušne plinske emisije. Na turbini koju uzimamo za primjer u ovom članku, sustav plinskog goriva se sastoji od zapornog ventila i regulacijskih plinskih ventila. Zaporni ventil i regulacijski plinski ventili rade u sprezi da bi regulirali ukupni protok goriva prema gorionici. Regulacijski plinski ventili rade u sprezi s ventilom predmiješanja da bi regulirali postotak goriva isporučenog svakom od plinskih razdijelnika goriva. Konstrukcija je s četiri razdijelne cijevi – primarna, sekundarna, tercijarna i quaterna – dok svaka komora izgaranja ima pet sapnica goriva. Suhi niski NO_x pogonski sustav ili DLN (Dry Low NO_x) će odrediti kako će se postavljati regulacijski plinski ventili prema sapnicama u svakoj od komora izgaranja. Suhi niski NO_x regulacijski sustav je odgovoran za regulaciju i razdiobu goriva prema višesapničkim gorionici. Regulacijski plinski ventili kontroliraju željeni protok goriva kao odziv na sistemsku naredbu koju zovemo FSR ili Referentni Hod Goriva (FSR ili RHG). Razdioba goriva prema svakoj od sapnica je u funkciji od referentne temperature izgaranja i temperaturnog regulacijskog režima ulaznih privodnih lopatica. Difuzija, pilotirano predmiješanje te predmiješani plamen se uspostavljaju promjenom protoka goriva u komori izgaranja. Obavlja se redistribucija goriva prema različitim sapnicama unutar komore izgaranja. Tako kombinacijom stupnjevanja goriva i izmjenom režima izgaranja od difuzijskog za vrijeme paljenja turbine do pilotiranog predmiješanja pri niskim opterećenjima turbine pa onda do punog predmiješanja s turbinom potpuno opterećenom, stupanj djelovanja se optimizira, a NO_x emisije se bitno reduciraju.

2. UPRAVLJAČKI SUSTAV SPEEDTRONIC MARK V

Na turbini MS6001FA (slika 11) koju ćemo uzeti kao primjer sve funkcije upravljanja, regulacije, nadzora i zaštite plinskog turboagregata (PTA) su realizirane posebnim, namjenski razvijenim mikroprocesorskim sustavom SPEEDTRONIC Mark V proizvodnje "GENERAL ELECTRIC" (GE). Rad uređaja se bazira na tri procesora koji rade po principu "2 od 3" omogućujući na taj način optimum sigurnosti i raspoloživosti rada plinske turbine. Jezgra sustava su 3 identična upravljačka procesora; $\langle R \rangle$, $\langle S \rangle$, $\langle T \rangle$. Svi algoritmi, zaštitne funkcije te sekvencijsko upravljanje se obavljaju preko ovih procesora. Izlazi zaštite idu preko $\langle P \rangle$ modula koji se sastoji od trostruko redundantnih procesora

$\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$, $\langle Z \rangle$. Tri upravljačka procesora dobivaju podatke od tri redundantna osjetila u krugovima zaštite. Osjetila koja mjere nekritične vrijednosti mogu, ali ne moraju biti redundantna.

Uređaj na potpuno automatizirani način upravlja svim podgrupama plinskog turbogeneratorskog postrojenja, tj: kompresorom, sustavom izgaranja, turbinom, generatorom, pomoćnim sustavima (sustav ulja za podmazivanje, sustav vode za injektiranje, sustav vode za hlađenje, sustav za pranje turbine, privod zraka, sustav pogonskog goriva, sustav grijanja, ventilacije i zaštite od požara). Uređaj se smješta u kontejner (slika 8 i 9), odmah do plinske turbine, opremljen je zaslonom jedinicom (monitorom) s funkcijskom tastaturom, komunikacijskom jedinicom za priključak na glavne informacijske sabirnice. S tog upravljačkog mjesta je moguće testiranje samog sustava i dijagnostika kvarova, kako na samom sustavu tako i na sklopovima periferije (mjernim davačima, izvršnim uređajima i sl.). Sustav obavlja sljedeće glavne funkcije:

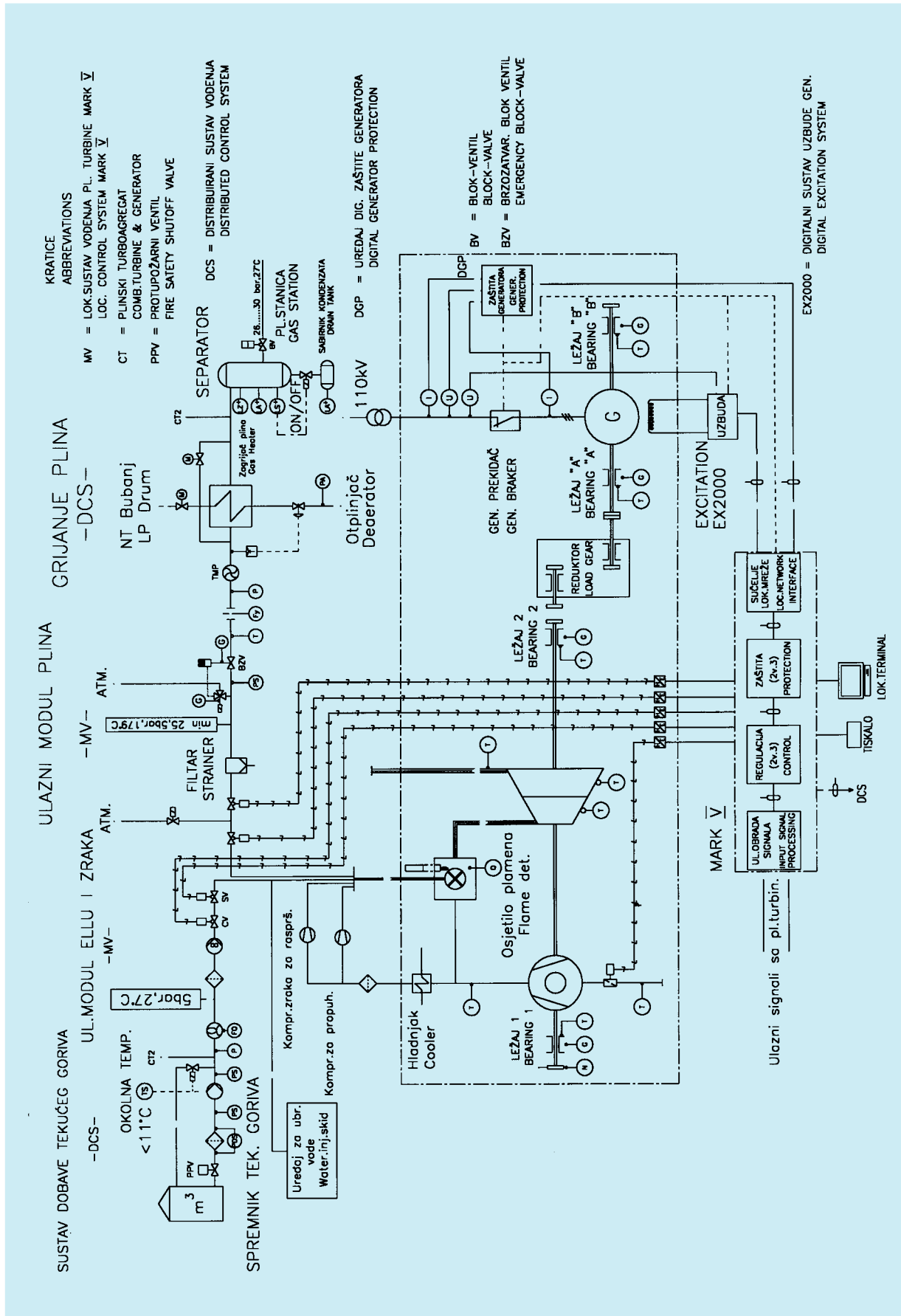
Regulacija – upusni parametri, brzina vrtnje/snaga, temperaturni profil turbine, protok plinovitog/tekućeg goriva, parametri uzbude generatora, sinkronizacija, parametri emisije;

Upravljanje – pomoćni sustavi turbine i generatora, start i opterećenje, obustava, propuhivanje i potpala, promjena vrste goriva, sinkronizacija na mrežu, stroj za okretanje rotora, statički starter (LCI);

Zaštita – pobjeg rotora, porast temperatura (uključuje i generator), vibracije, gubitak plamena, izgaranje, požar, tlak i temp. ulja, pumpanje kompresora.

Sa razine upravljanja kombikogeneracijskog procesa, postrojenje plinskog turbogeneratora (PTA) treba tretirati kao funkcijsku grupu kojom se upravlja preko automatiziranih sekventnih programa [2].

Programi se pokreću pritiskom na tipku, nakon čega se čitav proces dalje automatski odvija. Odvijanje programa teče uz stalno aktivne zaštite koje djeluju u slučaju neispravnog rada postrojenja. Upuštanje PTA uključuje sve radnje, od zaleta kompresora, paljenja goriva u turbini, do sinkronizacije i opterećenja generatora. Opterećenje generatora se odabire prije pokretanja. Može se odabrati vršno opterećenje, bazno opterećenje, ili odabir po volji operatera (namještanje u opsegu % nazivnog opterećenja). Na zaslonu u modulu upravljanja (slika 8 i 9) ili preko DCS-a (sustava za upravljanje kombi procesom, vidi sl. 1) se izbornom preklopkom za izbor goriva (zemni plin – ekstra lako ulje), odabire odgovarajuća sekvenca upuštanja, odnosno obustave rada pogonske jedinice. Prijelaz sa plinskog na tekuće gorivo se obavlja automatiziranom sekvencom koja se ručno inicira. Na operatorskoj stanici moguće je iščitavati i sve mjerne vrijednosti, te pregledavati liste alarma sa plinske turbine.



Slika 1. Shema upravljanja plinskom turbinom

Sva upuštanja su automatska uz mogućnost da strojar turbine zaustavi sekvencu starta u fazi vrtnje prije potpale ili nakon potpale, tj. prije ubrzanja. Ukoliko se odabere režim AUTO, start se odvija bez zastoja. Prije davanja naredbe za start ili za vrijeme starta operater može odabrati ili isključiti auto-sinkronizaciju preko sustava MARK V. Auto-sinkronizacija koristi tzv. mikro-sinkronizator, koji omogućuje izrazito precizno zatvaranje generatorskog prekidača na bazi mjerenja faznog kutu, veličine i gradijenta klizanja, te odzivnog vremena prekidača pohranjenog u memoriju sustava. Druga mogućnost je odabrati baznu ili sniženu snagu agregata. U jednom ili drugom slučaju jedinica će biti automatski opterećena odabranom snagom uz trajno ostajanje na namještenoj vrijednosti. Ukoliko se ništa ne odabere jedinica će automatski doći na tzv. "Spinning Reserve", tj. minimalnu snagu nakon sinkronizacije koju će upravljački sustav trajno održavati. Kada je jedinica jednom na mreži, snaga joj se može regulirati ručno ili automatski preko operatorskog sučelja MARK-a V. Ručnu regulaciju obavlja operater ekranskim upravljanjem turbinskog regulatora. Automatska se regulacija uključuje kada operater odabere jednu od 3 namještene vrijednosti snage (snižena/bazna/vršna). Turbinski regulator posredstvom MARK V može raditi u tzv. modu fiksne ("Isochronous") ili promjenljive ("Droop") brzine vrtnje.

Za potpuno automatski start s automatskim dizanjem snage do baznog tereta operater odabire režim AUTO, čime omogućuje auto-sinkronizaciju te bira stupanj opterećenja BAZNO. Dajući naredbu START jedinica će startati, sinkronizirati te se opteretiti do bazne snage bez daljnjih zahvata strojara. Nakon naredbe na obustavu sustav vođenja će jedinicu automatski rasterećivati i vratiti ju na režim stroja za okretanje. Turbina će ostati u tom modu dok strojar ne isključi stroj za okretanje turbine. Pri tomu se mora osigurati propisani stupanj ohlađenosti turbine kako ne bi došlo do progiba rotora. Primarno upravljanje generatora obavlja operater posredstvom operatorskog sučelja MARK V. Ono je preko serijske veze (LAN-Local Area Network) dodatno povezano s uzbuđnim sustavom EX2000. Na taj način MARK V regulira radnu snagu, a EX2000 jalovu. Vlastiti uređaj zaštite generatora (GPP = Generator Protection Panel) služi za primarnu zaštitu generatora, dok su dopunske zaštite izvedene unutar MARK V i EX2000, npr. temperaturna zaštita, blokada sinkronizacije, podfrekventna zaštita i zaštita od povratne energije.

3. UPRAVLJAČKI SUSTAV PREMA IZBORU LOGIKE MINIMALNE VRIJEDNOSTI

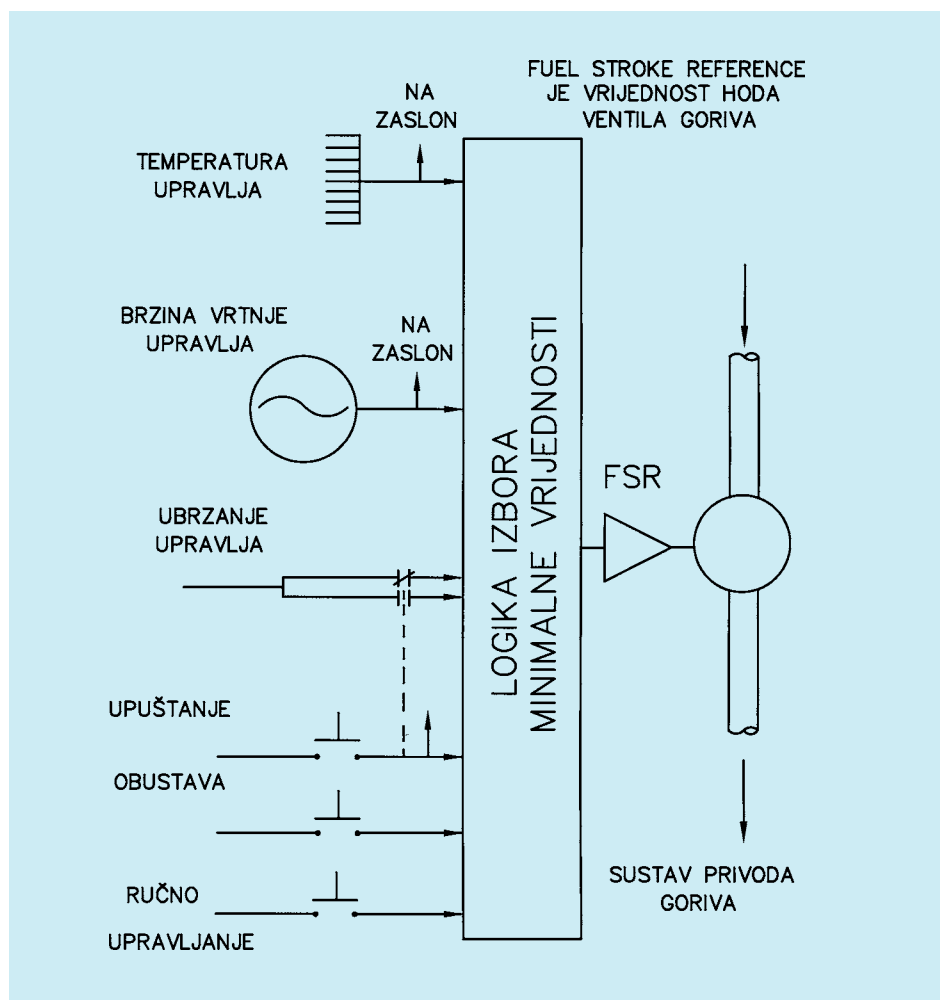
Modovi upravljanja plinskom turbinom su upravljanje startom ili upuštanjem, upravljanje ubrzanjem (ubrzanje upravlja), brzinom vrtnje (brzina vrtnje upravlja), temperaturom (temperatura upravlja), obustavom te funkcije ručnog upravljanja prema slici 2. Govorimo da je

upravljanje ubrzanjem turbine zato jer je u tom modu upravljanja, ubrzanje dominantni čimbenik koji se mora regulirati, ali ujedno taj mod, tj. ubrzanje postaje dominantni mod koji upravlja turbinom, pa tada ubrzanje upravlja. Modovi upravljanja prolaze kroz vrata logike izbora minimalne vrijednosti nakon čega upravlja (ili dominira) onaj mod koji ima logički minimalnu vrijednost. Osjetnici nadziru brzinu vrtnje turbine, izlaznu temperaturu, tlak na izlazu iz kompresora i druge parametre koji određuju pogonsko stanje turbine. Kada je nužna promjena pogonskog stanja turbine zbog promjene opterećenja ili okolišnih uvjeta, upravljački sustav modulira protok goriva prema turbini [3]. Na primjer, ako izlazna temperatura teži prekoračenju dopuštene vrijednosti za dano pogonsko stanje, sustav upravljanja temperaturom smanjuje količinu goriva koja se dobavlja turbini i time ograničava izlaznu temperaturu. Pogonska stanja turbine se kontroliraju i kao povratni signali šalju u upravljački sustav.

Za vrijeme pogona turbine u funkciji su 3 glavne upravljačke (odn. regulacijske) petlje - upuštanje, brzina vrtnje i temperatura. Izlaz ovih regulacijskih petlji je spojen na logički sklop minimalne vrijednosti kao što je prikazano na slici 2. Uz njih su modovi upravljanja od manjeg značenja; ubrzanje, ručno namještanje FSR (Fuel Stroke Reference = vrijednost otvorenosti ventila za dovod goriva) i obustava. Otvorenost ventila (ili hod) za dovod goriva FSR je upravljački signal za količinu goriva. Logička vrata izbora minimalne vrijednosti povezuju izlazne signale šest načina (modova) upravljanja s regulatorom FSR; samo najniža izlazna vrijednost FSR izlaznog signala šest regulacijskih petlji može proći kroz logički sklop prema sustavu upravljanja gorivom kao upravljački FSR (tj. minimalna vrijednost je dominantna i ona upravlja). Upravljački FSR će uspostaviti ulaznu količinu goriva u turbinu prema iznosu koji zahtijeva mod koji trenutačno upravlja. U određenom trenutku samo jedna regulacijska petlja može upravljati sa FSR-om i ona se prikazuje na zaslonu.

4. UPRAVLJAČKI SUSTAV PRI UPUŠTANJU

Pri upuštanjem se turbina sigurno dovodi od brzine vrtnje nula do radne brzine osiguravajući količinu goriva koja je potrebna za uspostavu plamena i ubrzanje turbine tako da se smanji zamor dijelova na stazi vrućih plinova. Upuštanje plinske turbine je prikazano na sl. 3. Plinska turbina zahtijeva vanjskog pokretača pri upuštanjem, što je u slučaju turbine iznad 50 MW električni generator koji radi kao električni motor. On ubrzava turbinu na približno 25% od nazivne brzine vrtnje jer turbina još ne može sama rotirati kompresor i drži ju na toj vrijednosti oko 8 min da bi kompresor propuhao sve zaostale plinove u turbini i kotlu. Nakon toga brzina vrtnje pada i počinje paljenje turbine sa svjećicama [3]. Generator u funkciji motora tada dalje ubrzava turbinu do 90% od nazivne brzine, ali već kod 60% od



Slika 2. Izborna logika minimalne vrijednosti

nazivne brzine manje doprinosi. Kada je postignuta puna brzina vrtnje i nakon programski zadanog vremena turbina se sinkronizira i opterećuje.

Na sl. 4 vidi se ponašanje napona rotorskog polja pri startu i napona na generatorskim stezaljkama. Paralelno s povećanjem brzine vrtnje povećava se i napon rotorskog polja, a isto tako nakon sinkronizacije kako se diže opterećenje stroja (iako je napon na stezaljkama konstantan), mora se i dalje dizati napon rotorskog polja da bi održao konstantni izlazni napon na stezaljkama. Naime, promjenom opterećenja mijenja se i napon na stezaljkama generatora zbog pada napona u armaturnom namotu i zbog reakcije armature. Generator mora potrošaču davati konstantan napon što se čini tako da se promjenom uzbudne struje utječe na magnetski tok, a na uzbudnu struju djeluju regulatori napona (napon rotorskog polja) koji automatski reagiraju na promjene napona stezaljki generatora u kratkom vremenu.

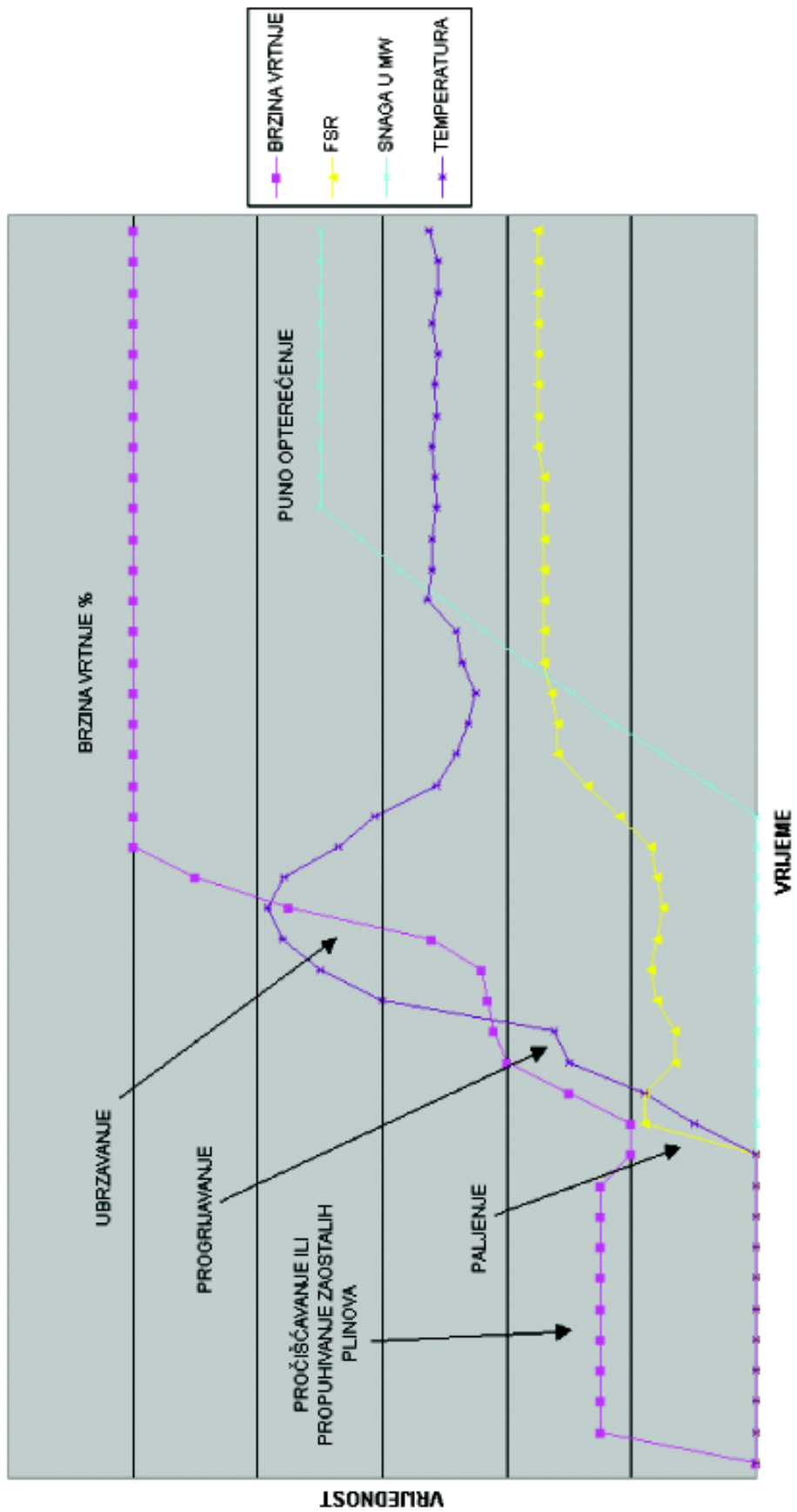
Upuštanje obuhvaća ispravno određivanje slijeda naredbi pomoćnim uređajima, uređaju za pokretanje LCI (Load Commutated Inverter) i sustavu regulacije goriva. Budući da sigurno i uspješno upuštanje ovisi o ispravnom

funkcioniranju opreme plinske turbine, važno je verificirati stanje izabranih uređaja u sekvenci.

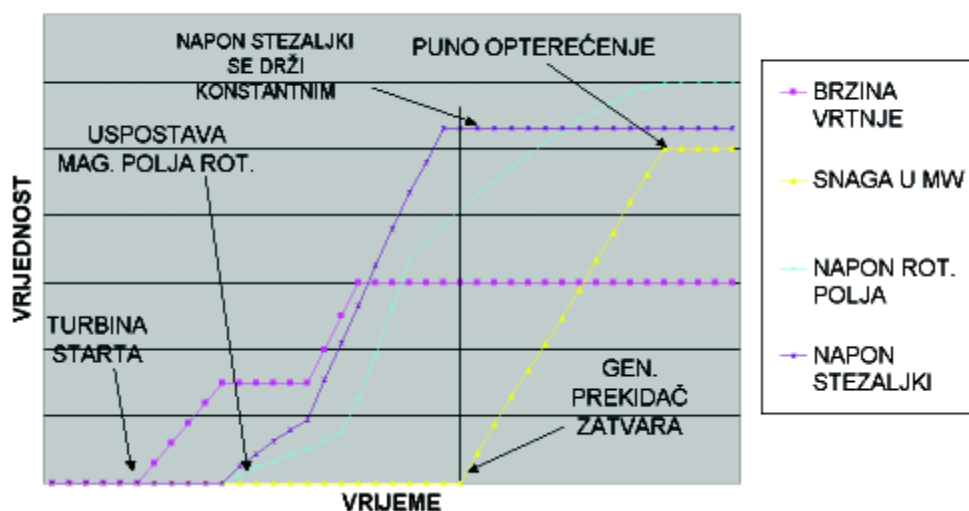
U sekvenci upuštanja, ali isto tako i obustave plinske turbine vrlo važan segment pri upravljanju je ispravno mjerenje brzine vrtnje. Brzina vrtnje turbine se mjeri pomoću magnetskog davača. Standardno se koriste sljedeći detektori brzine vrtnje i releji brzine vrtnje:

- L14HR brzina vrtnje nula (približno 0 % brzine vrtnje)
- L14HM minimalna brzina vrtnje (približno 16 % brzine vrtnje)
- L14HA brzina vrtnje ubrzanja (približno 50 % brzine vrtnje)
- L14HS pogonska brzina vrtnje (približno 95 % brzine vrtnje)

Detektor brzine vrtnje nula, L14HR, daje signal kada se vratilo turbine počinje okretati ili se zaustavlja. Kada je brzina vrtnje vratila L14HR, tj. na nuli, L14HR to osjeti i logika za dozvolu uključuje stroj za okretanje. Detektor minimalne brzine vrtnje L14HM pokazuje da je turbina dostigla minimalnu brzinu vrtnje za potpalu i inicira krug



Slika 3. Upuštanje plinske turbine



Slika 4. Upuštanje na generatoru

za propuhivanje turbine prije uvođenja goriva i potpale. Ispad releja minimalne brzine vrtnje L14HM omogućava funkcije dozvole za ponovno upuštanje plinske turbine nakon ispada. Davač releja ubrzavanja L14HA daje signal kada turbina postigne približno 50% brzine vrtnje; to pokazuje da upuštanje turbine napreduje i zaključava neke zaštitne funkcije. Detektor pogonske brzine vrtnje L14HS daje signal kada je sekvenca ubrzavanja skoro završena i turbina je blizu pogonske brzine vrtnje. Taj signal logika koristi za upravljačke sekvence kao što su zaustavljanje pomoćnih uljnih crpki za podmazivanje i start ventilatora za hlađenje ispušnog kućišta.

Kada turbina miruje, elektronika provjerava zaporne i regulacijske ventile goriva, pomoćnu opremu i izvore napona. Signal za upuštanje pobuđuje glavni upravljački i zaštitni krug ("L4" krug) i pokreće potrebnu pomoćnu opremu. Zaštitna petlja "L4" dopušta dovodenje pod tlak sustava ulja za izvrštavanje i uključuje stroj za okretanje [3]. S dozvolom "L4", stroj za okretanje počinje okretati rotor turbine te ga okreće onoliko dugo prije samog starta koliko traži pojedini tip turbine, a ovisno o duljini vremena od zadnje obustave pogona.

Kada se turbina otkvači od stroja za okretanje, tj. počinje rotirati bez njega, ona dobiva moment zakretanja od uređaja za pokretanje LCI. Releji brzine vrtnje turbine L14HM pokazuje da se turbina vrti brzinom koja je zadovoljavajuća za propuhivanje stroja i potpalu u komori izgaranja. Vrijeme propuhivanja je tako namješteno da omogući tri do četiri izmjene zraka kroz turbinu kako bi se osiguralo da bilo koja zapaljiva smjesa bude istisnuta iz sustava. Uređaj za upuštanje će držati brzinu vrtnje dok signal L2TV (timer, vremenski relej) ne završi svoj ciklus. Turbine koje nemaju veliki ispušni sustav (nisu u kombi procesu) ne moraju imati vre-

menski relej za propuhivanje jer se propuhivanje pri upuštanju provodi prirodnim strujanjem zraka.

Signal L14HM ili signal dovršenja ciklusa propuhivanja (L2TVX) "dopušta" protok goriva, potpalu, namješta razinu paljenja FSR i inicira vremenski relej paljenja L2F. Kada izlazni signali detektora plamena (L28FD) pokažu da je u komori izgaranja plamen uspostavljen, starta vremenski relej za progrijavanje L2W. Vrijeme progrijavanja je programirano zato da bi se toplinska naprezanja dijelova na stazi vrućih plinova za vrijeme početnog dijela upuštanja svela na minimum.

Ako se plamen ne uspostavi u vremenu koje je namješteno na vremenskom releju, obično 60 sekundi, a to je i vrijeme koliko pale svjećice, protok goriva se obustavlja. Ukoliko bi strojar turbine neposredno nakon prvog signala za start zadao drugi, paljenje će biti sa zakašnjenjem koje uzrokuje vremenski relej L2TV kako bi se izbjeglo nakupljanje goriva pri uzastopnim pokušajima.

Po završetku vremena progrijavanja (L2WX), regulacija upuštanja podiže FSR. Kako se količina goriva povećava, turbina počinje fazu ubrzavanja pri upuštanju. Spojka je u zahvatu tako dugo dok uređaj za pokretanje (LCI) proizvodi zakretni moment na rotor turbine. Kada rotor turbine postigne brzinu vrtnje veću od brzine uređaja za pokretanje, spojka izlazi iz zahvata a uređaj za pokretanje se isključuje. Releji brzine L14HA pokazuje da se turbina ubrzava.

Faza upuštanja završava kada turbina postigne punu brzinu praznog hoda. Tada sa FSR upravlja petlja brzine tj. brzina vrtnje upravlja, a pomoćni sustavi se automatski isključuju.

Regulacijski softver za upuštanje uspostavlja maksimalnu dopuštenu razinu FSR signala za vrijeme upuštanja. Ako to zahtijeva pogonska situacija, ostali regulacijski

krugovi su u stanju smanjiti i modulirati FSR kako bi izveo njihove regulacijske funkcije.

5. BRZINA VRTNJE I UBRZANJE

Sustav regulira brzinu vrtnje i opterećenje generatora plinske turbine kao odziv na signal trenutne brzine vrtnje i signal namještene referentne brzine. Za mjerenje brzine vrtnje turbine koriste se tri magnetska osjetnika. Magnetski davači (77NH-1, 2, 3) su uređaji velike izlazne snage, a sastoje se od trajnog magneta zatvorenog u hermetički zabrtvljeno kućište. Davači su smješteni u prsten oko zupčanika (kola sa zupcima) na rotoru kompresora plinske turbine. Izlazni napon iz davača ovisi o zračnosti između zupca kola i vrha magnetskog davača. Signal s magnetskih davača se uvodi u Mark V, svakom regulatoru <RST> po jedan, gdje ga kontrolira softver za regulaciju brzine vrtnje. Softver za regulaciju brzine vrtnje će promijeniti FSR razmjerno razlici između stvarne brzine vrtnje turbine/generatora (TNH) i namještene referentne brzine vrtnje (TNR). Namještena brzina vrtnje TNR određuje snagu turbine. Normalno područje za turbine za pogon generatora iznosi od 95 % (minimum) do 107 % (maksimum) brzine vrtnje. Referentna brzina vrtnje pri upuštanju je 100,3 %. Kada je generatorski prekidač zatvoren i generator na mreži, mreža drži konstantnu brzinu vrtnje. Dotok goriva u turbinu u količini većoj od potrebne za održavanje pune brzine vrtnje praznog hoda imat će za posljednju povećanu snagu na generatoru. Na taj način regulacijska petlja brzine vrtnje postaje regulacijska petlja snage, a referentna brzina vrtnje je prikladna regulacija željene snage turbogeneratorskog postrojenja. Ova regulacija je proporcionalna regulacija, a ona mijenja FSR razmjerno razlici između stvarne brzine vrtnje turbine i referentne brzine vrtnje. Bilo kakva promjena stvarne brzine vrtnje (frekvencije mreže) uzrokovat će proporcionalnu promjenu snage turbine. U slučaju preopterećenja mreže, frekvencija mreže (ili brzina vrtnje) pada i uzrokuje povećanje FSR razmjerno namještenoj proporcionalnosti. Ukoliko sve jedinice imaju istu proporcionalnost, sve će sudjelovati jednako u povećanju snage. Raspodjela opterećenja i stabilnost sustava su glavne prednosti ovog načina regulacije brzine vrtnje. U radu s proporcionalnom regulacijom, namještena vrijednost pune brzine vrtnje praznog hoda traži protočnu količinu goriva koja je dovoljna za održavanje pune brzine vrtnje s neopterećenim generatorom. Zatvaranjem generatorskog prekidača i podizanjem TNR, odstupanje između brzine vrtnje i referentne brzine vrtnje se povećava.

Automatska sinkronizacija električnog generatora plinske turbine se provodi pomoću algoritma za sinkronizaciju koji je ugrađen u <RST> i <P> softver [4]. Naponski signali s generatora i sabirnica su ulaz u <P> jezgru koja se brine o odvojnim (zaštitnim) transformatorima, a paralelno su signali u spoju prema <RST>.

<RST> softver pogoni releje za provjeru i dozvolu sinkronizacije dok <P> osigurava stvarnu naredbu za zatvaranje prekidača.

Za sinkronizaciju turbina se dovodi na brzinu vrtnje 100,3 % kako bi generator bio "brži" od mreže i osigurao prihvaćanje opterećenja nakon zatvaranja prekidača. U slučaju da frekvencija mreže toliko varira da izaziva neprihvatljivu kliznu frekvenciju (razlika između frekvencije generatora i mreže), krug za podešavanje brzine namješta TNR kako bi se održavala brzina vrtnje 0,20 % do 0,40 % iznad frekvencije mreže i osigurala korektna klizna frekvencija i dozvolila sinkronizacija.

Regulacija ubrzanja uspoređuje unaprijed zadanu vrijednost signala brzine vrtnje s vrijednošću u zadnjem vremenskom uzorku. Razlika između ove dvije vrijednosti je mjera ubrzanja. Za vrijeme upuštanja referentno ubrzanje je funkcija brzine vrtnje turbine; regulacija ubrzanja obično zamjenjuje, tj. nastupa po regulaciji brzine vrtnje neposredno nakon perioda zagrijavanja i dovodi turbinu na punu brzinu vrtnje. Pri završenoj sekvenci, koju je naznačuje davač 14HS, referentno ubrzanje postaje regulacijska konstanta s normalnom vrijednošću 1 % brzine vrtnje u sekundi. Kada turbina postigne 100 % TNH, regulacija ubrzanja obično služi samo za održanje brzine vrtnje ako generatorski prekidač otvori dok je generator pod opterećenjem.

6. UPRAVLJANJE TEMPERATUROM

Sustav upravljanja temperaturom ograničava protočnu količinu goriva u plinsku turbinu radi održanja unutrašnje radne temperature unutar projektnih ograničenja za elemente na stazi vrućih plinova. Najviša temperatura u plinskoj turbini pojavljuje se u zoni plamena u komorama izgaranja. Plinovi izgaranja se u toj zoni razrjeđuju zrakom za hlađenje i ulaze u turbinu kroz sapnište prvog stupnja. Temperatura plinova na izlazu iz sapništa prvog stupnja poznata je kao "temperatura paljenja" ("firing temperature") plinske turbine; to je temperatura koju sustav regulacije mora ograničavati. Iz termodinamičkih odnosa, proračuna plinskoturbinskog ciklusa i poznatih okolišnih uvjeta, temperatura paljenja se može odrediti kao funkcija izlazne temperature i kompresorskog omjera tlakova; kompresorski omjer tlakova se određuje na osnovi izmjerenog tlaka CPD (Compressor Pressure Discharge) na izlazu iz kompresora. Sustav upravljanja temperaturom je projektiran tako da mjeri i regulira izlaznu temperaturu iz turbine, a ne temperaturu paljenja, budući da je praktički nemoguće mjeriti temperaturu direktno u komorama izgaranja ili na ulazu u turbinu. Ova indirektna regulacija temperature paljenja plinske turbine je izvedena tako da koristi poznate aerodinamičke i termodinamičke karakteristike plinske turbine pomoću kojih se softverski izračunava signal izlazne temperature, a time i temperatura paljenja. Temperatura paljenja se također može aproksimirati

kao funkcija izlazne temperature i protočne količine goriva (FSR) i kao funkcija izlazne temperature i snage generatora (DWATT).

Pri mjerenju izlazne temperature se koriste termoparovi Chromel-Alumel a kod GE plinskih turbina može ih biti 13 do 27. Termoparovi su smješteni na ispuhu u aksijalnom smjeru po obodu difuzora. Signali od tih pojedinačnih, neuzemljenih detektora šalju se u SPEEDTRONIC Mark V oklopljenim kabelima i dijele se na regulatore <RST>.

Softver upravljanja ispušnom temperaturom se sastoji od niza aplikacijskih programa napisanih kako bi se regulirala izlazna temperatura i nadzor funkcija digitalnih i analognih ulaza. Glavna funkcija je regulacija izlazne temperature, koja se sastoji od sljedećih programa: regulacijska naredba za temperaturu, proračuni za vođenje namještene vrijednosti temperature, izbor referentne temperature.

Program za naredbe za regulaciju temperature uspoređuje namještenu regulacijsku vrijednost izlazne temperature s izmjerenom izlaznom temperaturom plinske turbine koju mjere termoparovi smješteni u ispuhu; ovi termoparovi se periodički očitavaju, a hladni kraj se korigira pomoću programa. Ti signali se dovode kako do <RST> tako i do <C> procesora (regulatora). Program za naredbe za regulaciju temperature u <RST> očitava vrijednosti temperature s termoparova i sortira ih od najviše do najniže. Ovaj niz (TTXD2) se koristi u nadzornom programu izgaranja i u programu za regulaciju temperature. U programu za regulaciju temperature sve ulazne vrijednosti od termoparova se kontroliraju i ako su neke preniske u usporedbi s programskom konstantom, odbacuju se. Najviša i najniža vrijednost se nakon toga odbacuju, a od ostalih vrijednosti se izračunava srednja vrijednost koja postaje TTXM signal. TTXM vrijednost se koristi kao povratna veza za komparator izlazne temperature budući da na tu vrijednost ne utječu ekstremi koji mogu biti posljedica pogreške instrumentacije. Program za naredbe za regulaciju temperature u <RST> uspoređuje namještenu vrijednost izlazne temperature (izračunatu u programu za određivanje regulacijske krivulje temperature i pohranjenu u memoriji računala) TTRXB s TTXM tražeći odstupanje. Softverski program pretvara temperaturno odstupanje u signal reference goriva FSRT.

Temperatura paljenja plinske turbine određena je izmjerenim parametrima izlazne temperature i izlaznog tlaka iz kompresora (CPD) ili temperature i potroška goriva (razmjerno FSR). U računalu, temperatura paljenja je ograničena lineariziranom funkcijom izlazne temperature i CPD uz rezervu linearizirane funkcije izlazne temperature i FSR.

7. REGULACIJA GORIVA

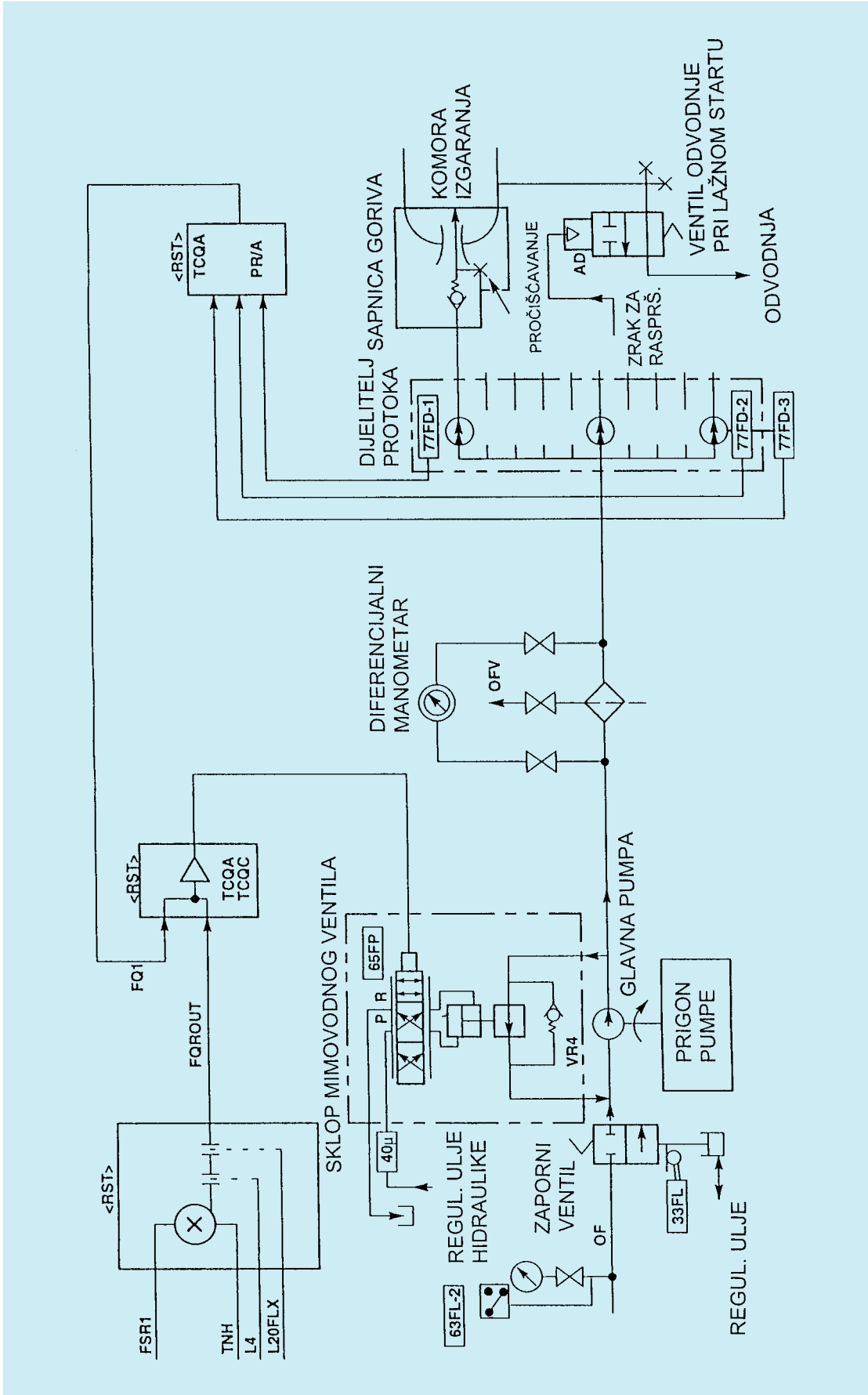
Sustav regulacije goriva plinske turbine mijenja protočnu količinu goriva u komore izgaranja u ovisnosti o

referentnom signalu vrijednosti položaja ventila goriva FSR. Signal FSR se zapravo sastoji od zbroja dva odvojena signala. FSR1 je postavna vrijednost protoka tekućeg goriva a FSR2 plina. Normalno $FSR1+FSR2=FSR$. Standardni sustavi regulacije su projektirani za rad s tekućim i/ili plinovitim gorivom. Srce sustava goriva je elektrohidraulički servoventil s tri zavojnice. Servoventil je veza između električnog i mehaničkog sustava i regulira smjer i veličinu pomaka servomotora na osnovi ulazne struje servoventila.

Servoventil ima tri električki izolirane zavojnice na motoru zakretnog momenta [5]. Svaka zavojnica je spojena na jedan od tri regulatora <RST>. To omogućuje zalihost u slučaju da zakaže jedan od regulatora ili zavojnica. Opruga za dovodenje postavne vrijednosti na nulu će u slučaju gubitka regulacijskih signala pomaknuti klip servoventila u položaj koji će izazvati gibanje servomotora u zaštitni položaj, tj. tako da se ventil za dovod goriva zatvori (FSR na nulu). Linearni varijabilni diferencijalni transformator (LVDT) (slika 6) daje signal povratne veze i on će reći regulaciji je li ventil ili nije u traženom položaju. LVDT daje izmjenični napon koji je proporcionalan položaju jezgre transformatora. Ova jezgra je opet spojena na ventil čiji položaj se kontrolira; kako se vreteno ventila pomiče, napon signala povratne veze se mijenja. LVDT zahtijeva uzbudni napon koji osigurava TCQC elektronička kartica.

Sustav tekućeg goriva se sastoji od komponenti za manipuliranje s gorivom i električnih regulacijskih komponenti. Komponente za manipuliranje s gorivom su: primarni filter ulja za loženje (niskotlačni), zaporni ventil ulja za loženje, crpka za gorivo, mimovodni ventil goriva, tlačni rasteretni ventil crpke za gorivo, sekundarni filter ulja za loženje (visokotlačni), razdjelnik toka, kombinirani izbornik sklopa ventila/manometra, ventil za odvod goriva pri neuspjelom startu, cjevovodi goriva i sapnice za gorivo. Električne regulacijske komponente su: tlačna sklopka tekućeg goriva 63FL-2, granična sklopka zapornog ventila ulja za loženje 33FL, pokretanje elektromotora crpke za gorivo, servoventil mimovodnog ventila crpke tekućeg goriva 65FP, magnetski davači djelatelja protoka 77FD-1, 2, 3 i SPEEDTRONIC kontrolne kartice TCQC i TCQA [6]. Glavne komponente prikazane su na shemi sustava na slici 5. Mimovodni ventil goriva je hidraulički pogonjeni ventil s linearnom karakteristikom protoka. Smješten je između ulazne (niskotlačne) i izlazne (visokotlačne) strane crpke za gorivo. Kroz ovaj ventil višak goriva koji dobavlja crpka vraća se natrag na usis crpke. Na taj način prema razdjelniku toka dobavlja se upravo količina goriva koju traži regulacijski sustav. Otvorenost mimovodnog ventila određuje servoventil 65FP koji svoj signal dobiva od regulatora.

Djelitelj protoka dijeli tok goriva od crpke u više tokova, za svaku komoru izgaranja po jedan. Sastoji se od sloga volumetričkih zupčanih crpki visokog stupnja djelovanja koje su u međusobnom zahvatu, a svaka op-



Slika 5. Sustav upravljanja tekućim gorivom

skrbiljuje jednu komoru izgaranja. Djelitelj protoka dobiva pogon od male razlike tlaka između izlaza i ulaza. Zupčane crpke su mehanički spojene tako da sve imaju istu brzinu vrtnje što ima za posljedicu jednake dobavne količine. Protočnu količinu goriva na izlazu iz dijelitelja registriraju magnetski davači (77FD-1, 2 i 3). To su bezkontaktni magnetski davači koji daju frekvenciju pulsirajućeg signala proporcionalnu brzini vrtnje dijelitelja, koja je proporcionalna protočnoj količini goriva prema komorama izgaranja. Kartica TCQA prima signale od 77FD-1, -2 i -3 i daje analogni izlazni signal koji je proporcionalan brzini pulsiranja ulaznih signala. TCQC kartica modulira servoventil 65FP na osnovi ulaznih podataka TNH brzine vrtnje, FSR1 (zadane vrijednosti protočne količine goriva), i brzine vrtnje djelitelja toka (FQ1).

FSR signal od nadzornog sustava prolazi kroz razdjelnik vrste goriva gdje zahtjev tekućeg goriva postaje FSR1. Signal FSR1 se množi s TNH, tako da protočna količina goriva postaje funkcija brzine vrtnje. To omogućuje sustavu bolju rezoluciju na nižim, kritičnijim brzinama vrtnje kada je protočna količina zraka vrlo mala. To proizvodi signal FQROUT, koji je digitalna naredba protočne količine tekućeg goriva. Pri punoj brzini TNH se ne mijenja, stoga je FQROUT direktno proporcionalan FSR-u. FQROUT tada odlazi u karticu TCQA gdje se mijenja u analogni signal kako bi se mogao usporediti sa signalom povratne veze od djelitelja toka. Kako gorivo ulazi u turbinu, senzori brzine vrtnje 77FD-1, 2 i 3 šalju signal u TCQA karticu, koja opet daje signal količine protoka goriva (FQ1) kartici TCQC. Kada je protočna količina goriva jednaka namještenoj vrijednosti ($FQ1=FSR1$), servoventil 65FP se pomiče u nulti položaj i mimovodni ventil ostaje "stacionaran" dok se neki ulaz u sustav ne promijeni. Ako signal povratne veze ima odstupanje od FQROUT, radno pojačalo na TCQC kartici će promijeniti signal servoventilu 65FP kako bi se mimovodni ventil doveo u položaj koji smanjuje odstupanje. Signal povratne veze djelitelja protoka se također koristi za provjeru sustava. Ovaj analogni signal se pretvara u digitalni i koristi u softveru regulatora za usporedbu s određenim granicama i pokazivanje protoka goriva na zaslonu.

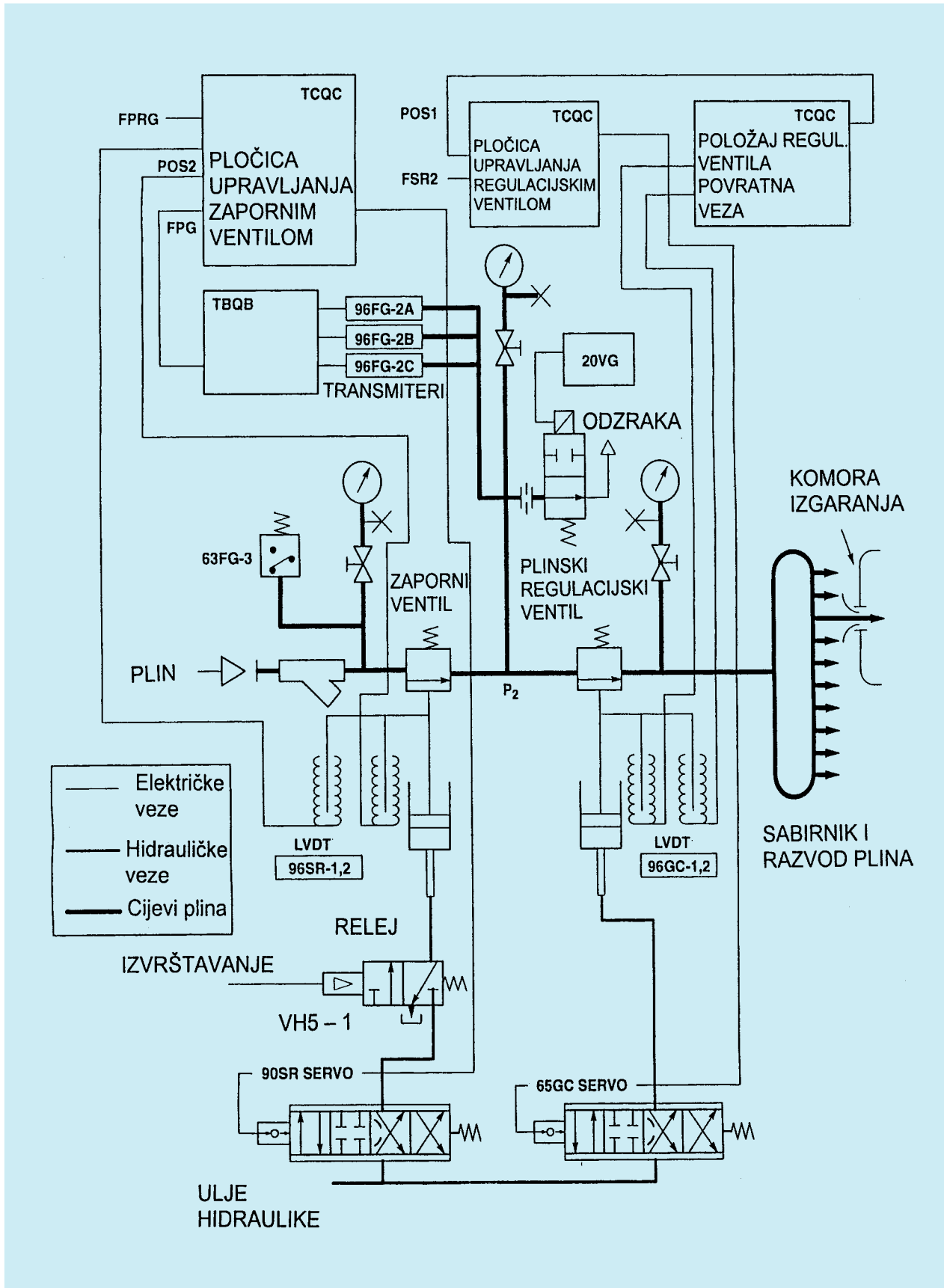
Plinovito gorivo se regulira pomoću plinskog zapornog ventila (ventila omjera brzine SRV) i sklopa plinskog regulacijskog ventila (GCV). Plinski regulacijski ventil je onaj koji regulira željenu količinu protoka goriva kao odziv na naredbeni signal FSR-a. Da bi se to izvršilo na predvidiv način, zaporni ventil (omjera brzine) je izveden tako da održava unaprijed određeni tlak (P2) na ulazu u plinski regulacijski ventil kao funkciju brzine vrtnje turbine.

Sustav regulacije plinovitog goriva sastoji se od sljedećih komponenata: plinskog sita, tlačne sklopke 63FG, sklopa zapornog ventila, pretvarača tlaka plina 96FG, elektromagnetskog ventila za odzračivanje 20VG, sklopa regulacijskog ventila, LVDT ili linearnih varijabilnih diferencijalnih transformatora 96GC-1, -2, -3 i 96SR-1,

-2, elektrohidrauličkih servoventila 90SR i 65GC, ispusnog releja VH5-1, tri manometra, sabirnika i razvoda plina na odgovarajuće sapnice za gorivo te SPEEDTRONIC kartica TBQB i TCQC. Komponente su prikazane shematski na slici 6.

Položaj vretena plinskog regulacijskog ventila nastoji biti proporcionalan s FSR2 koji predstavlja namještenu protočnu količinu plinovitog goriva. Hod vretena regulacijskog ventila opterećenog oprugom ostvaruje se pomoću hidrauličkog cilindra (servomotora) upravljanog elektrohidrauličkim servoventilom. Kada turbina treba raditi na plinovito gorivo, signali L4, L20FGX i L2TVX (završetak propuhivanja turbine) moraju biti "true=istiniti". Oni daju dozvolu za otvaranje plinskog regulacijskog ventila. Hod vretena ventila (otvorenost ventila) bit će proporcionalan sa FSR. FSR signal prolazi kroz razdjelnik vrste goriva gdje zahtjev na plinovito gorivo postaje FSR2, koji je obrađen po odstupanju i za pojačanje. Ovaj signal, FSROUT, odlazi u TCQC karticu gdje se pretvara u analogni signal. Položaj vretena plinskog regulacijskog ventila se mjeri pomoću izlaza linearnog diferencijalnog varijabilnog transformatora (LVDT) i povratne veze na radno pojačalo na kartici TCQC gdje se uspoređuje s ulaznim signalom FSROUT u točki zbrajanja. Za povratnu vezu su predviđena dva linearna diferencijalna transformatora LVDT; dva od tri regulatora pridružena su svaki jednom LVDT, dok treći odabire najvišu povratnu vezu kroz diodu visoke selekcije. Ako povratna veza ima odstupanje s FSROUT, radno pojačalo u TCQC kartici će promijeniti signal hidrauličkom servoventilu kako bi on pomaknuo plinski regulacijski ventil u smjeru smanjenja odstupanja. Na taj način održava se željeni odnos između položaja i FSR2, a regulacijski ventil ispravno dozira plinovito gorivo. Pladanj plinskog regulacijskog ventila oblikovan je tako da osigura ispravnu protočnu površinu u odnosu na hod vretena. Plinski regulacijski ventil ima pladanj s prorezom i venturi sjedište kako bi se postigao odgovarajući oporavak tlaka. Visoki oporavak tlaka općenito imamo kod omjera tlakova u ventilu znatno ispod kritičnog omjera tlaka. Rezultat toga je da je protočna količina kroz regulacijski ventil neovisna o padu tlaka u ventilu. Protočna količina plina je tada funkcija ulaznog tlaka u ventil P2 i presjeka površine strujanja.

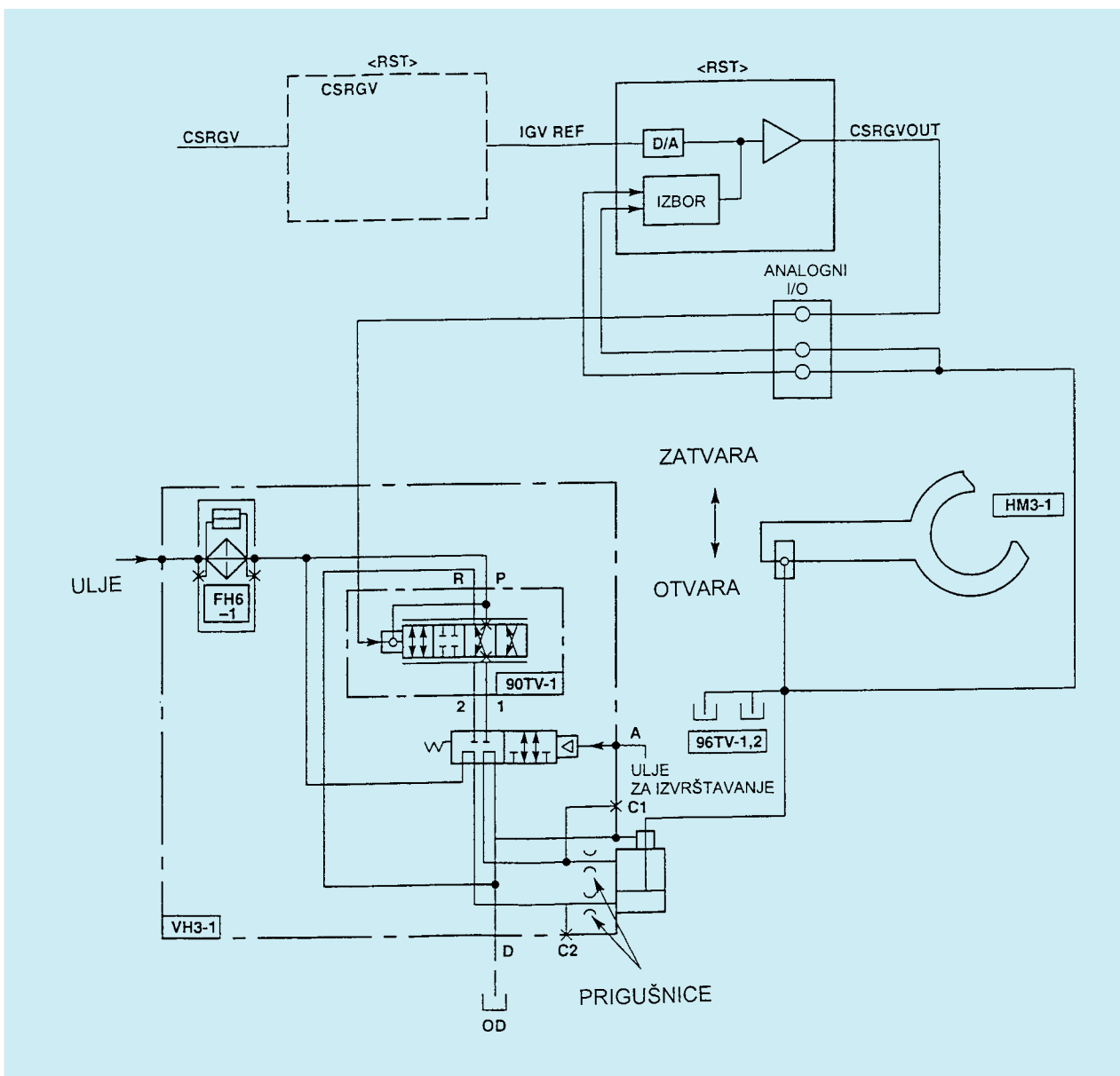
Zaporni ventil ima dvojnu funkciju. On služi kao ventil za regulaciju tlaka, tj. za održanje željenog tlaka, plinovitog goriva ispred plinskog regulacijskog ventila, a također služi i kao zaporni ventil. Kao zaporni ventil sastavni je dio zaštitnog sustava. Svako izvrštavanje ili normalna obustava zatvara ventil i na taj način zatvara dovod goriva u turbinu. To se provodi ili rušenjem tlaka hidrauličkog ulja na releju VH5-1 za hidrauličko izvrštavanje zapornog ventila ili električnim putem dovodeći regulaciju položaja u stanje zatvorenosti. Zaporni ventil ima dvije regulacijske petlje; petlju položaja slično kao regulacijski ventil i petlju za regulaciju tlaka.



Slika 6. Sustav upravljanja plinskim gorivom

Tlak plinovitog goriva P2 na ulazu u plinski regulacijski ventil regulira se pomoću regulacijske petlje kao funkcija brzine vrtnje turbine. To se provodi proporcionalno prema signalu brzine vrtnje turbine TNH, pojačanjem i sumiranjem, koji tada postaje referenca tlaka plinovitog goriva FPRG. Signal FPRG nakon toga ide u karticu TCQC gdje se pretvara u analogni signal. Tlak P2 se mjeri pomoću tlačnog transmitera 96FG koji šalje izlazni signal proporcionalan tlaku P2. Ovaj P2 signal (FPG) se uspoređuje s FPRG, a signal odstupanja (ako postoji) se opet uspoređuje s povratnom vezom 96SR LVDT za ponovno pozicioniranje ventila kao i u slučaju petlje GCV. Zaporni ventil omogućuje obustavu toka plinovitog goriva kod normalne obustave turbine, izvrštavanja ili u stanju mirovanja. Rasteretni ventil za hid-

rauličko izvrštavanje VH-5 je smješten između elektrohidrauličkog servoventila 90SR i cilindra servomotora. S ovim rasteretnim ventilom upravlja sustav niskotlačnog ulja za izvrštavanje. Ako su dozvole L4 i L3GRV "true=istinite", ulje za izvrštavanje je pod normalnim tlakom, a rasteretni ventil se drži u položaju koji omogućuje servoventilu 90SR da regulira položaj cilindra. Kada je tlak ulja za izvrštavanje nizak (kao što je slučaj kod normalne ili prisilne obustave), opruga rasteretnog ventila pomakne upravljački ventil u položaj koji ruši tlak visokotlačnog ulja u servomotoru zapornog ventila puštajući ulje u spremnik ulja za podmazivanje. Opruga za zatvaranje ventila odmah gura pladanj i zatvara ventil, što ima za posljedice obustavu dovoda goriva u komore izgaranja.



Slika 7. Shema upravljanja ulaznim privodnim lopaticama

Servoventili su opremljeni mehaničkom zaštitom koja dovodi namještenu vrijednost položaja vretena FSR na nulu u slučaju gubitka signala ili napajanja i na taj način uzrokuje zatvaranje plinskog regulacijskog ventila ili ventila omjera brzine (zaštitno stanje). Za vrijeme izvrštavanja ili stanja mirovanja na servo zavojnice se narine napon koji ventil drži u položaju "ventil zatvoren". Pomične ulazne privodne lopatice (IGV = Inlet Guide Vanes) se isporučuju na većini turbina da bi se njima kontrolirao protok zraka pri upuštanju te pomoću njih izbjegavalo pumpanje kompresora. Postavna vrijednost pri upuštanju za IGV je 34 stupnja, a minimalna vrijednost za pogonsku brzinu vrtnje je 57 stupnja dok je maksimalni IGV kut 84 stupnja koji odgovara nazivnom ulaznom kompresorskom protoku. Pomične (zakretne) ulazne privodne lopatice (IGV) imaju sposobnost upravljanja kompresorskim ulaznim protokom pri normalnim pogonskim uvjetima u rasponu između 75% i 85% do 100% ovisno o prevladavajućim okolnim uvjetima te stanju stroja. To osigurava povišenu ispušnu temperaturu pri djelomičnom opterećenju u odnosu na uvjete pri punom protoku zraka te može znatno povećati količinu ispušne energije turbine koja se može iskoristiti u kotlu na ispušne plinove (KIP), jer više ispušne temperature pri smanjenim protocima osiguravaju učinkovitiji prijelaz topline u KIP-u. Modulacijom ulaznih privodnih zakretnih lopatica koje su smještene na ulazu u kompresor regulira se protok zraka u kompresor. Položaj tih lopatica djeluje na ulaznu količinu kompresorskog zraka. Njima se efektivno optimalizira specifični potrošak topline pri djelomičnom opterećenju čime će u biti upravljati sustav upravljanja i vođenja plinske turbine. Sustav podesivih ulaznih skretnih lopatica čine sljedeće komponente: servoventil 90TV, detektori položaja LVDT 96TV-1 i 96TV-2 i hidraulički rasteretni ventil VH3. Upravljanje s 90TV će propustiti tlak upravljačke tekućine na servomotor podesivih ulaznih skretnih lopatica. Ako je potrebno, 20TV (elektromagnetski ventil za izvrštavanje – nije prikazan na sl. 7) i VH3 mogu spriječiti djelovanje tlaka upravljačkog ulja na 90TV. Vidi sliku 7.

Za vrijeme ubrzanja plinske turbine do nazivne brzine vrtnje, ulazne zakretne lopatice (IGV) sudjeluju u regulaciji opterećenje i rasterećenje generatora te pri usporavanju plinske turbine. Ova IGV modulacija održava ispravan tlak i protočnu količinu u kompresoru, a s time i naprezanja unutar dozvoljenih naprezanja, održava minimalni pad tlaka kroz sapnice za gorivo, a ako se koristi u kombiniranom procesu, kao što je rečeno, održava visoke ispušne temperature pri niskim opterećenjima.

Pri upuštanju, ulazne skretne lopatice se drže potpuno zatvorene, nazivno pod kutom od 34 stupnja, od nule do 83,5 % korigirane brzine vrtnje. Brzina vrtnje turbine se korigira u odnosu na stanje zraka pri 27°C; što je u stvari kompenzacija zbog promjene gustoće okolišnog zraka. Pri okolišnim temperaturama iznad 27°C

korigirana brzina vrtnje TNHCOR je manja nego stvarna brzina vrtnje TNH; pri stanju okoliša ispod 27°C TNHCOR je veća nego TNH.

Pri normalnoj obustavi, kako izlazna temperatura pada, ulazne skretne lopatice se zakreću prema minimalnom kutu pune brzine vrtnje; kako se turbina usporava od 100 % TNH na 0% TNH, ulazne skretne lopatice se zakreću u položaj potpune zatvorenosti. Ako generatorski prekidač otvori, kompresorski oduzimački ventili će se otvoriti. U slučaju izvrštavanja turbine, kompresorski oduzimački ventili su otvoreni, a ulazne skretne lopatice prelaze u položaj potpune zatvorenosti. Ulazne skretne lopatice ostaju potpuno zatvorene kako turbina nastavlja zaustavljanje.

8. REGULACIJA DVOJNOG GORIVA

Turbine koje su izvedene za rad na tekuće i plinovito gorivo opremljene su regulacijom kako bi se omogućilo sljedeće:

1. Prijelaz s jednog goriva na drugo na naredbu.
2. Dopustilo vrijeme za punjenje cjevovoda vrstom goriva na koju se namjerava prijeći.
3. Rad s oba goriva u isto vrijeme.
4. Pogon s ispiranjem sapnica za tekuće gorivo kada se prijeđe potpuno na plinovito gorivo.

Ako turbina radi na tekuće gorivo (FSR1) a pritisne se sklopka za izbor plinovitog goriva, nastupaju sekvence koje dopusne signale za prijelaz s jedne vrste goriva na drugu čine istinitim ("true"). FSR1 će ostati na svojoj početnoj vrijednosti, ali će FSR2 poprimiti vrijednost nešto višu od nule, obično 0,5 %. Nakon standardnog vremenskog usporenja od 30 sekundi koje je potrebno za uspostavu tlaka P2 i punjenje cjevovoda za dovod plina, softverski program izdaje naredbe za gorivo, za porast FSR2 i pad FSR1, u skladu s programiranim vrijednostima. To će biti obavljeno za 30 sekundi. Kada je prijelaz završen, logički signal L84TG (Total Gas/potpuno plin) isključuje crpku tekućeg goriva, zatvara zaporni ventil ulja za loženje razbuđivanjem rasteretnog ventila tekućeg goriva 20FL i inicira sekvencu ispuhivanja. Ispuhivanje tekućeg goriva se aktivira kako bi se spriječilo koksiranje sapnica tekućeg goriva za vrijeme rada na plinovito gorivo, a postupak se sastoji u tome da se dio zraka za raspršivanje usmjerava kroz sapnice tekućeg goriva.

Prijelaz s plina na tekuće gorivo u biti ima iste sekvence i prijelaz s tekućeg goriva na plin, osim što su signali za plinovito i tekuće gorivo zamijenjeni. Na primjer, na početku prijelaza FSR2 ostaje na svojoj početnoj vrijednosti a FSR1 poprima vrijednost nešto veću od nule.

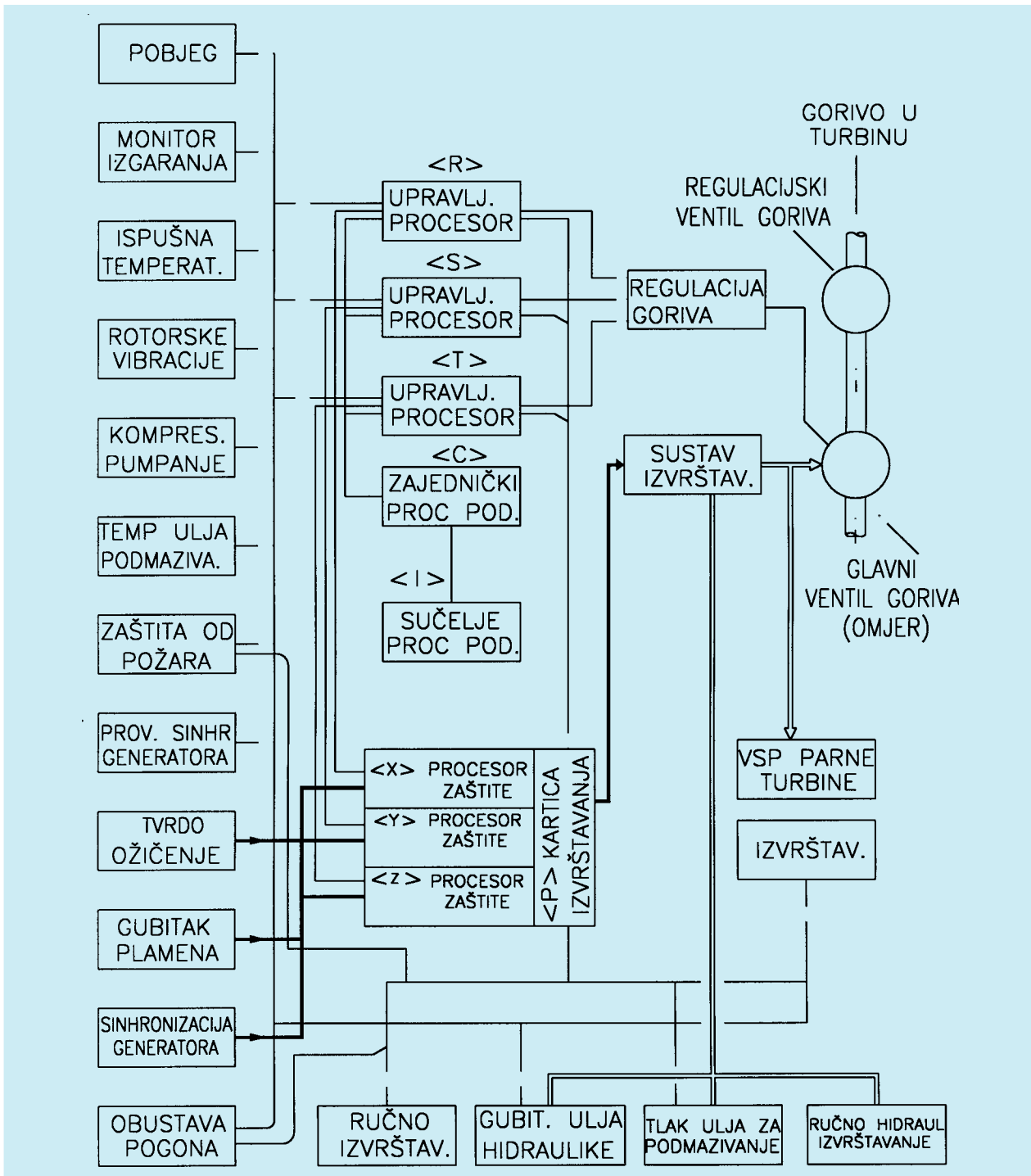
Plinske turbine mogu raditi i sa smjesom tekućeg i plinovitog goriva. Postavljaju se ograničenja na smjesu kako bi se osiguralo pravilno izgaranje, raspodjela goriva, i

brzina strujanja u sapnicama za plin. Sa smanjivanjem opterećenja mora se povećavati postotak protočne količine plina radi održavanja minimalnog omjera tlakova na sapnicama za plin.

9. ZAŠTITA PLINSKE TURBINE

Zaštitni sustav plinske turbine obuhvaća veći broj pod-sustava, od kojih neki rade za vrijeme svakog normal-

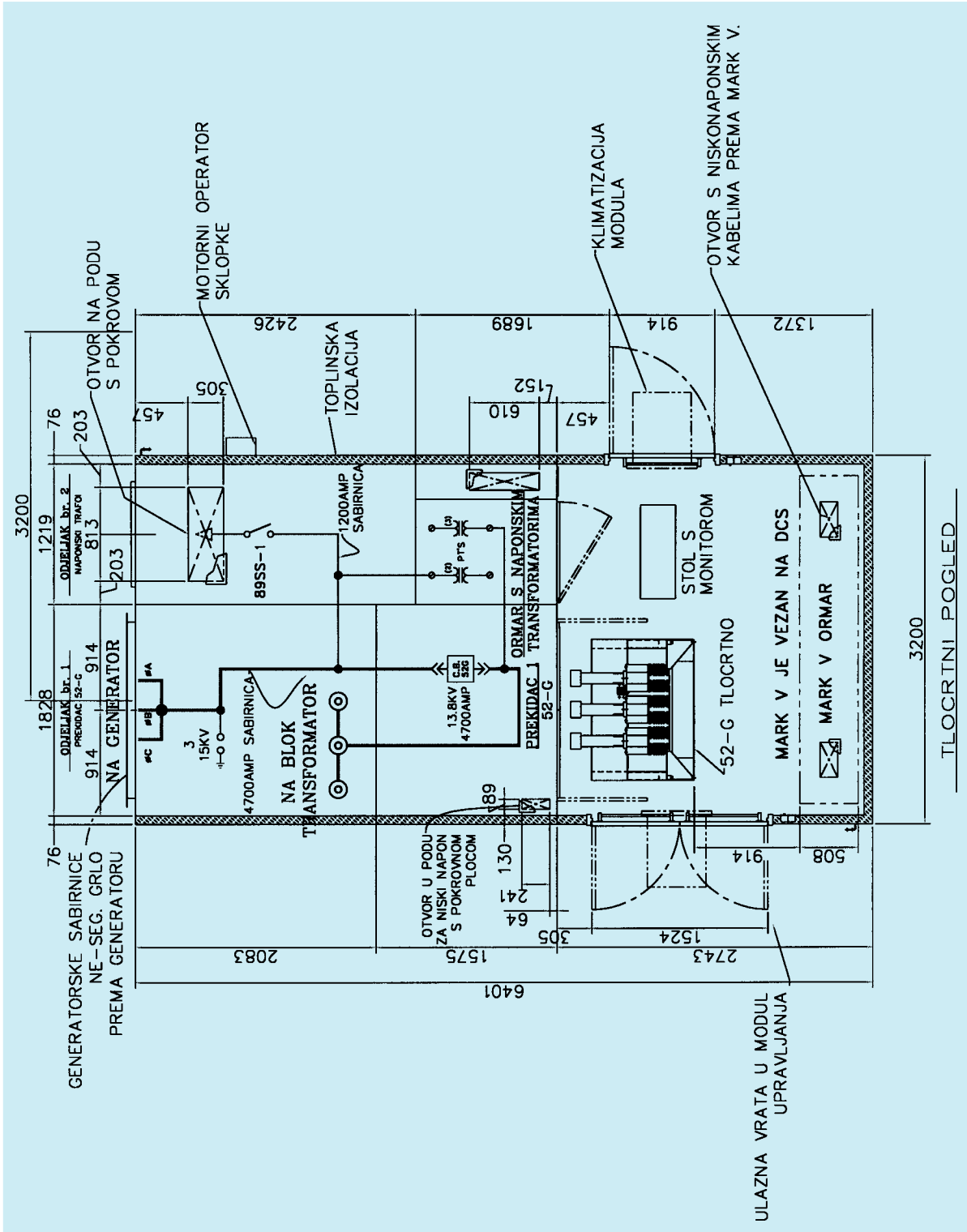
nog upuštanja i obustave. Ostali sustavi i komponente funkcioniraju striktno za vrijeme nužde i nenormalnih pogonskih stanja. Najčešći slučaj pogreške kod plinske turbine je ispad senzora ili ožičenja senzora; sustavi zaštite su podešeni tako da otkriju i upozore na takav ispad. Ako je stanje dovoljno ozbiljno da onesposobi kompletnu zaštitu, turbina će izvrstiti. Sustavi zaštite reagiraju na jednostavne signale za izvršavanje kao što su tlačne sklopke za nizak tlak ulja za pod-



Slika 8. Zaštita plinske turbine

mazivanje, za visoki tlak na izlazu iz kompresora ili slična ekstremna stanja. Oni također reagiraju na kompleksnije parametre kao što je prekoračenje brzine vrtnje i temperature, prevelike vibracije, nadzor izgaranja i gubitak plamena. Da bi to ostvarili, neki od ovih zaštitnih sustava i njihovih komponenata rade s glavnim regulacijskim i zaštitnim krugovima upravljačkog sustava SPEEDTRONIC, dok drugi potpuno mehanički sus-

tavi rade direktno na komponentama turbine. U svakom slučaju postoje dvije u biti nezavisne staze za obustavu dovoda goriva preko regulacijskih ventila goriva i zapornog ventila goriva. Svaki zaštitni sustav je izveden nezavisno od regulacijskog sustava kako bi se izbjegla mogućnost da ispad regulacijskog sustava onespособi zaštitne uređaje.



Slika 9. Modul s upravljanjem i elektroopremom



Slika 10. Ulaz u upravljački modul u kojem je smješten generatorski prekidač

Bitne komponente zaštite plinske turbine su:

Hidraulički sustav za izvrštavanje ili ulje za izvrštavanje, primarna je zaštitna veza između regulacije turbine i zaštitnog sustava i komponenata na turbini koja pušta gorivo u turbinu ili obustavlja dovod goriva u turbinu. Sustav sadrži električne uređaje kojima upravljaju signali regulacijskog sustava SPEEDTRONIC kao i neke potpuno mehaničke uređaje. Osim funkcija izvrštavanja, ulje za izvrštavanje također daje hidraulički signal zapornim ventilima goriva za normalne sekvence upuštanja i obustave. Na plinskim turbinama koje su opremljene za rad na dvojno gorivo (plin i ulje), sustav se koristi za selektivnu izolaciju sustava goriva koji nije potreban za pogon.

Mehanički centrifugalni izvrštilac je potpuno mehanički uređaj koji automatski aktivira svornjak pri nedopuštenoj brzini vrtnje. Posljedica je nagli pad tlaka ulja za izvrštavanje koji obustavlja dovod goriva u turbinu. Mehanički sustav za zaštitu od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje je rezerva za elektronički sustav za zaštitu od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje. Kao rezervni sustav ima namještenu vrijednost brzine vrtnje za izvrštavanje višu nego primarni elektronički sustav. Ovo izvrštavanje je potpuno neovisno o električnim spojevima u turbinskom upravljačkom ormaru (slika 9). Ako se to izvrštavanje dogodi, pojavljuje se alarm.

Ventil za rasterećenje

Svaka pojedina grana goriva u sustavu ulja za izvrštavanje ima elektromagnetski ventil za rasterećenje (20FL za tekuće gorivo, 20FG za plin). Ovaj uređaj je elektromagnetski upravljački ventil s povratnom oprugom koji ruši tlak ulja za izvrštavanje samo u grani koju kontrolira. Ovi ventili normalno u uzbuđenom stanju su zatvoreni, a u razuzbuđenom stanju izazivaju izvrštavanje. Ova koncepcija štiti turbinu u svim normalnim situacijama kao i u slučajevima gubitka istosmjernog napajanja.

Tlačne sklopke

Svaka pojedina grana goriva ima tlačne sklopke (63HL-1, -2, -3 za tekuće gorivo, 63HG-1, -2, -3 za plin) koje će osigurati izvrštavanje turbine ako tlak ulja za izvrštavanje postane prenizak za pouzdan pogon na to gorivo.

Uređaji za izvrštavanje koji uzrokuju obustavu rada turbine ili obustavu pojedinog sustava goriva čine to rušenjem tlaka niskotlačnog ulja za izvrštavanje. Pojedini zaporni ventil goriva može biti selektivno zatvoren ispuštanjem ulja za izvrštavanje koje ide prema njemu.

Elektronički sustav za zaštitu od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje

Sustav za kontrolu prekoračenja dopuštene brzine vrtnje u SPEEDTRONIC-u Mark V je izveden tako da zaštiti plinsku turbinu od mogućih šteta zbog preko-

račenja brzine vrtnje turbinskog rotora. U normalnom pogonu brzinu vrtnje rotora kontrolira regulacija brzine vrtnje. Sustav za zaštitu od prekoračenja brzine vrtnje se ne aktivira, osim ako ne zataje ostali sustavi. Sustav za zaštitu od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje se sastoji od primarnog i sekundarnog elektroničkog sustava zaštite. Primarni elektronički sustav zaštite od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje nalazi se u <RST> regulatorima. Sekundarni elektronički sustav zaštite od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje nalazi se u <XYZ> regulatorima. Oba sustava se sastoje od magnetskih davača za detekciju brzine vrtnje turbine, softvera za detekciju i pripadnih logičkih krugova, a namješteni su da izvrste turbinu na 110 % nazivne brzine vrtnje. Elektronička funkcija zaštite od prekoračenja dopuštene brzine vrtnje se izvodi i u <RST> i u <XYZ>. Signal brzine vrtnje turbine (TNH) od senzora magnetskih davača (77NH-1, -2 i -3) uspoređuje se prema namještenoj vrijednosti najveće dopuštene brzine vrtnje (TNKHOS). Ako TNH prijeđe namještenu vrijednost, signal za izvrštavanje (L12H) se prenosi u glavni zaštitni krug za izvrštavanje turbine, a na zaslonu se obično pojavljuje poruka "ELECTRICAL OVERSPEED TRIP" (električno izvrštavanje zbog prekoračenja brzine).

Zaštita od previsoke temperature

Sustav zaštite od previsoke temperature štiti plinsku turbinu od mogućih oštećenja uzrokovanih pretjeranim izgaranjem u komorama izgaranja. To je rezervni sustav koji se aktivira samo ako zataji regulacija temperature. U normalnim pogonskim uvjetima sustav za regulaciju izlazne temperature djeluje na količinu goriva ako se dosegne granična temperatura paljenja.

Sustav za zaštitu od nestanka plamena i detekciju plamena

Detektori plamena u sustavu regulacije SPEEDTRONIC Mark V obavljaju dvije funkcije, jednu u sustavu sekvenciranja, a drugu u zaštitnom sustavu. Za vrijeme normalnog upuštanja detektori plamena javljaju da je u komorama izgaranja plamen uspostavljen i može se nastaviti sekvenca upuštanja. Većina turbina ima četiri detektora plamena, neke i više. Općenito govoreći, ako polovica detektora javlja plamen, a polovica (ili manje) javlja da nema plamena, pojaviti će se alarm, ali turbina neće izvrstiti. Ako više od polovice detektora javlja gubitak plamena, turbina će izvrstiti uz poruku "LOSS OF FLAME" (gubitak plamena). Time se izbjegava stvaranje eksplozivne smjese u turbini i kotlu na ispušne plinove. Sustav detektora plamena koji se koristi sa SPEEDTRONIC Mark V sustavom otkriva plamen osjetom ultraljubičastog zračenja. Takvo zračenje nastaje pri izgaranju ugljikovodika i puno pouzdanije se otkriva nego vidljiva svjetlost koja varira u boji i intenzitetu. Osjetnik plamena je detektor s bakrenom katodom konstruiran tako da osjeti prisutnost ultraljubičastog zračenja. Za pogon cijevi ultraljubičastog detektora regulacija SPEEDTRONIC daje istosmjerni napon od 350 V. Ako je prisutno ultraljubičasto zračenje, plin u cijevi detek-

tora se ionizira i provodi struju. Sustav detektora plamena je sličan ostalim zaštitnim sustavima, po tome što nadzire sam sebe.

Zaštita od vibracija

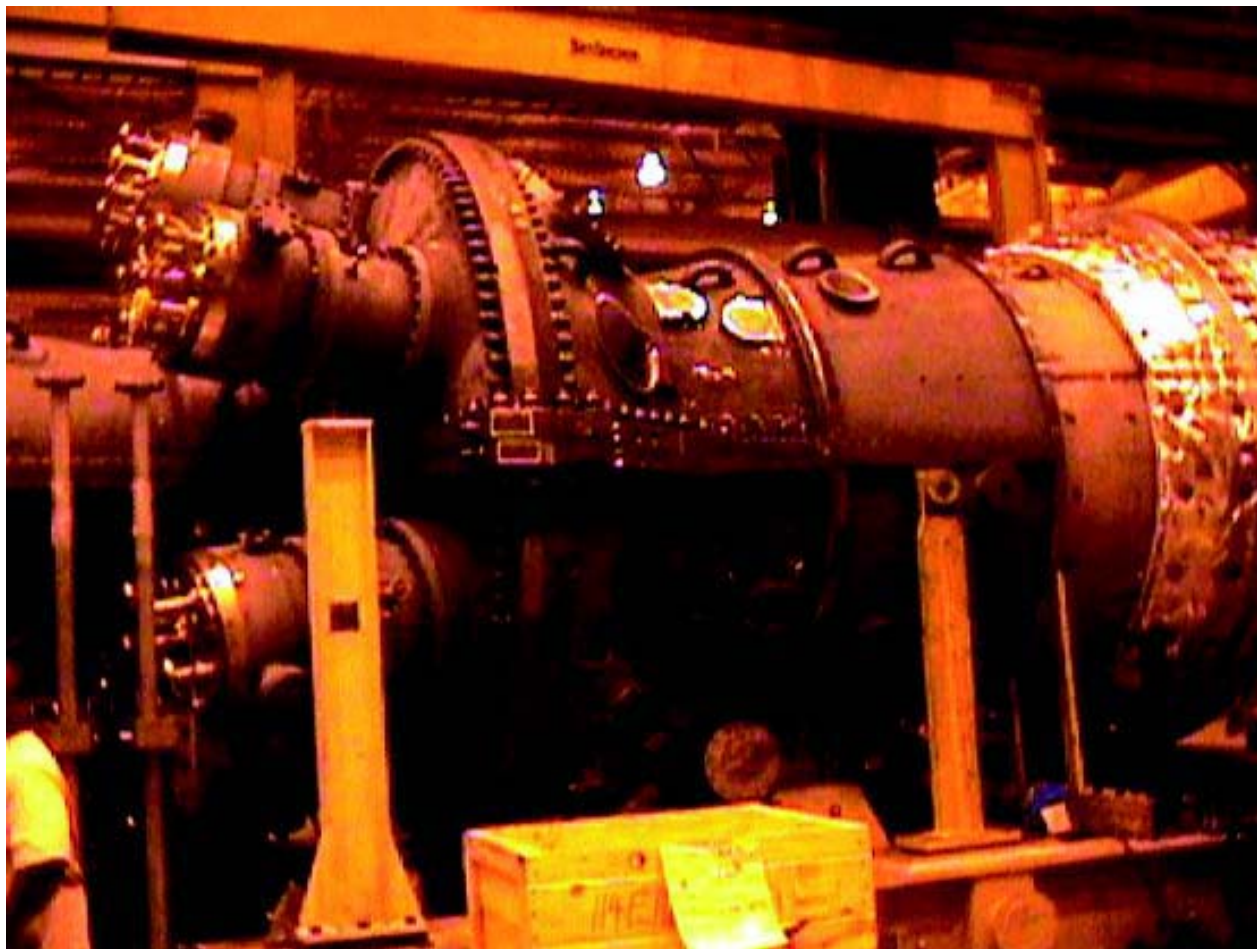
Sustav zaštite od vibracija na plinskoj turbini sastoji se od više nezavisnih kanala. Svaki kanal detektira prekomjerne vibracije pomoću seizmičkih davača smještenih na kućištu ležaja ili sličnom mjestu plinske turbine i pogonjenog stroja. Ako se prijeđe unaprijed zadana razina vibracija, zaštitni sustav izvrštava turbinu i javlja uzrok izvrštavanja. Svaki kanal sadrži jedan davač vibracija i krug za pojačanje u SPEEDTRONIC Mark V sustavu.

Nadzor izgaranja

Primarna funkcija nadzora izgaranja je smanjiti vjerojatnost veće štete na plinskoj turbini ako se sustav izgaranja pokvari. Nadzor se provodi ispitivanjem termoparova izlazne temperature i termoparova na izlazu iz kompresora. Iz promjena koje se mogu zapaziti u uzorku očitavanja termopara, softver za nadzor izgaranja generira signale upozorenja i zaštite za alarmiranje i/ili izvrštavanje plinske turbine.

10. ZAKLJUČAK

Plinskturbinska postrojenja se sastoje od nekoliko paketa (modula) koji su sa svojim postoljima postavljeni na vlastite temelje (slika 10). Glavni moduli su obično plinska turbina ili plinskoturbinski modul, električni generator, upravljački modul, pomoćni odjeljak generatora, moduli za gorivo, modul za pokretanje i uzbudu (LCI), modul za pranje kompresora, modul za gašenje požara, modul za pripremu zraka, motorski podrazvod (MCC) ili ovisno prema podjeli još neki. Kućišta modula omogućuju prilaz opremi unutra, a radi rutinskih inspekcija i održavanja. Kućišta su također grijana, hladena i osvijetljena. Upravljački modul se smješta u neki od modula koji traže veći obujam (slika 9). Sustav mjerenja, regulacije, upravljanja te zaštite plinskoturbinskog postrojenja se na suvremenim turbinama izvodi tako da osigurava siguran i pouzdan pogon plinskoturbinskog postrojenja i da ne dovodi u opasnost postrojenje i zgrade, posadu te okolna naselja. Isto tako sustav mjerenja, regulacije, upravljanja te zaštite osigurava zaštitu okoliša jer kontinuirano prati sve parametre o kojima ovisi emisija plinova. Vođenje (upravljanje i regulacije) plinske turbine, koja je uvijek srce kombi bloka, se izvodi sa tri procesora koji rade po sistemu "2 od 3", omogućujući na taj način optimum sigurnosti i raspoloživosti rada plinske turbine. Mjerna osjetila koja ulaze u krugove zaštite su izvedena kao trostruka ili dvostruka, tako da jedna pogreška na osjetilima ne umanjuje funkcionalnost kruga zaštite. Svi instrumenti na turbinskom postrojenju se odabiru i ugrađuju tako da osiguravaju otpornost na mehaničke i električke smetnje. Sva oprema koja se ugrađuje u eksplozivno



Slika 11. Ge turbina MS6001FA (komore izgaranja na lijevoj strani slike)

ugrožen prostor ili sama stvara eksplozivnu zonu izvodi se u protueksplozijskoj zaštiti. Mjerenja temperatura se provode otporničkim termometrima i termoparovima. Signalizacije stanja svih aparata i izvršnih sprava su vidljivi na zaslonskim prikazima. Nedoželjena prekoračenja pogonskih vrijednosti pojedinih parametara se alarmiraju, a onda ako je nužno turbina izvrštava.

[6] GEH-6195 "SPEEDTRONIC™ Mark V Turbine Control – Application Manual", General Electric Company, Schenectady, NY 1998.

[7] GEH-5979D "SPEEDTRONIC™ Mark V Turbine Control – Users Manual", General Electric Company, Schenectady, NY 1998.

LITERATURA

- [1] W. I. ROWEN, "Operating Characteristics of Heavy – Duty Gas Turbines in Utility Service" General Electric Company, Schenectady, NY 1988.
- [2] SUSTAV VOĐENJA, ELEKTRIČKA ZAŠTITA I MJERENJE Y3-C90.00.30-S01.0, ELEKTROPROJEKT D.D., ZAGREB, 26. travnja 1999.
- [3] "Fundamentals of SPEEDTRONIC™ Mark V Control System", General Electric Company, Schenectady, NY 1993.
- [4] D. JOHNSON, R. W. MILLER, "SPEEDTRONIC™ Mark V Gas Turbine Control System", GE Drive Systems Salem, VA, 1996.
- [5] W. J. THAYER, "Transfer functions for MOOG servovalves", January 1965, Tech. Bulletin 103 Moog Inc, East Aurora, NY.

CONTROL AND REGULATION OF GAS TURBINE – THE EXAMPLE OF MS6001FA TURBINE

A condensed turbine without heat exchange produced by ABB Karlovac is built in the cogeneration plant TETO Zagreb. The plant consists of two gas turbines MS6001 FA with generators and two boilers using exhaust gases, and one steam turbine with a steam tube. Steam for the steam turbine is produced in a boiler by exhaust gases using recovery heat produced in a gas turbine. The cogeneration plant is going to produce 200 MW of electrical power and steam for district heating and industrial steam. In further text a technical description of the steam turbine including design and construction characteristics of the turbine is given. The description includes: oil on steam turbine, equipment for turbine protection, sealing steam, drainage and condensation. There are numerous ba-

sic technical data given. Special attention is paid to the control system of the whole cogeneration plant DCS, and the tasks of Marko V (control system of gas turbine) in relation to DCS and then TurboTurn - control system of the steam turbine. The turbine's operation and control using DCS system and TurboTurn is worked out using start up, normal operation and outage of the steam turbine.

STEUERUNG UND REGELUNG EINER GASTURBINE – AM BEISPIEL DER MS6001FA TURBINE

Die in "ABB-Karlovac" erzeugte Kondensationsturbine ohne Zwischenüberhitzung ist in die Kogenerationsanlage des Wärmekraftwerkes "TE-TO Zagreb" eingebaut worden. Die Anlage setzt sich aus zwei MS6001FA Gasturbinen mit Stromerzeugern, zwei Abhitzekesseln auf Turbinenabgase und einer Einzufuhr-Dampfturbine zusammen. Der Turbinendampf wird in den Abhitzekesseln mittels Abgaswärme der Gasturbinen erzeugt. Die Kogenerationsanlage wird 200 MW elektrischer Energie und Dampf für den Dampfversorgungsnetz und Industriebedarf erzeugen. Im Artikel wird weiters die Dampfturbine, unter Angabe ihrer Projektierungs- und Konstruktionsmerkmale, technisch

beschrieben. Ebenfalls beschrieben werden der Ölhaupt der Dampfturbinenanlage, die Schutzeinrichtungen der Turbine, der Labyrinthensperrabdampf, die Entwässerung und die Kondensation. Im Rahmen der technischen Beschreibung war man bestrebt möglichst viele technische Grundangaben zu unterbreiten. Um -gegenüber dem sog. DCS Steuerungssystem der ganzen Kogenerationsanlage- die Tätigkeiten der Steuerungssysteme der Gasturbinen "Mark V" und der Dampfturbine "Turboturn" hinzudeuten, wurde dem ernannten DCS eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Der Betrieb und die Behandlung der Dampfturbine über dem System DCS und dem "Turboturn" wurde in Anleitungen zu ihrer Inbetriebnahme, Normalbetrieb und Ausserbetriebnahme bearbeitet.

Naslov pisca:

**Mr. sc. Miroslav Šander, dipl. ing.
Elektroprojekt
Alexandera von Humboldta 4
10000 Zagreb, Hrvatska**

Uredništvo primilo rukopis:
2003 – 10 – 15.