

# Regulacija varijabilnog pogona termoenergetskog bloka

---

**Mišković, Darko**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:639557>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Darko Mišković**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Dr. sc. Dražen Lončar, izv.prof.

Student:

Darko Mišković

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Draženu Lončaru na savjetima tijekom izrade rada.

Darko Mišković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu               |        |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                               | Prilog |
| Klasa:                              |        |
| Ur.broj:                            |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Darko MIŠKOVIĆ** Mat. br.: 0135214057

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **REGULACIJA VARIJABILNOG POGONA TERMOENERGETSKOG BLOKA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **VARIABLE OPERATION CONTROL OF THERMAL POWER PLANT**

Opis zadatka:

Dugogodišnja primjena europske strategije povećanja udjela obnovljivih izvora energije utjecala je na promjenu načina vođenja pogona konvencionalnih postrojenja na fosilna goriva, ponajprije u smislu fleksibilnijeg odziva, čestih obustava i pokretanja, te dugotrajnog pogona na niskom opterećenju. Dosad prevladavajući bazni režim pogona u sve većoj mjeri zamjenjuje pogon određen zahtjevima pružanja tzv. „pomoćnih usluga“, odnosno sudjelovanja u regulaciji frekvencije i razdiobe djelatne električne snage u elektroenergetskom sustavu. Novi zahtjevi mijenjaju i strategije vođenja pogona bloka s naglašenim povećanjem gradjenata promjene procesnih varijabli, čak i po cijenu skraćivanja životnog vijeka kritičnih komponenata.

U okviru zadataka potrebno je za termoeenergetski blok ložen ugljenom snage 210 MW:

1. Postaviti matematički model nadređenog sustava regulacije i vođenja bloka;
2. Definirati strukturu i parametre podsustava koji ograničava brzine promjene opterećenja bloka;
3. Simulirati djelovanje sustava regulacije spregnutog s pojednostavljenim matematičkim modelom bloka u uvjetima pokretanja i promjene opterećenja bloka s različitim gradijentima;
4. Usporediti prednosti i nedostatke pogona s konstantnim i pogona s modificiranim kliznim tlakom svježih pare u kontekstu naglog povećanja snage bloka;
5. Procijeniti utjecaj promjena opterećenja na pogonsku raspoloživost termoeenergetskog bloka.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

Predviđeni datumi obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

**SADRŽAJ**

|   |      |
|---|------|
| POPIS SLIKA .....   | III  |
| POPIS TABLICA.....  | V    |
| POPIS OZNAKA .....  | VI   |
| POPIS INDEKSA.....  | VI   |
| POPIS KRATICA .....   | VII  |
| SAŽETAK.....  | VIII |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 2. POTENCIJALNE ŠTETE PROUZROKOVANE VARIJABILNIM POGONOM.....               | 3    |
| 2.1. Specifične pojave uslijed varijabilnog pogona bloka.....               | 3    |
| 2.2. Puzanje i zamor materijala .....                                       | 4    |
| 2.2.1. Puzanje materijala .....   | 4    |
| 2.2.2. Zamor materijala .....   | 5    |
| 3. SUVREMENA RJEŠENJA ZA POVEĆANJE FLEKSIBILNOSTI PARNIH TURBINA .          | 8    |
| 3.1. Sustavi upravljanja generatorom pare .....                             | 8    |
| 3.2. Smanjivanje naprezanja tijekom pokretanja.....                         | 9    |
| 3.3. Praćenje opterećenja pomoću kliznog tlaka .....                        | 10   |
| 3.4. Brzi odziv kod regulacije frekvencije na tržištu pomoćnih usluga ..... | 10   |
| 4. POJEDNOSTAVLJENI MATEMATIČKI MODEL TERMOENERGETSKOG BLOKA                | 13   |
| 5. STRATEGIJE VOĐENJA TERMOENERGETSKOG BLOKA .....                          | 18   |
| 5.1. Strategija turbina vodi (kotao slijedi).....                           | 19   |
| 5.1.1. Pogon s konstantnim tlakom .....                                     | 19   |
| 5.1.2. Pogon s modificiranim kliznim tlakom .....                           | 21   |
| 6. MATEMATIČKI MODEL PROGRIJAVANJA DEBELOSTIJENIH KOMPONENTI...             | 23   |
| 6.1. Rotor.....   | 23   |
| 6.2. Kućište turbine .....  | 25   |
| 6.3. Naprezanja u materijalu.....   | 26   |
| 6.4. Simulacija promjene temperature pare u turbini .....                   | 27   |
| 7. MODELIRANJE TOPLINSKIH NAPREZANJA U DEBELOSTIJENIM KOMPONENTAMA.....     | 29   |
| 7.1. Raspodjela životnog vijeka .....                                       | 30   |

---

|   |    |
|---|----|
| 7.2. Proračun amplitude dopuštenih naprezanja.....  | 31 |
| 7.3. Proračun dopuštenih razlika temperatura .....  | 31 |
| 8. NADREĐENI SUSTAV VOĐENJA I REGULACIJE .....  | 36 |
| 8.1. Matematički model nadređenog sustava regulacije i vođenja.....                                 | 38 |
| 8.2. Vođenje zadane vrijednosti snage bloka .....   | 39 |
| 8.3. Formiranje signala ostvarive snage .....   | 41 |
| 8.4. Formiranje gradijenata ostvarive snage.....  | 42 |
| 8.5. Nadzor turbinskih naprezanja.....  | 43 |
| 9. SIMULACIJA POKRETANJA TURBINE .....  | 46 |
| 9.1. Priprema turbine za start.....   | 46 |
| 9.2. Pokretanje turbine do praznog hoda i sinkronizacija .....                                      | 47 |
| 9.2. Hladni start .....   | 48 |
| 9.2.1. Simulacija hladnog starta .....  | 49 |
| 9.3. Topli start .....  | 53 |
| 9.3.1. Simulacija toplog starta .....   | 53 |
| 9.4. Vrući start .....  | 57 |
| 9.4.1. Simulacija vrućeg starta turbine .....   | 58 |
| 9.5. Usporedba zaliha naprezanja kod hladnog, toplog i vrućeg starta .....                          | 62 |
| 10. SIMULACIJA PROMJENE OPTEREĆENJA BLOKA S RAZLIČITIM<br>GRADIJENTIMA .....                        | 64 |
| 11. USPOREDBA STRATEGIJA VOĐENJA S KONSTANTNIM I MODIFICIRANIM<br>KLIZNIM TLAKOM .....              | 68 |
| 12. PROCJENA UTJECAJA PROMJENA OPTEREĆENJA NA POGONSKU<br>RASPOLOŽIVOST TERMOENERGETSKOG BLOKA..... | 74 |
| 13. ZAKLJUČAK .....   | 79 |
| LITERATURA .....  | 81 |
| PRILOZI.....  | 82 |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Temperaturno polje unutar rotora tijekom progrijavanja turbine [11].....   | 3  |
| Slika 2.  | Polje naprezanja unutar rotora tijekom progrijavanja turbine [11].....   | 3  |
| Slika 3.  | Krivulja puzanja materijala.....   | 4  |
| Slika 4.  | Pojava ubrzanog puzanja materijala.....  | 5  |
| Slika 5.  | Ispitivanje životnog vijeka ciklički opterećenog materijala [4].....   | 6  |
| Slika 6.  | Tipična $\sigma$ - $N$ krivulja za dva različita materijala [4].....   | 6  |
| Slika 7.  | Primjer poboljšanja na TE bloku nakon promjene upravljačkog sustava [4].....   | 8  |
| Slika 8.  | Dobivanje većih gradijenata kombiniranim radom više TE blokova [4].....  | 9  |
| Slika 9.  | Kondenzat-stop metoda za postizanje brzih odziva [4].....  | 12 |
| Slika 10. | <i>Bypass</i> ventil VT stupnja za veoma brze odzive.....  | 12 |
| Slika 11. | Prikaz dinamičkih odnosa u TE bloku [8].....   | 13 |
| Slika 12. | Pojednostavljeni matematički model TE bloka.....   | 14 |
| Slika 13. | Blok dijagram dinamike regulacije temperature svježe pare [8].....   | 15 |
| Slika 14. | Prijenosna funkcija pregrijača pare [8].....   | 16 |
| Slika 15. | Matematički model isparivača i pregrijača pare.....  | 17 |
| Slika 16. | Karakteristika pogona s konstantnim tlakom [8].....  | 19 |
| Slika 17. | Odziv bloka na skokovito otvaranje ventila u 10. sekundi.....  | 20 |
| Slika 18. | Karakteristike pogona s modificiranim kliznim tlakom [8].....  | 21 |
| Slika 19. | Odzivi bloka u režimu modificiranog kliznog tlaka.....   | 22 |
| Slika 20. | Radijalni presjek rotora.....  | 23 |
| Slika 21. | Radijalni presjek kućišta.....   | 25 |
| Slika 22. | Simulacija promjene temperature materijala kućišta.....  | 27 |
| Slika 23. | Promjena naprezanja u materijalu kućišta.....  | 28 |
| Slika 24. | Određivanje dopuštenog naprezanja $\sigma_{j,lin}$ temeljem reduciranog broja pokretanja $N_{j,red}$ za čelik 28CrMoNiV4-9 na temperaturi 400°C [9]..... | 31 |
| Slika 25. | Interpolacija dopuštenih razlika temperature pravcima.....   | 33 |
| Slika 26. | Interpolacija dopuštenih naprezanja pravcima.....  | 35 |
| Slika 27. | Hijerarhijska struktura suvremenog regulacijskog sustava TE bloka [6].....   | 36 |
| Slika 28. | Načelna shema nadređenog sustava regulacije [6].....   | 39 |
| Slika 29. | Vođenje zadane vrijednosti snage bloka.....  | 40 |
| Slika 30. | Sklop za formiranje signala ostvarive snage.....   | 41 |
| Slika 31. | Sklop za formiranje gradijenata ostvarive snage.....   | 42 |
| Slika 32. | Blok dijagram programa za nadzor turbinskih naprezanja [10].....   | 43 |
| Slika 33. | Ograničenje porasta snage kod promjene opterećenja bloka.....  | 44 |
| Slika 34. | Krivulje pokretanja kod vrućeg, toplog i hladnog starta [3].....   | 48 |
| Slika 35. | Hladni start turbine.....  | 49 |
| Slika 36. | Temperature i ukupna naprezanja u slojevima kućišta kod hladnog starta.....  | 50 |
| Slika 37. | Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod hladnog starta.....  | 51 |
| Slika 38. | Usporedba zaliha naprezanja kod hladnog starta.....  | 52 |
| Slika 39. | Topli start turbine.....   | 54 |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 40. | Temperature i ukupna naprezanja u slojevima kućišta kod toplog starta.....                          | 54 |
| Slika 41. | Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod toplog starta .....                       | 55 |
| Slika 42. | Usporedba zaliha naprezanja kod toplog starta .....   | 56 |
| Slika 43. | Vrući start turbine.....  | 58 |
| Slika 44. | Temperature i ukupna naprezanja u slojevima kućišta kod vrućeg starta .....                         | 59 |
| Slika 45. | Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod vrućeg starta.....                        | 60 |
| Slika 46. | Usporedba zaliha naprezanja kod vrućeg starta .....   | 61 |
| Slika 47. | Usporedba temperatura i zaliha naprezanja kod hladnog, toplog i vrućeg strata..<br>.....            | 62 |
| Slika 48. | Promjena snage bloka s različitim gradijentima.....   | 64 |
| Slika 49. | Promjena intenziteta loženja .....  | 64 |
| Slika 50. | Promjena temperature pare, te srednjih temperatura rotora i kućišta.....                            | 65 |
| Slika 51. | Zalihe naprezanja u rotoru i kućištu .....  | 65 |
| Slika 52. | Temperature i naprezanja u slojevima rotora .....   | 66 |
| Slika 53. | Temperature i naprezanja u slojevima kućišta .....  | 67 |
| Slika 54. | Usporedba snaga bloka u oba režima rada .....   | 68 |
| Slika 55. | Usporedba promjene protoka, otvorenosti ventila, tlaka i protoka goriva za oba<br>režima rada ..... | 69 |
| Slika 56. | Usporedba temperatura pare, rotora i kućišta u oba režima rada .....                                | 70 |
| Slika 57. | Naprezanja u slojevima kućišta u režimu s modificiranim kliznim tlakom .....                        | 71 |
| Slika 58. | Srednje temperature i zalihe naprezanja u rotoru i kućištu za oba režima rada                       | 72 |
| Slika 59. | Zalihe naprezanja u kućištu i rotor za oba režima rada .....  | 73 |
| Slika 60. | Naprezanja u materijalu i otkrivene ekstremne vrijednosti naprezanja [8].....                       | 75 |
| Slika 61. | Simulacija postupne promjene snage bloka .....  | 77 |

**POPIS TABLICA**

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tablica 1. | Zadatak manipuliranih u odnosu na upravljane varijable [8].....                          | 18 |
| Tablica 2. | Parametri pokretanja turbine [9].....  | 29 |
| Tablica 3. | Raspodjela životnog vijeka prema [9].....  | 30 |
| Tablica 4. | Dopuštene temperaturne razlike $\Delta T_j$ za simetrične cikluse opterećenja [9].....   | 32 |
| Tablica 5. | Gornja granica dopuštene pozitivne temperaturne razlike $\Delta T_j^+$ [9].....          | 33 |
| Tablica 6. | Gornja granica dopuštenih naprezanja za temperaturnu razliku $\Delta T_j^+$ .....        | 34 |
| Tablica 7. | Geometrijske i fizikalne karakteristike debelostijenih komponenti.....                   | 76 |
| Tablica 8. | Procijenjene vrijednosti dopuštenih razlika temperatura tijekom varijabilnog pogona..... | 77 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka              | Jedinica     | Opis   |
|---------------------|--------------|--|
| $A$                 | $m^2$        | površina izmjene topline                               |
| $c$                 | $J/kgK$      | specifični toplinski kapacitet                         |
| $d$                 | $mm$         | promjer  |
| $d_u$               | $mm$         | unutarnji promjer                                      |
| $D$                 | $kg/s$       | maseni protok vodene pare                              |
| $E$                 | $N/m^2$      | modul elastičnosti materijala                          |
| $e$                 | $mm$         | debljina stjenke materijala plašta                     |
| $G$                 | $kg/s$       | maseni protok goriva                                   |
| $j$                 | -            | tip pokretanja turbine (1. vrući, 2. topli, 3. hladni) |
| $k_c$               | -            | faktor koncentracije toplinskih naprezanja             |
| $L$                 | $m$          | duljina  |
| $N$                 | -            | broj (pokretanja / upuštanja u pogon / ciklusa)        |
| $p$                 | $Pa$         | tlak   |
| $P$                 | $W$          | snaga  |
| $r$                 | $m$          | polumjer   |
| $t$                 | $s$          | vrijeme  |
| $T$                 | $K$          | temperatura  |
| $V$                 | $m^3$        | volumen  |
| $x$                 | -            | udio u ukupnom životnom vijeku komponente              |
| $\alpha$            | $W/m^2K$     | koeficijent prijelaza topline                          |
| $\beta$             | $1/^\circ C$ | koeficijent linearnog istezanja                        |
| $\Delta\vartheta_w$ | $K$          | razlika temperature stjenke                            |
| $\delta$            | $m$          | debljina stjenke                                       |
| $\lambda$           | $W/mK$       | koeficijent toplinske provodnosti                      |
| $\nu$               | -            | Poissonov koeficijent                                  |
| $\rho$              | $kg/m^3$     | gustoća  |
| $\sigma_m$          | $Pa$         | naprezanje u materijalu                                |
| $\sigma_p$          | $Pa$         | tlačno naprezanje                                      |
| $\sigma_g$          | $Pa$         | toplinsko naprezanje                                   |

## POPIS INDEKSA

| Oznaka     | Opis                  |
|------------|-----------------------|
| $a$        | amplituda             |
| $el$       | električna            |
| $dop$      | dopušteno             |
| $m$        | srednja vrijednost    |
| $min, max$ | minimalno, maksimalno |
| $red$      | reducirano            |
| $S$        | površina              |
| $T$        | turbina               |
| $z$        | zaliha                |
| $\varphi$  | radijalno             |

## **POPIS KRATICA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Opis</b>   |
|---------------|---|
| <i>EES</i>    | elektroenergetski sustav                                |
| <i>LCF</i>    | niskociklički zamor materijala (eng. Low Cycle Fatigue) |
| <i>TE</i>     | termoenergetski (blok)                                  |
| <i>VT</i>     | visokotlačna turbina                                    |
| <i>ST</i>     | srednjetlačna turbina                                   |
| <i>NT</i>     | niskotlačna turbina                                     |

## SAŽETAK

U vremenu tranzicije s fosilnih na obnovljive izvore energije javio se problem uravnoteženja frekvencije mreže zbog intermitentnosti obnovljivih izvora energije. Striktne EU pravila glede smanjenja emisija stakleničkih plinova, kao i povećanje udjela obnovljivih izvora energije vode k nestajanju baznog režima rada. Iz toga razloga TE blokovi sve više pronalaze svoju ulogu na tržištu pomoćne energije u regulaciji frekvencije mreže.

Za potrebe rada razrađen je pojednostavljeni matematički model TE bloka proširen jednodimenzijskim modelom provođenja topline u kućištu i rotoru turbine. Napravljen je matematički model nadređenog sustava regulacije i vođenja bloka, te su definirani struktura i parametri koji ograničavaju brzine promjene opterećenja bloka. Na modelu TE bloka i pripadajućeg sustava regulacije izvedene su simulacije pokretanja i promjene opterećenja bloka.

U radu je ispitivan varijabilni pogon TE bloka i njegov utjecaj na naprezanja u debelostijenim komponentama turbine - kućištu i rotoru. Razmatrane su aktualne izvedbe i djelovanje modela za nadzor turbinskih naprezanja koji daje približnu sliku stvarnog stanja naprezanja u debelostijenim komponentama. Uspoređene su prednosti i nedostaci pogona s konstantnim i modificiranim kliznim tlakom, te je procijenjen utjecaj promjena opterećenja na pogonsku raspoloživost termoenergetskog bloka.

**Ključne riječi:** termoenergetski blok, parna turbina, debelostijene komponente, ograničenje brzine promjene opterećenja, varijabilni pogon, procjena naprezanja, pogon s konstantnim tlakom, pogon s modificiranim kliznim tlakom, simulacija pokretanja i promjene opterećenja turbine

## 1. UVOD

Europska Unija zalaže se za smanjenje emisije stakleničkih plinova do 2050. godine za 80-95% u odnosu na 1990 [12]. U vremenima tranzicije s fosilnih na obnovljive izvore energije javio se problem uravnoteženja frekvencije mreže zbog intermitentnosti obnovljivih izvora energije. Striktne EU pravila glede smanjenja emisija stakleničkih plinova kao i povećanje udjela obnovljivih izvora energije ukidaju bazni režim rada, te se od blokova očekuje da sudjeluju na tržištu pomoćne energije u regulaciji frekvencije mreže.

Korjenite promjene, kako u energetske politici, tako i u tržišnoj utakmici, zahtijevaju i mnogo fleksibilniji rad termoelektrana. Novi zahtjevi na blokove podrazumijevaju povećanje dosadašnjih brzina promjena opterećenja, kao i smanjenje vremena pokretanja u pogon.

Parne turbine, s njihovim masivnim rotorima i kućištima, su uvijek bile podložne oštećenjima proizašlima iz varijabilnog pogona, te se stoga nisu niti projektirale za takav režim rada. Do sada su radile u EES-u u baznom režimu rada, no s novim trendovima došli su i novi, u ovom slučaju nepovoljniji, uvjeti rada. Promjenjivo opterećenje uzrokuje zamor materijala i na koncu oštećenja najvrjednijih komponenti termoenergetskog bloka odnosno turbine.

Postoje dva glavna režima rada parne turbine: stacionarni i prijelazni režim rada. Potonji se odnosi na promjenjive uvjete rada turbine kada se mnoge procesne varijable mijenjaju u vremenu. Ta faza je dakako nužna u radu turbine kako bi se postiglo novo željeno stacionarno stanje. Najzanimljiviji prijelazni režim rada je faza pokretanja turbine (eng. *start-up*). U tom režimu turbina je izložena velikim toplinskim naprezanjima koja smanjuju životni vijek turbine. Osim toga, ukoliko parametri procesa nisu precizno regulirani, aksijalni pomaci koji nastaju uslijed toplinskih dilatacija kod varijabilnog pogona mogu biti dovoljno veliki da dođe do kontakta između stacionarnih i rotirajućih dijelova turbine što pak može uzrokovati skupe kvarove [3].

Poznata je činjenica da će turbina biti u stanju startati čim prije što joj je viša srednja temperatura debelostijenih komponenti. Kako bi se spriječilo prekoračenje toplinskih naprezanja u fazi pokretanja, proizvođači opreme definirali su krivulje pokretanja pri kojima turbina neće doći u područje nedopuštenih naprezanja. U vremenima kada su krivulje nastajale naglasak je bio na sigurnosti, dok brzina promjene snage nije bila od većeg interesa, jer su turbine bile namijenjene za jednostavnije režime rada. Danas se te gradijente želi povećati kako na novim, tako i na starim turbinama, i to na način da se turbinu izloži gradijentu temperatura s kojim se neće prijeći dopuštena naprezanja u materijalima bloka. Na

taj način se sprječavaju temperaturni šokovi jer je poželjno da temperatura debelostijenog materijala turbine bude u definiranom temperaturnom rasponu različita od temperature svježeg pare tijekom prijelaznih pojava. Osim toga povećava se fleksibilnost elektrane jer tada može brže reagirati na povećani ili smanjeni zahtjev za električnom energijom.

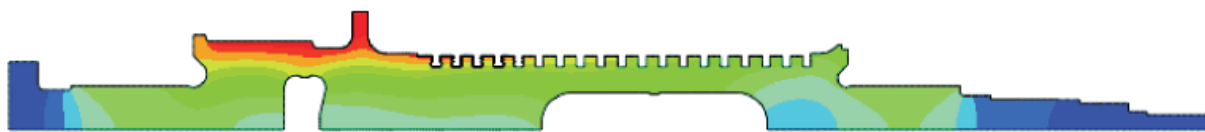
Nadzor i upravljanje toplinskim naprezanjima postao je neizostavni dio regulacijskog sustava termoenergetskog bloka. Da bi se ostvarili povoljni uvjeti za fleksibilan rad potrebno je poznavati geometrijske karakteristike i fizikalna svojstva materijala turbine. S obzirom da su promjene opterećenja turbine temperaturno zavisna neophodno je stoga provesti detaljna istraživanja kako bi se ispitalo i poboljšao fleksibilni pogon kako postojećih, tako i budućih generacija parnih turbina.

## 2. POTENCIJALNE ŠTETE PROUZROKOVANE VARIJABILNIM POGONOM

### 2.1. Specifične pojave uslijed varijabilnog pogona bloka

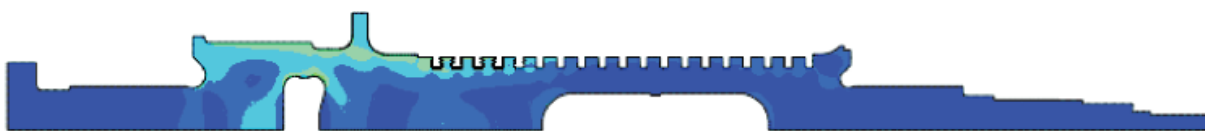
Progrijavanjem materijala turbine, posebice onog debelostijenog, toplina se odvodi nekom konačnom brzinom od površine na kojoj se nalazi para kao izvor topline prema drugoj, hladnijoj strani. Slojevi materijala koji imaju višu temperaturu imaju i tendenciju širenja dok je s druge strane njihovo širenje onemogućeno slojem materijala koji se nalazi na nižoj temperaturi, što je ujedno i uzrok pojave toplinskih naprezanja. Nakon što se materijal progrije i poprimi približno istu temperaturu kao i para, toplinska naprezanja u materijalu iščezavaju.

Kod prijelaznih pojava primjerice, rotor ima znatno višu temperaturu na površini nego u središtu zbog čega dolazi do tlačnih naprezanja na površini rotora odnosno vlačnih u centru rotora.



**Slika 1. Temperaturno polje unutar rotora tijekom progrijavanja turbine [11]**

Kao što se može vidjeti sa slike 1, najviše toplinski opterećeno područje nalazi se prije prvog stupnja turbine, te kod utora za lopatice. Zato se prilikom analize toplinskih naprezanja u rotoru i/ili kućištu treba osvrnuti samo na kritični presjek koji se nalazi u tome području. Ukoliko se u tom području osigura rad bez prekoračenja dopuštenih naprezanja može se očekivati pouzdan rad turbine. Na slici 2 prikazano je polje naprezanja za temperaturno polje prikazano na slici 1.



**Slika 2. Polje naprezanja unutar rotora tijekom progrijavanja turbine [11]**

Nakon prethodno iznesenih činjenica nastojati će se kroz detaljniji opis problematike pokušati pristupiti problemu fleksibilnog vođenja pogona bloka. U takvom režimu rada nastoji se dobiti što brže odzive bloka uz paralelni nadzor turbinskih naprezanja.

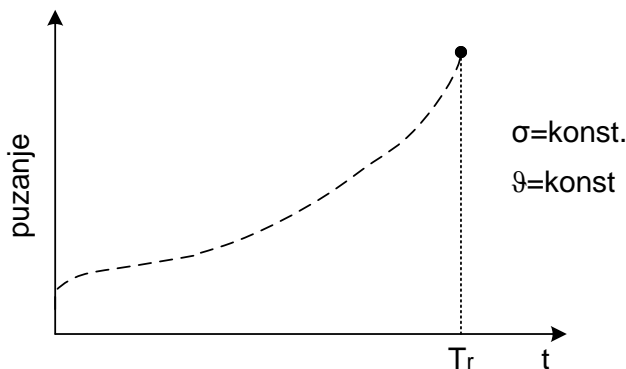


## 2.2. Puzanje i zamor materijala

Kada se govori o potencijalnim štetama prouzrokovanim fleksibilnim pogonom TE bloka u prvi plan se stavljaju visoko temperaturno i tlačno opterećene komponente postrojenja, iako zapravo sve komponente postrojenja mogu biti zahvaćene ovim problemom. Ostali dijelovi postrojenja će vrlo vjerojatno biti zahvaćeni na drugačije načine, primjerice smanjenom efikasnošću ili korozijom. Korozija upotpunjena toplinskim naprezanjima intenzivno smanjuje životni vijek materijala. Stoga je, kako se navodi u [4], sustav za nadzor naprezanja i predviđanje preostalog životnog vijeka krucijalnih komponenti turbine postao od iznimne važnosti u sustavima vođenja fleksibilnih pogona.

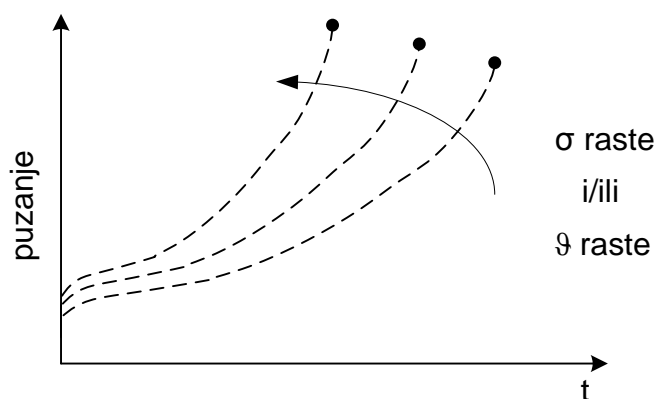
### 2.2.1. Puzanje materijala

Puzanje je vremenski ovisna, toplinski prouzrokovana deformacija komponente koja radi pod velikim naprezanjima. Krivulja puzanja pokazuje da je puzanje vremenski ovisan proces, koji se javlja nakon što se materijal u dužem periodu izloži konstantnom naprezanju  $\sigma_{op}$  na konstantnoj temperaturi  $T_{op}$ .  $T_r$  predstavlja ukupni životni vijek komponente.



Slika 3. Krivulja puzanja materijala

Nekada, dok su TE radile kao bazna postrojenja, puzanje materijala je bilo glavni način oštećenja visokotlačno opterećenih komponentata. U današnje vrijeme turbine više ne rade s konstantnim naprezanjima u pogonu kao niti s konstantnim temperaturama jer se one mijenjaju u skladu sa zadanim vrijednostima snage bloka. Stoga se danas puzanje odvija u kombinaciji s drugim nepoželjnim mehanizmima i kod fleksibilnog pogona postrojenja.



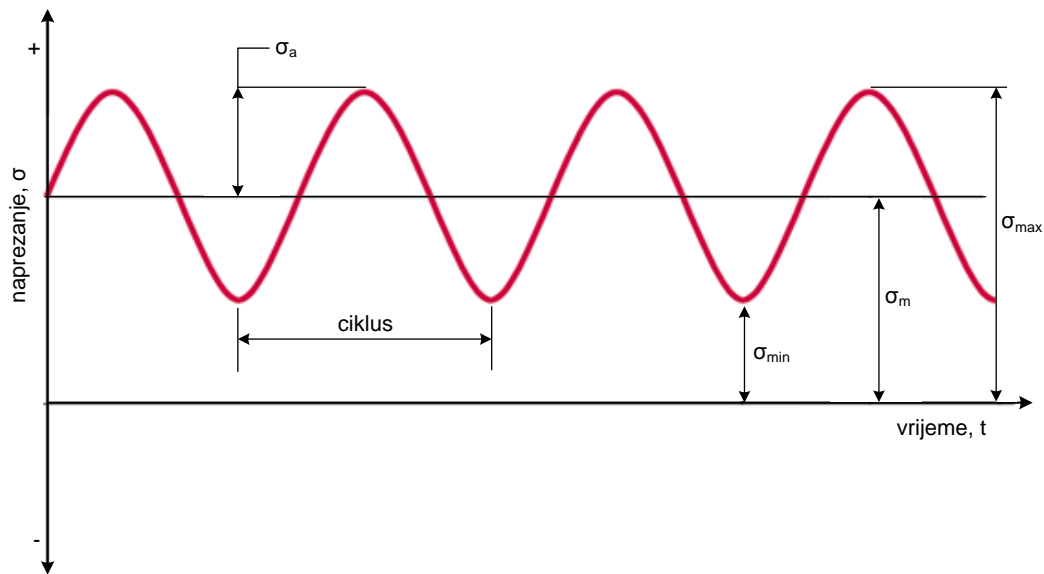
Slika 4. Pojava ubrzanog puzanja materijala

### 2.2.2. Zamor materijala

S druge strane, zamor također doprinosi oštećenju materijala, ali problem je što se i drugi nepovoljni procesi vežu na ovaj proces.

Glavni uzrok naglog oštećenja materijala koji se manifestira u laboratoriju prilikom simetrične promjene opterećenja je zamor. U energetske postrojenjima se zamor može pojaviti s drugim mehanizmima, kao što je primjerice djelomično puzanje i korozija.

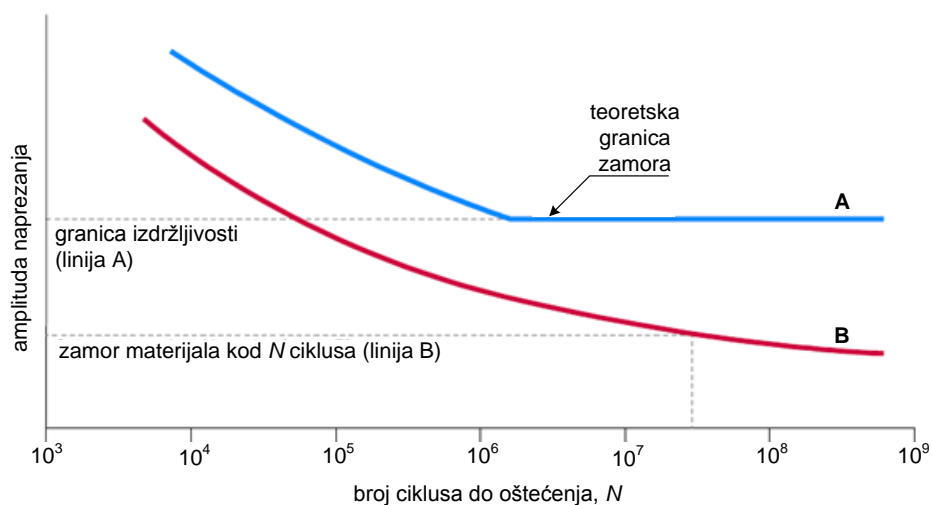
U stvarnosti takve pojave rezultiraju minijaturnim početnim pukotinama. Kako vrijeme odmiče, a naprezanja se ciklički izmjenjuju, pukotine postaju sve veće i veće. Kada veličina pukotine dosegne kritičnu veličinu dolazi do pucanja komponente i obustave rada postrojenja. Broj primijenjenih opterećenja s danim stupnjem cikličkog naprezanja kojemu je kritična komponenta podvrgnuta poznat je pod nazivom životni vijek komponente. Kao što je već spomenuto, može biti uzrokovan brojnim faktorima. Primjerice: zbog materijala gradnje, temperature radnog medija, kemijske okoline, te već spomenute debljine stjenki. Zamor je klasificiran ili kao visokociklički zamor s malom amplitudom, gdje je broj cikličkih opterećenja do nastanka oštećenja velik, ili niskociklički zamor, gdje je broj cikličkih opterećenja do nastanka oštećenja mali. Visokociklički zamor je karakteriziran malom amplitudom, visokom frekvencijom, elastičnim (obnovljivim) naprezanjima, dok niskociklički zamor karakterizira visoka amplituda, niska frekvencija, te plastično (neobnovljivo) naprezanje [4].



**Slika 5. Ispitivanje životnog vijeka ciklički opterećenog materijala [4]**

Materijali na kojima se ispituje vijek trajanja koriste standardne uzorke koji bivaju podvrgnuti cikličkim naprezanjima s različitim amplitudama sve dok ne dođe do njihovog oštećenja. Svako ispitivanje provodi se s drugačijom amplitudom, a broj ciklusa do oštećenja se dokumentira. Cikličko opterećenje je prikazano na slici ispod, gdje su  $\sigma_a$  amplituda naprezanja,  $\sigma_{max}$  maksimalno,  $\sigma_{min}$  minimalno i  $\sigma_m$  srednje naprezanje.

Nakon testiranja se podaci o naprezanjima  $\sigma$  prikazuju u grafu u ovisnosti o broju ciklusa  $N$ , poznatom kao  $\sigma$ - $N$  krivulja. Za očekivati je da što će biti veća amplituda naprezanja, da će biti manji životni vijek uzorka. Kako se naprezanje materijala ciklički pojavljuje, tako se malo pomalo pojavljuju i pukotine u materijalu koje ne mogu nestati, već kumulativno povećavati oštećenje materijala.



**Slika 6. Tipična  $\sigma$ - $N$  krivulja za dva različita materijala [4]**

Kao što se može vidjeti na Slika 6, također postoji iznos naprezanja ispod kojeg se zamor neće manifestirati, bez obzira na broj ciklusa naprezanja. Taj iznos je poznat kao granica izdržljivosti ili granica zamora materijala, te je na Slika 6 prikazana za materijal A.

Čelici, koji su posebno zanimljivi u ovom radu, imaju veću granicu izdržljivosti, ali nažalost ne postoji donja granica za korozijski zamor, mehanizam oštećivanja koji se opisuje kao dominantan uzrok oštećivanja ugljenom loženih postrojenja koja rade u fleksibilnom pogonu [4].

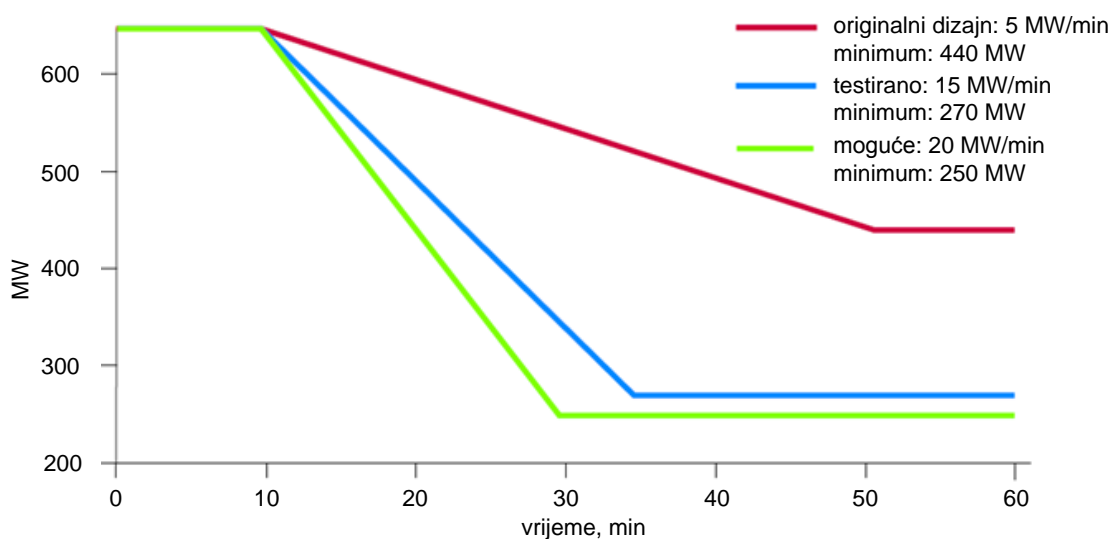
Kod postrojenja koja već dugu niz godina rade u fleksibilnom pogonu, preostali životni vijek (usko povezan sa zamorom) komponenti je adekvatno proračunat na način da se uzmu u obzir različiti tipovi naprezanja koje se mogu pojaviti u pogonu. Međutim, za metale koji su zavarivani ili su već izloženi djelovanjima korozije i puzanja,  $\sigma-N$  krivulja s predviđenim životnim vijekom možda neće biti toliko pouzdana.

Toplinska naprezanja, prouzrokovana temperaturnim razlikama, uzrokuju pukotine i na koncu oštećenja brojnih komponenata postrojenja od kolektora pregrijača pare do turbinskih lopatica i ventila, dok su u fokusu ovoga rada isključivo debelostijene komponente turbine - rotor i kućište turbine. Dakle, glavni problem kod promjene opterećenja je toplinsko naprezanje u materijalu koje se javlja u varijabilnom pogonu tijekom promjene režima rada turbine. Ono predstavlja i glavno ograničenje glede fleksibilnosti termoenergetskih blokova.

### 3. SUVREMENA RJEŠENJA ZA POVEĆANJE FLEKSIBILNOSTI PARNIH TURBINA

#### 3.1. Sustavi upravljanja generatorom pare

Ukoliko žele ostati konkurentni na tržištu vlasnici TE blokova moraju mijenjati upravljačke sustave u starim postrojenjima kako bi im se povećala efikasnost i fleksibilnost. Na slici 7 prikazana su poboljšanja kroz budući predviđeni minimalni iznos opterećenja generatora pare s pratećim ostvarivim gradijentom smanjenja snage, a odnosi se na ugljenom loženi blok snage 600 MW [4].

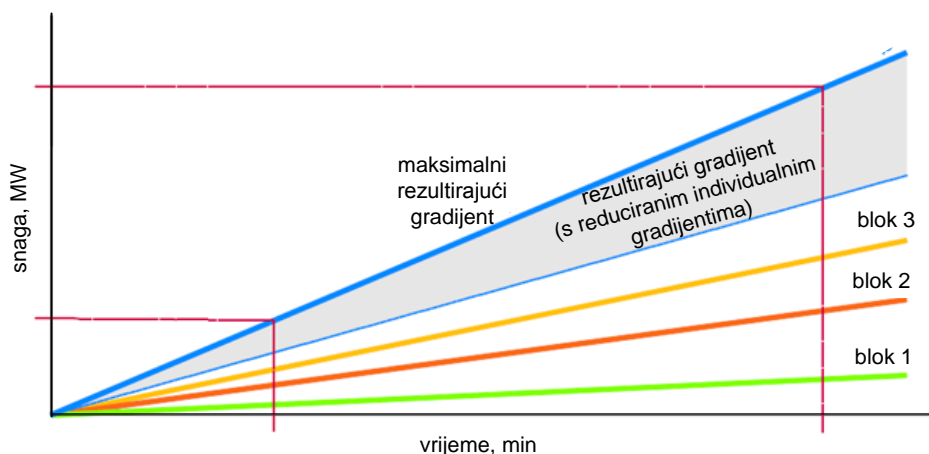


**Slika 7. Primjer poboljšanja na TE bloku nakon promjene upravljačkog sustava [4]**

Konvencionalne sheme upravljanja su projektirane na način da osiguraju odgovorno upravljanje unutar dozvoljenih radnih granica same jedinice. Međutim, na niskom opterećenju to se dosta reflektira na generator pare i vodeno-parni trakt koji su pod velikim utjecajem ovog sustava. Nadalje, konvencionalni sustavi nisu u stanju uzeti u obzir promjene kao primjerice one koje nastupaju sa starošću postrojenja. U tom slučaju, proces se mijenja zbog čega dolazi do čestog aktiviranja regulacije. Moderni sustavi regulacije prelaze ova ograničenja.

Primjerice, prema [4], razvijeni su napredni sustavi za upravljanje glavnog tlaka pare koji funkcionira putem namještanja protoka goriva. Tom metodom se omogućilo 50% brže upuštanje u pogon, te se postiglo stabilizaciju nestabilnih upravljačkih krugova koji više ne zahtijevaju korištenje turbine za stabilizaciju tlaka pare. Kao rezultat toga, električna snaga

prati stvarne potrebe prema dodijeljenoj postavnoj točki s veoma visokom preciznošću, te je time izbjegnuto dinamičko praćenje tlaka u slučajevima promjene snage ili frekvencije.



**Slika 8. Dobivanje većih gradijenata kombiniranim radom više TE blokova [4]**

U radu [4] je pokazano također da moderna regulacija može kombinirati više jedinica za postizanje većih gradijenata držeći pritom dostupnost i sigurnost samog postrojenja na maksimumu. Očekuje se da će se s dodatnim razvojem i nadogradnjom TE blokova poboljšati dostupnost blokova na minimalnim opterećenjima, primjerice, kroz dodatni nadzor i upravljanje izgaranjem.

### 3.2. Smanjivanje napreznja tijekom pokretanja

Što je start hladniji, tj. što je veća razlika između temperature pare i srednje integralne temperatura debelostijenih komponenti, doći će do induciranja većih napreznja. Brzi porasti temperatura moraju biti održavani na onoj razini na kojoj dizajnirane komponente mogu podnijeti nametnute gradijente povećanja snage.

Jedan od najvažnijih zahtjeva koji se tiču turbinskih fleksibilnosti je da se tijekom faze pokretanja održe konstanti razmaci između stacionarnih i rotirajućih dijelova kako ne bi došlo do havarije turbine.

Zaobilazni cjevovodi, tzv. *bypassi* su neophodni u blokovima konstruiranim za varijabilni pogon. Oni omogućavaju preusmjerenje svog ili dijela protoka pare u VT odnosno NT dio turbine kako bi se protok pare prilagodio generatoru pare koji se učestalo pali i gasi. Također, na ovaj način se mogu smanjiti turbinska napreznja.

Kod blokova s nadkritičnim parametrima pare nužna je uporaba debelostijenih komponenti kako bi se osigurala dovoljna čvrstoća. Nažalost, da bi se spriječilo puzanje materijala moraju se spuštati temperature na razumljive razine čime se utječe na ukupnu termodinamičku

iskoristivost procesa. To znači da se unutarnje strane vanjskog kućišta hladi parom koja je 30-40°C niža nego temperatura unutarnjeg kućišta na svakom presjeku duž turbine. Para struji radijalno kroz rupe na unutarnjem kućištu turbine. Na taj način para reducira pojave ekstremnih temperatura u vanjskom kućištu i dozvoljava smanjenje njegove debljine. Time se i vrijeme hladnog starta smanjilo za gotovo 50%. [4]

### 3.3. Praćenje opterećenja pomoću kliznog tlaka

Kada su ventili blago prigušeni dio mase pare se akumulira u parovodima uslijed čega i tlak raste. Otvaranjem glavnih parnih ventila do kraja ostvaruje se dodatni protok kroz turbinu čime se brzo može proizvesti dodatna energija na račun akumulativnosti bloka. Iz toga se razloga prigušivanje koristi kako bi se držalo tlak konstantnim.

S druge strane, režim s kliznim tlakom podrazumijeva potpunu otvorenost glavnih parnih ventila u cijelom radnom području zbog čega se ne može iskorištavati akumulativnost bloka. Međutim klizni tlak je postao učestao način vođenja pogona bloka, posebice u modernim nadkritičnim blokovima. Kritično ograničenje kod brzine promjene opterećenje je dopuštena razlika temperatura pare i turbinskog metala. Brže promjene izlaznih varijabli mogu se postići koristeći prirodni ili modificirani klizni tlak. Prirodni klizni tlak također nudi prednost u odnosu na prigušivanje tijekom pokretanja jer ranije počinje tok kroz turbinu. Zbog toga je i manja potrošnja goriva jer je potreban manji unos topline [4].

Ovakvo vođenje je dobro za ukupnu iskoristivost postrojenja. Naprezanja u turbinskim ventilima i debelostijenim materijalima se smanjuju, a pumpe napojne vode troše manje energije za rad.

U praksi se ipak koristi određeni stupanj prigušenja kako bi se osigurale rezerve pare za trenutke kada će biti potrebno naglo povećati kapacitet postrojenja.

### 3.4. Brzi odziv kod regulacije frekvencije na tržištu pomoćnih usluga

Jedna od usluga na tržištu električne energije je i regulacija frekvencije mreže:

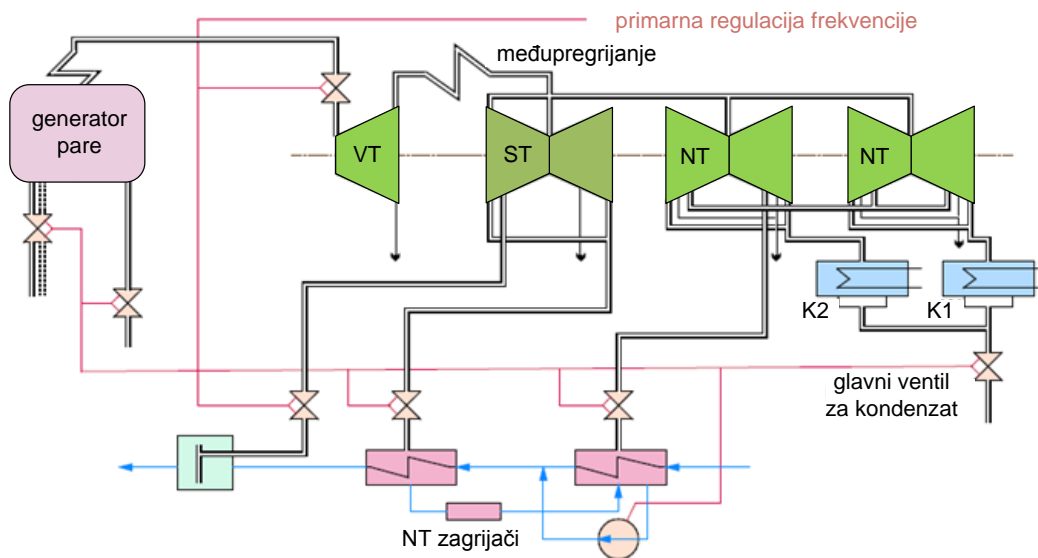
- *primarna*: promjena snage izvora djelovanjem regulatora brzine vrtnje agregata (ili njemu ekvivalentnim djelovanjem);
- *sekundarna*: promjena snage izvora po nalogu dispečera - dnevni dijagram opterećenja + signali iz mrežnog regulatora (ili nalozi dispečera);
- *tercijarna*: pokretanje u pogon i obustava pogona pojedinih izvora po nalogu dispečera [5].

Mnogi blokovi na ugljen su već uključeni u tržište pomoćnih usluga, te mogu osigurati veoma brza povećanja snage od 5% do 10% unutar 30-ak sekundi. S druge strane postoje blokovi koji su primarno konstruirani kako bi osiguravali sekundarnu regulaciju frekvencije. Sporiji odziv potonjih vrši „pritisak“ na blokove za primarnu regulaciju jer moraju u svakom trenutku biti spremni osigurati odgovarajuće povećanje snage.

Metode koje se danas koriste su već spomenuta dobro prihvaćena metoda prigušivanja glavnih parnih ventila, kondenzat-stop, te zaobilaznje zagrijača napojne vode i uporaba VT zaobilaznih cjevovoda. Alternativna metoda je i instalacija spremnika topline koji također može osigurati brže odzive [4].

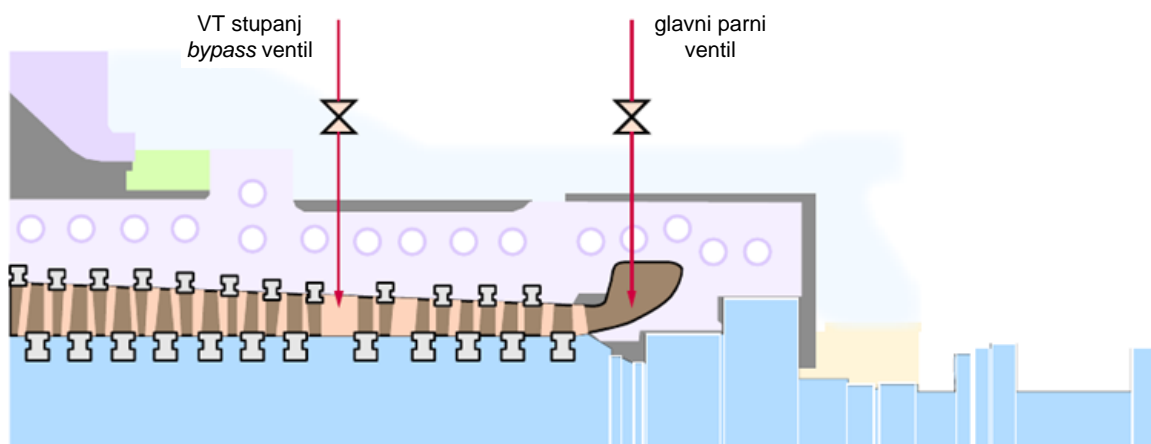
Slika 9 prikazuje kondenzat-stop metodu. Ovom metodom nastoji se iskoristiti rezervni kapacitet generatora pare (na isti način kao kod konvencionalnog prigušivanja u režimu s konstantnim tlakom, bez korištenja kondenzat-stop). Tok kondenzata prema NT zagrijačima napojne vode se smanjuje u istom trenutku kada se počne s prigušivanjem i preusmjeravanjem kondenzata pomoću glavnog ventila za kondenzat. Kondenzat se pohranjuje u sabirniku kondenzata ili nekom drugom posebnom spremniku, a preostala voda iz spremnika napojne vode koristi se za napajanje generatora pare. Ograničenja ove metode vođenja su raspoloživi kapaciteti napojnog i spremnika hladnog kondenzata. Ovom metodom se smanjuju i oduzimanja pare prema NT zagrijačima napojne vode i otplinjaču. Takvi postupci omogućuju dodatni protok pare kroz turbinu generirajući dodatnu mehaničku snagu u turbini. Ovim načinom povećanja snage neće se drastično promijeniti temperatura napojne vode tako da je ova metoda manje invazivna za debelostijene komponente čitavog bloka. Vrijeme odziva moguće je stoga dobro optimizirati i manje-više ovisi samo o brzini djelovanja izvršnih ventila. Vođenje bloka s kondenzat stopom zahtjeva odgovarajuću opremljenost bloka regulacijskim uređajima i točno upravljanje svim izvršnim elementima uključenima u proces. Maksimum snage moguće je postići već nakon 30-ak sekundi.





**Slika 9. Kondenzat-stop metoda za postizanje brzih odziva [4]**

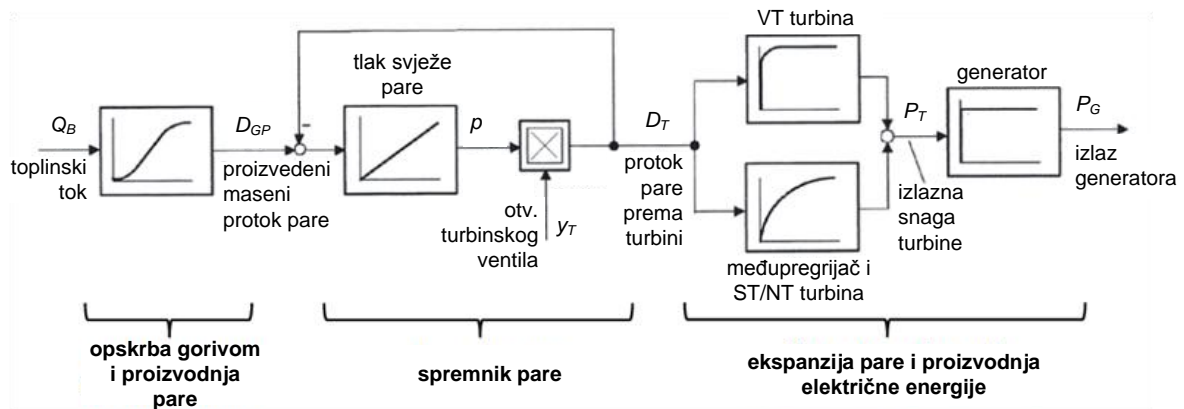
Još jedan od načina kako postići veoma brzi odziv je da se superkritične turbine na VT stupnju opreme s *bypass* ventilom. Ova metoda prikazana je na Slika 10. Na taj način omogućuje se dodatno propuštanje pare nekoliko stupnjeva nakon prvog stupnja, gdje se nalazi *bypass*, poslije njegovog otvaranja. Povećanje snage se odvija jako brzo, 1% u sekundi. Prednost ove metode je što nema prigušivanja niti na 100%-tnom opterećenju, tj. kada je *bypass* zatvoren. On se otvara samo kad je potrebno kratkotrajno dati povećanje snage od 5% do 10% nauštrb pada ukupne iskoristivosti bloka, iako to nije toliko bitno u trenutku kada postoji povećani zahtjev za električnom energijom. Ova metoda se može koristiti na svim razinama opterećenja turbine.



**Slika 10. Bypass ventil VT stupnja za veoma brze odzive**

## 4. POJEDNOSTAVLJENI MATEMATIČKI MODEL TERMOENERGETSKOG BLOKA

Model TE bloka napravljen je prema standardnoj shemi koja se koristi u simulacijama analize ponašanja EES-a u cjelini. Radi se o aproksimativnom linearnom modelu dinamike čiji su parametri ugođeni na temelju rezultata mjerenja odziva snage bloka i tlaka svježe pare na karakteristične poremećaje: skokovitu promjenu otvorenosti turbinskih ventila i skokovitu promjenu protoka goriva, zraka i napojne vode, kako je to opisano u [2]. Odzivi takvog modela predstavljaju otklone od stacionarnog stanja i mogu se izraziti u postocima reguliranih veličina.

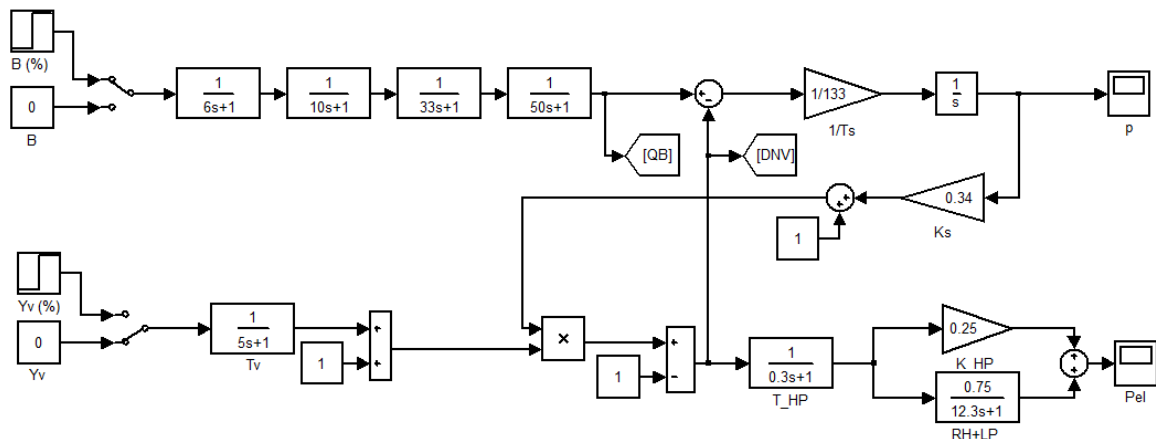


Slika 11. Prikaz dinamičkih odnosa u TE bloku [8]

Kako se navodi u izvoru [8] dinamičko ponašanje TE bloka može se podijeliti u tri podskupine:

- **opskrba gorivom i proizvodnja pare:** ulazna varijabla u ovom procesu je toplinski tok, a izlazna varijabla je proizvedeni maseni tok vodene pare. Toplinski tok je neophodan za isparavanje napojne vode i proizvodnju vodene pare, a dobiven je izgaranjem fosilnih goriva. Podproces opskrbe gorivom i proizvodnja pare zahtjeva dodatne podprocese kao što su dobava goriva i rad mlinova za ugljen, te procese oslobađanja i prijelaza topline, kao i isparavanja napojne vode, te pregrijavanja proizvedene pare. Iz tog razloga promjene u dobavi goriva utječu na cjelokupni proces proizvodnje pare s određenim vremenskim kašnjenjem specifičnim za svaki TE blok. Zato je prijenosna funkcija opskrbe gorivom i proizvodnje pare modelirana sa serijski spojenim PT1 članovima koji predstavljaju kašnjenje višeg reda.

- **spremnik pare:** ulazne varijable u ovaj podproces su proizvedeni maseni protok pare i otvorenost turbinskog ventila. Izlazne varijable su maseni protok pare kroz turbinu i tlak svježe pare u sustavu. Kako je već prethodno napomenuto, cijevna masa u TE bloku predstavlja spremnik mase i energije. Akumulacija mase pare u cjevovodima bloka je modelirana s integratorom čiji je volumen modeliran s vremenskom konstantom  $T_S$ . Razlika između masenog protoka koji ulazi i onoga koji izlazi, a koji je pak funkcija otvorenosti ventila, predstavlja akumuliranu masu pare u sustavu odnosno tlak svježe pare. Istovremeno tlak svježe pare i otvorenost ventila određuju maseni protok kroz turbinu.
- **ekspanzija pare i proizvodnja električne energije:** Tijekom procesa ekspanzije pare i proizvodnje električne energije toplinska snaga se pretvara u električnu snagu. Taj proces uključuje komponente kao što su VT turbina, međupregrijač pare, ST i NT turbinu, i generator. Vremenski odziv turbine i generatora je zanemariv u odnosu na odziv generatora pare. Istovremeno, pregrijač pare i pripadajući cjevovodi predstavljaju dodatni spremnik mase pare te su modelirani s dodatnim PT1 članom kao što je prikazano na slici 12.

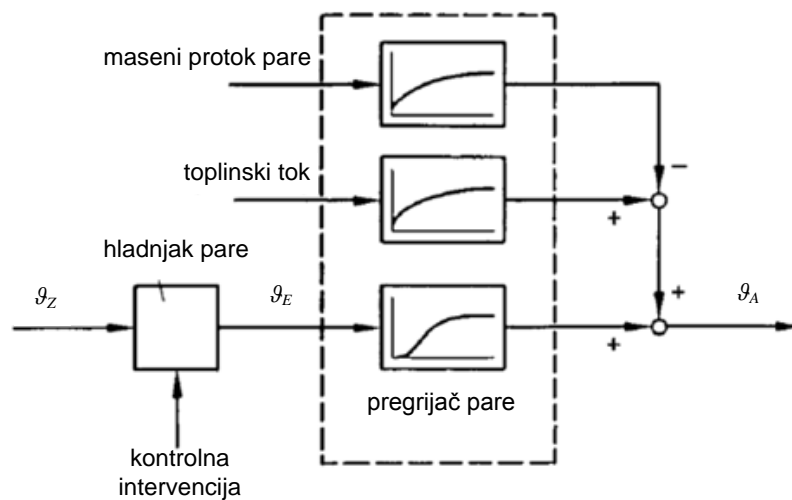


Slika 12. Pojednostavljeni matematički model TE bloka

Nakon što je razrađen pojednostavljeni model koji reproducira akumulativnost bloka odnosno vezu između promjene tlaka i snage u ovisnosti o otvorenosti ventila i dotoku goriva, neophodno je bilo model proširiti s linearnim modelom isparivača i pregrijača pare. Ovim proširenjem se nastojalo dobiti mogućnost prikaza promjene temperature u navedenim komponentama bloka u okolini stacionarnog stanja kako bi se kasnije moglo simulirati promjenu naprezanja turbinskih materijala uslijed promjene opterećenja bloka u prijelaznim režimima rada.

Za potrebe modeliranja dinamike regulacije temperature pare osmišljen je linearizirani model isparivača i pregrijača pare.

Prema smjernici VDI/VDE 3503 prema izvoru [8] blok dijagram izgleda kao na slici 13.



**Slika 13. Blok dijagram dinamike regulacije temperature svježeg pare [8]**

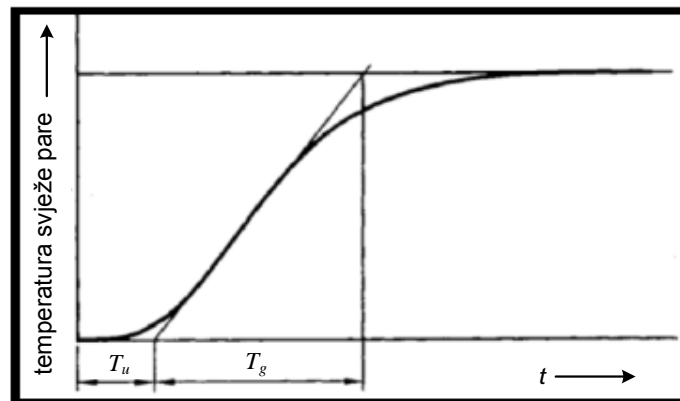
Ulazne varijable koje utječu na upravljanje isparivačem i pregrijačem (kao i međupregrijačem) su:

- **Toplinski tok.** Toplinski tok je poremećajna varijabla i dolazi u pregrijač duž cijele izmjenjivačke površine. U nekim izvedbama može biti reguliran s recirkulacijom ili rotirajućim plamenicima. Njegov utjecaj na kontroliranu varijablu modelira se kao vremensko kašnjenje prvog reda.
- **Maseni protok pare.** Maseni protok pare je još jedna poremećajna varijabla. Njegov utjecaj se modelira također kao kašnjenje prvog reda. U odnosu na toplinski tok jednostavno je mjerljiv te stoga može biti korišten kao poremećajna varijabla u unaprijednoj regulaciji smetnje kako bi se poboljšanje performanse upravljačkih krugova. Uobičajeno nije dostupan kao manipulirana varijabla.

- **Ulazna temperatura.** Temperatura pare koja ulazi u regulacijski sustav je još jedna poremećajna varijabla [8].

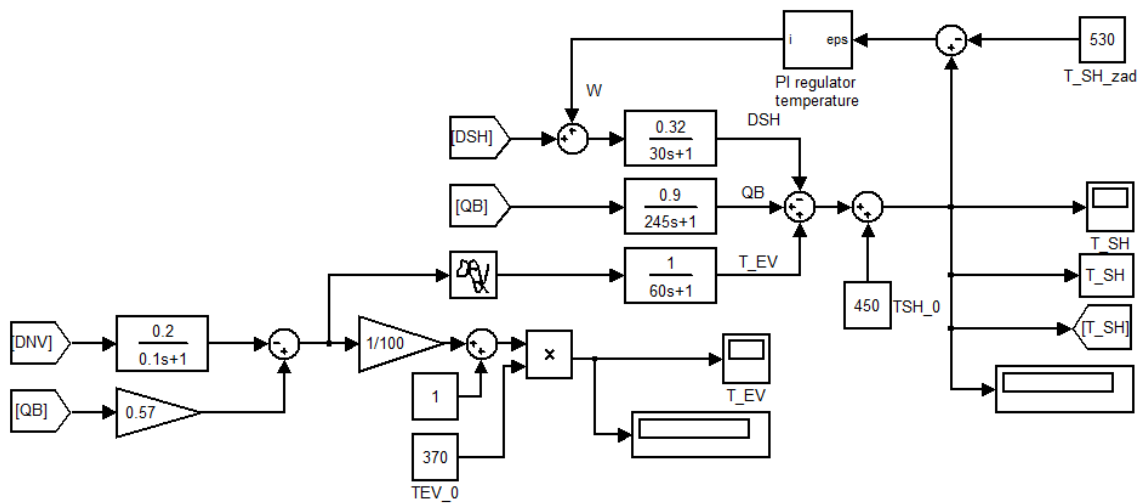
Prijenosna funkcija pregrijača predstavlja linearno kašnjenje višeg reda. Utvrđivanjem vremenske konstante i reda je tada dovoljno da se opiše regulacijski sustav.

Pregrijač pare moguće je opisati koristeći mrtvo vrijeme  $T_u$  i vrijeme balansiranja  $T_g$ . Omjer  $T_u/T_g$  ima fiksni omjer s obzirom na red prijenosne funkcije. Red prijenosne funkcije ostaje konstantan bez obzira radi li se o pogonu s konstantnim ili promjenjivim tlakom, dok se ekvivalentno mrtvo i balansno vrijeme povećavaju obrnuto proporcionalno masenom protoku pare. Visokotlačni pregrijači pare koji su vrlo dobro upravljivi imaju vremena kašnjenja od približno 50 sekundi s vrijednošću omjera  $T_u/T_g$  od približno 0.3 na punom opterećenju.



**Slika 14. Prijenosna funkcija pregrijača pare [8]**

Temeljem prethodno iznesenog teksta i raspoloživih dijagrama s odzivima stvarnih postrojenja gdje je regulacija bila uključena modeliralo se isparivač i pregrijač pare. Neki parametri su ručno ugođeni kako bi se što bolje opisala globalna dinamika odnosno promjena temperature pare na izlazu. Osim toga dodan je PI regulator na pregrijač pare u negativnoj povratnoj vezi. Matematički model isparivača i pregrijača pare prikazan je na slici dolje zajedno s pojednostavljenim matematičkim modelom TE bloka.



Slika 15. Matematički model isparivača i pregrijača pare

## 5. STRATEGIJE VOĐENJA TERMOENERGETSKOG BLOKA

Struktura izlaznih varijabli ovisi o vrsti pogona bloka. Strategije vođenja se međusobno razlikuju po rasporedu i načinu vođenja manipuliranih varijabli (masenom protoku goriva  $G$  i otvorenosti ventila  $y_T$ ) u odnosu na upravljane varijable, električnu snagu generatora,  $P_{el}$ .

Osim tehnološke opreme, na dinamičke performanse značajno utječe i način vođenja tehnološkog procesa. Postoje dva osnovna načina vođenja procesa u TE bloku:

- pogon s prirodnim kliznim tlakom svježe pare, i
- pogon s konstantnim tlakom svježe pare.

Oba principa temelje se na činjenici da je protok pare kroz turbinu proporcionalan tlaku pare ispred turbine i stupnju otvorenosti njenih regulacijskih ventila [1]. U tablici 1 može se vidjeti popis najčešćih strategija vođenja bloka.

**Tablica 1. Zadatak manipuliranih u odnosu na upravljane varijable [8]**

| Način rada       |                                  | Upravljana varijabla | Upravljana varijabla |
|------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Izvršna veličina | Tlak pare                        |                      |                      |
| turbina          | pogon s konstantnim tlakom       | $y_T$                | $P_{el}$             |
| turbina          | modificirani klizni tlak         | $y_T$                |                      |
| generator pare   | pogon s konstantnim tlakom       | $G$                  |                      |
| generator pare   | pogon s prirodnim kliznim tlakom | $G$                  |                      |

Primjenom različitih strategija vođenja bloka koje proizlaze iz upravljačke strukture utječe se na akumulaciju ili oslobađanje mase i energije u različitim dijelovima postrojenja uslijed promjene njegove snage. Kao što je već spomenuto, promjena snage se može mijenjati od strane pogonskog osoblja ili se automatski generirati u sustavu vođenja i regulacije na temelju mjerenja frekvencije mreže ili signala iz dispečerskog centra.

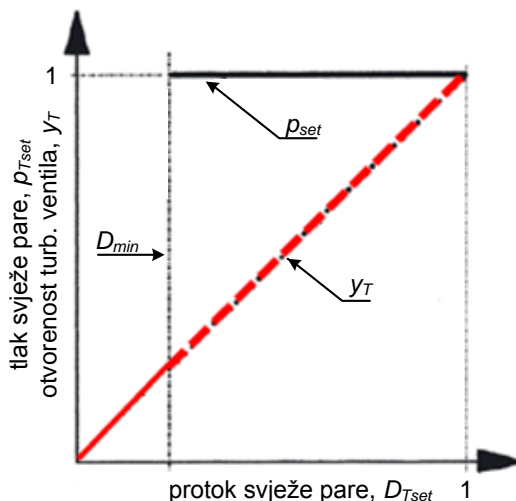
Valja napomenuti da jedino strategija vođenja bloka u režimu rada turbina vodi s pripadajućim modifikacijama osigurava dovoljno brze odzive snage na račun akumulativnosti bloka.

## 5.1. Strategija turbina vodi (kotao slijedi)

Ciljna vrijednost snage  $P_{cilj}$  u ovom slučaju dobiva se od strane mrežne kontrole ili biva ručno namještena, ovisno o vrsti usluge koju blok pruža na tržištu energije. U svakom slučaju, kod promjene opterećenja generirati će se dodatni signal  $\Delta P_{el}$  koji je proporcionalan devijaciji frekvencije odnosno zahtijevanoj promjeni snage i biti dodan na ulaz regulatora. Suma ta dva signala koja predstavlja zadanu snagu se provjerava u nadređenom sustavu regulacije, odnosno njegovim graničnicima, kako bi se osiguralo da novonastala suma ne prijeđe maksimalnu dopustivu snagu, kao i dopuštenu brzinu promjene procesnih varijabli u pogonu. Signal koji se dobiva na izlazu iz regulatora je zadanu vrijednost snage,  $P_{zad}$ . Taj signal obično kasni za signalom ciljne vrijednosti snage upravo zbog nadređenog sustava regulacije koji nastoji osigurati pouzdan rad bloka u varijabilnim režimima rada.

### 5.1.1. Pogon s konstantnim tlakom

Tijekom pogona s konstantnim tlakom, snaga  $P_{el}$  je upravljana otvaranjem turbinskog ventila  $y_T$ . Ovisno o devijacijama upravljačkog signala regulacijski sustav mijenja vrijednost otvorenosti ventila  $y_T$ . Zbog toga je u ovom načinu vođenja otvorenost ventila regulirana kao funkcija izlazne snage bloka. U slučaju kada je potrebna brza reakcija dolazi do brzog otvaranja turbinskih ventila uslijed čega se iskorištava akumulirana energija u kotlu



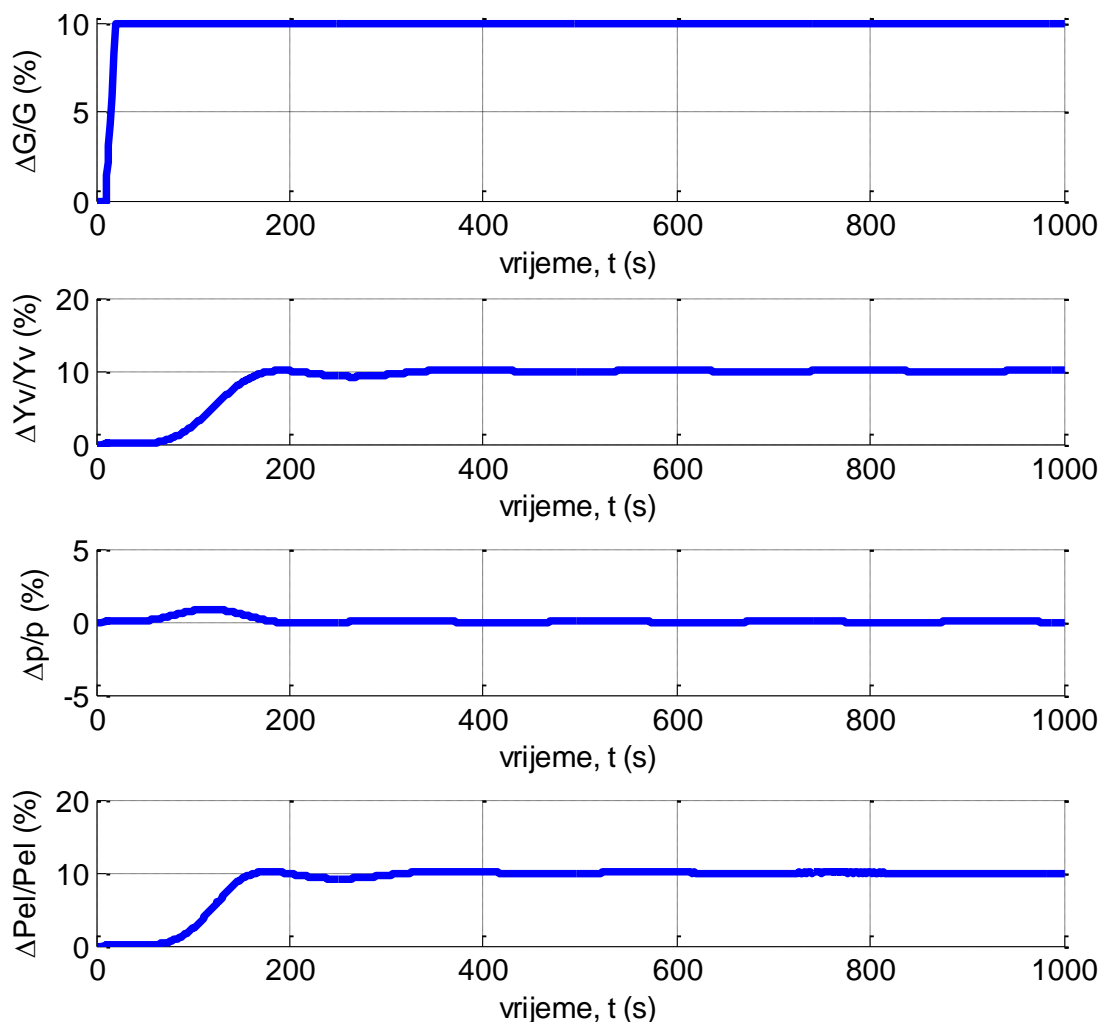
Slika 16. Karakteristika pogona s konstantnim tlakom [8]

U ovoj vrsti pogona gdje se upravlja samo ventilima događa se brzo povećanje masenog protoka pare na račun akumulativnosti bloka uslijed čega je moguće veoma precizno regulirati



snagu na izlazu. To međutim ovisi o samoj akumulativnosti bloka i obično se radi o kratkom periodu povećanja snage bloka.

Tipični oblik promjene tlaka pare kao i snage turboagregata na skokovito otvaranje turbinskih ventila uz držanje konstantnog dotoka goriva u ložište kotla prikazan je na slici 17.

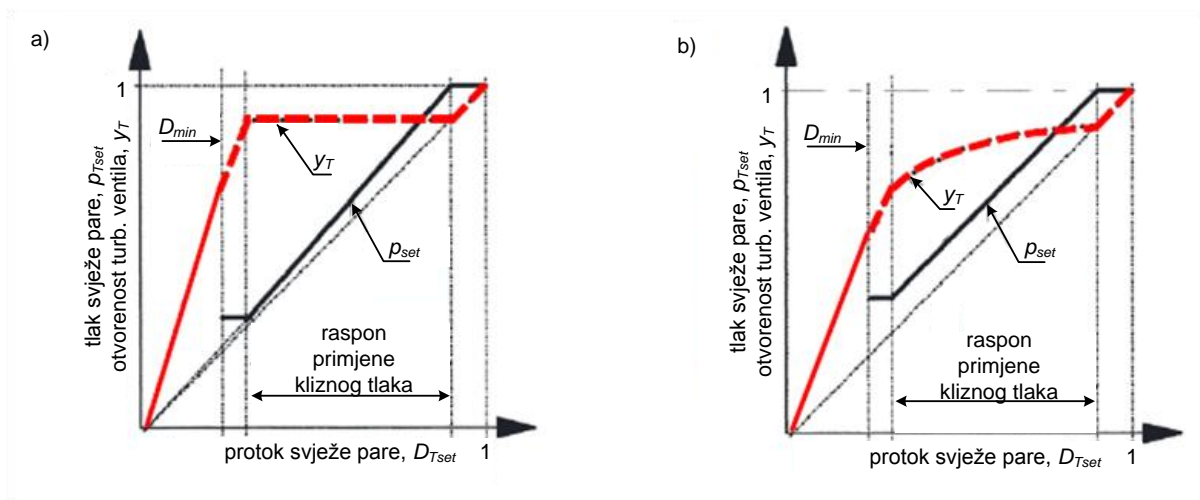


**Slika 17. Odziv bloka na skokovito otvaranje ventila u 10. sekundi**

Iz rezultata simulacije vidi se da se kod ovog režima vođenja bloka otvorenost ventila prilagođava reguliranom tlaku. Povećanjem dotoka goriva dolazi do povećanja proizvodnje pare u generatoru pare zbog čega se ona počinje akumulirati u bloku. Kako bi se održao konstantan tlak sustav regulacije otvara glavne parne ventile. Time dolazi do povećanja protoka kroz turbinu zbog čega raste povećanja snage bloka.

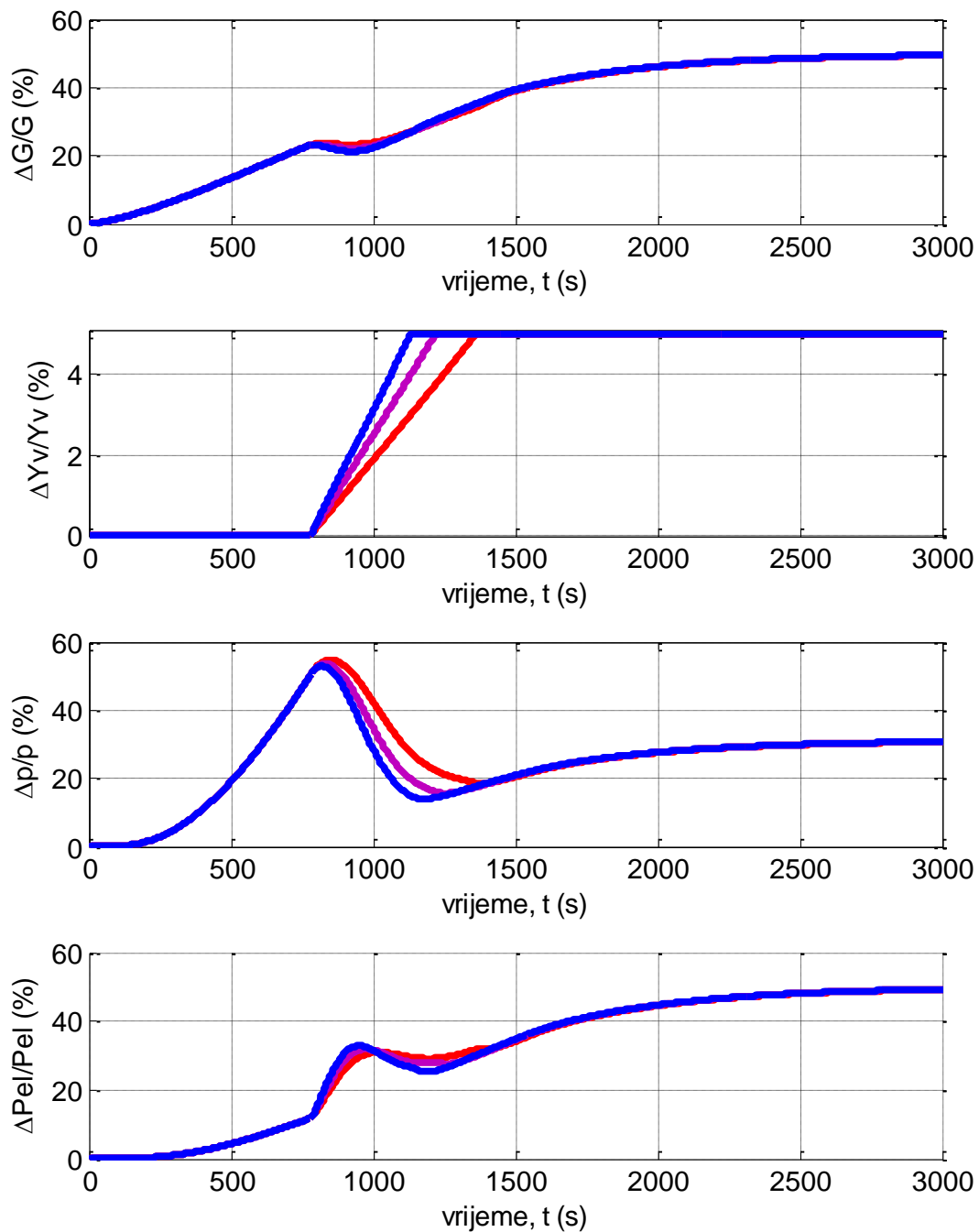
### 5.1.2. Pogon s modificiranim kliznim tlakom

Tijekom pogona s modificiranim kliznim tlakom, izlazna snaga generatora  $P_{el}$  je također upravljana otvaranjem turbinskih ventila. Razlika u odnosu na pogon s konstantnim tlakom je ta da otvorenost turbinskih ventila  $y_T$  nije kontrolirana kao funkcija izlazne snage, ali ostaje nepromijenjena unutar određenog ranga „kliznog tlaka“ (dolje, slika lijevo). Također valja napomenuti da turbinski regulacijski ventil treba biti otvoren do točke minimalnog prigušivanja ili drugim riječima minimalno prитvoren prilikom stacionarnog pogona odnosno u velikom rasponu opterećenja. U slučaju nužde turbinski ventil će se otvoriti i time povećati maseni protok pare u turbinu. Ukoliko je neophodan rezervni kapacitet u cijelom rangu kliznog tlaka, onda će se sustav voditi po krivulji  $y_T$  na slici 18 desno.



Slika 18. Karakteristike pogona s modificiranim kliznim tlakom [8]

U velikom području opterećenja bloka moguće je u slučaju potrebe kao što je primjerice naglo sniženje frekvencije naglo otvoriti ventil za iznos koji je određen stupnjem prigušenja i time izazvati brzo povećanje snage iskorištavanjem akumulativnosti generatora pare na račun prolaznog sniženja tlaka svježeg para za  $\Delta p$  [1].



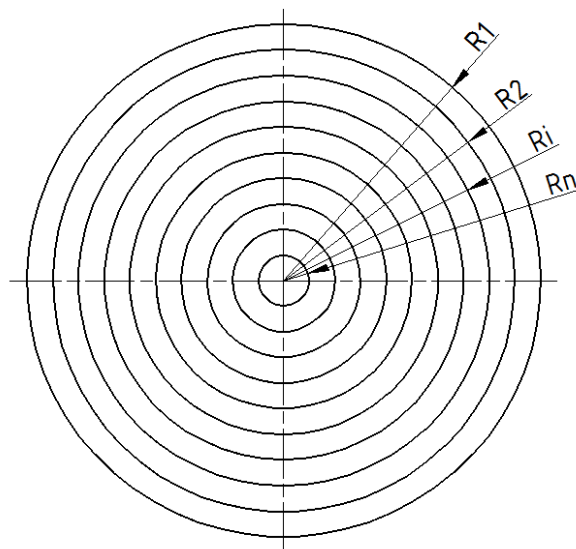
**Slika 19. Odzivi bloka u režimu modificiranog kliznog tlaka**

Ovdje se može vidjeti da se loženje intenzivira od samog početka ne bi li se povećalo snagu bloka do zadane razine. U trenutku kada zadana vrijednost snage na ulazu u blok premaši postavljenu razinu dolazi do naglog otvaranja ventila. Dobiveno povećanje snage ostvareno je na račun akumulirane pare u bloku. Na slici su prikazani rezultati simulacije za tri različite brzine otvaranja ventila. Kao što se može vidjeti sa slike, što je otvaranje ventila brže to se može dobiti brži odziv bloka, ali i veća sedla što potencijalno može voditi skraćenju radnog vijeka debelostijenih komponenti TE bloka.

## 6. MATEMATIČKI MODEL PROGRIJAVANJA DEBELOSTIJENIH KOMPONENTI

### 6.1. Rotor

Turbinsko vratilo - rotor modeliran je kao slojeviti cilindar beskonačne duljine. Podijeljen je u deset slojeva iste debljine uz pretpostavku radijalnog provođenja topline. Do intenzivnog progrijavaanja dolazi uslijed prijenosa topline konvekcijom zbog velikog koeficijenta prijelaza topline na strani pare i razlike temperatura između pare i stjenke rotora. Dominantan način provođenja topline je radijalno provođenje zbog većeg gradijenta temperature u radijalnom smjeru u odnosu na aksijalno provođenje topline između pojedinih slojeva.



Slika 20. Radijalni presjek rotora

Pretpostavke modela su sljedeće:

- zanemareno je aksijalno provođenje topline;
- specifični toplinski kapacitet materijala rotora nije ovisan o temperaturi;
- koeficijent prijelaza topline je konstantan, pretpostavljen je da iznosi  $15\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ , te nije ovisan o tlaku i temperaturi (Slika 22);
- koeficijent toplinske provodnosti je također konstantan i neovisan o temperaturi.

Akumulacija energije za prvi sloj:

U parnom volumenu nalazi se para temperature  $T_p$  koja dolazi u doticaj s površinom rotora temperature  $T_{s1}$ . Temperatura u prvom sloju se formira kao posljedica konvektivnog dovođenja topline s pare i odvođenja topline provođenjem u radijalnom smjeru s unutarnje površine prvog sloja (prstena) na drugi sloj.

$$\rho_s(r_1^2 - r_2^2)c_s \frac{dT_{s1}}{dt} = \alpha_p 2r_1(T_p - T_{s1}) - \frac{2\lambda}{\ln \frac{r_1}{r_2}}(T_{s1} - T_{s2}) \quad (1)$$

Akumulacija energije od  $i$ -tog do  $n-1$  sloja:

Ovdje se odvija samo provođenje u radijalnom smjeru te su sve jednadžbe slične, samo se razlikuju po površinama izmjene topline u slojevima.

$$\rho_s(r_i^2 - r_{i+1}^2)c_s \frac{dT_{si}}{dt} = 2\lambda \left( \frac{T_{si-1} - T_{si}}{\ln \frac{r_{i-1}}{r_i}} - \frac{T_{si} - T_{si+1}}{\ln \frac{r_i}{r_{i+1}}} \right) \quad (2)$$

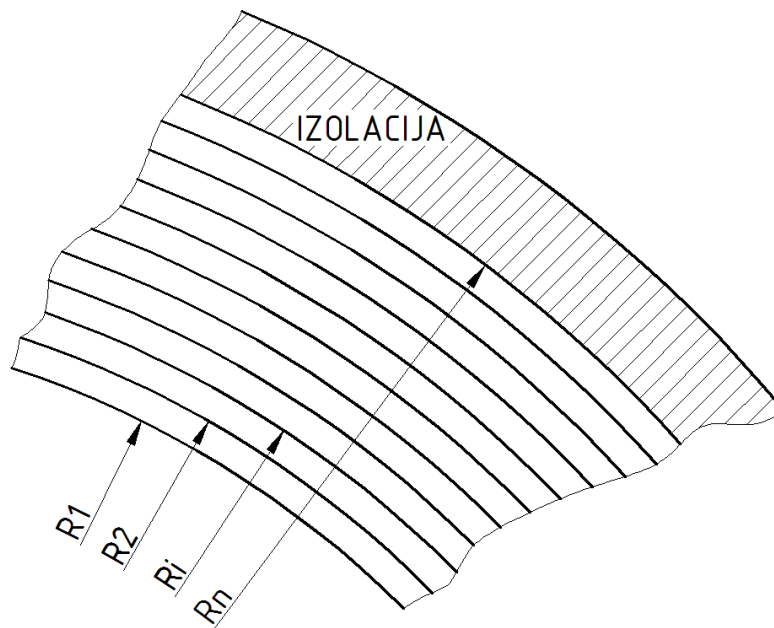
Akumulacija energije u zadnjem,  $n$ -tom sloju:

Pretpostavljeno je da nema odvođenja topline, tako da zadnja jednadžba modela glasi:

$$\rho_s(r_{n-1}^2 - r_n^2)c_s \frac{dT_{sn}}{dt} = 2\lambda \left( \frac{T_{sn-1} - T_{sn}}{\ln \frac{r_{n-1}}{r_n}} \right) \quad (3)$$

## 6.2. Kućište turbine

Radi pojednostavljenja modela pretpostavljeno je da postoji samo vanjsko kućište u modelu. Kod takvih konstrukcija djeluje razlika tlaka između pare u turbini i atmosferskog tlaka. Radi se o debelostijem materijalu koji u uvjetima visokih tlakova i temperatura ima zadatak održati ne samo čvrstoću, već i nepropusnost konstrukcije, zaštititi unutrašnjost turbine od vanjskih utjecaja dok istovremeno mora biti dovoljno čvrst da izdrži nametnute promjene opterećenja, te dobro izoliran kako ne bi bilo gubitaka topline i kondenzacije pare na unutarnjim stjenkama kućišta.



Slika 21. Radijalni presjek kućišta

Radi preglednosti rada, još jednom će se raspisati jednačbe provođenja koje su u odnosu na model rotora promijenjene samo po nekim indeksima s obzirom na definirane polumjere, jer u ovom slučaju prijenos topline se vodi iznutra prema van ako se govori o progrijavanju kućišta. Vrijedi pretpostavka da je izolacija idealna, te da ona predstavlja adijabatsku granicu modela.

Akumulacija energije za prvi sloj:

$$\rho_s(r_2^2 - r_1^2)c_s \frac{dT_{s1}}{dt} = \alpha_p 2r_1(T_p - T_{s1}) - \frac{2\lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}}(T_{s1} - T_{s2}) \quad (4)$$

Akumulacija energije od  $i$ -tog do  $n-1$  sloja:

$$\rho_s(r_{i+1}^2 - r_i^2)c_s \frac{dT_{si}}{dt} = 2\lambda \left( \frac{T_{si-1} - T_{si}}{\ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} - \frac{T_{si} - T_{si+1}}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \right) \quad (5)$$

Akumulacija energije u zadnjem,  $n$ -tom sloju:

$$\rho_s(r_n^2 - r_{n-1}^2)c_s \frac{dT_{sn}}{dt} = 2\lambda \left( \frac{T_{sn-1} - T_{sn}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \right) \quad (6)$$

### 6.3. Naprezanja u materijalu

Nakon što su raspisane bilance grijanja odnosno hlađenja površine i unutrašnjosti rotora, moguće je izračunati toplinska naprezanja u rotoru. Za to se koristi jednačba (7) za toplinsko naprezanje materijala [5] Lončar, D.: Vođenje energetskih sustava, interne prezentacije iz kolegija, FSB Zagreb, 2014. :

$$\sigma(r, t) = \frac{\beta E}{1-\nu} [T_{sr}(t) - T(r, t)], \quad (7)$$

pri čemu je  $T_{sr}$  srednja temperatura rotora izračunata na sljedeći način:

$$T_{sr}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i. \quad (8)$$

Približne vrijednosti faktora u gornjoj jednačbi iznose:

$$\beta \approx 0.1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

$$E \approx 0.21 \cdot 10^{12} \text{ Pa},$$

$$\nu \approx 0.3,$$

zbog čega se gore navedena jednačba za temperaturna naprezanja može napisati u jednostavnijem obliku:

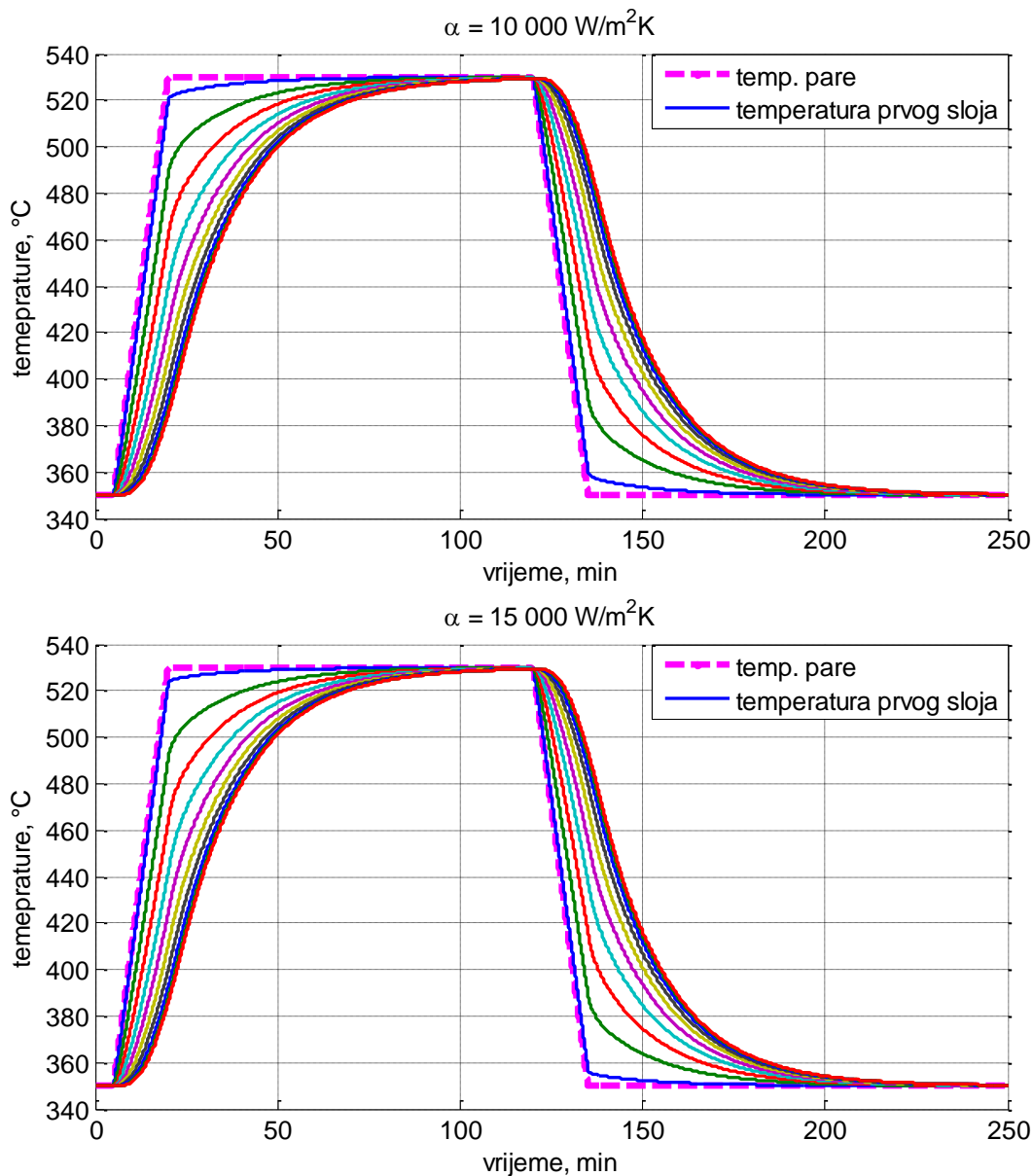
$$\sigma(r, t) = 3 \cdot 10^6 [T_{sr}(t) - T(r, t)] \quad (9)$$

Zaliha naprezanja predstavlja razliku između dopuštenih naprezanja u materijalu i ukupnih naprezanja u sloju materijala, te se može zapisati na sljedeći način: [5]

$$\sigma_z = \min[\sigma_{dop}(\vartheta(r, t)) - |\sigma(r, t)|]. \quad (10)$$

#### 6.4. Simulacija promjene temperature pare u turbini

Nakon što su raspisane jednačbe provođenja topline za rotor i kućište, te jednačbe koje opisuju stanje naprezanja u turbinskom materijalu, izvršene su dvije simulacije promjene temperature na modelu kućišta, gdje se u prvoj pretpostavio  $\alpha = 10\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ , a u drugoj  $\alpha = 15\,000\text{ W/m}^2\text{K}$ , te su rezultati prikazani na slici 22 kako bi se lakše usporedili. Cilj ove simulacije bio je prikazati načelno ponašanje turbinskog materijala na poremećaje temperature i različite koeficijente prijelaza topline na istoj geometriji.

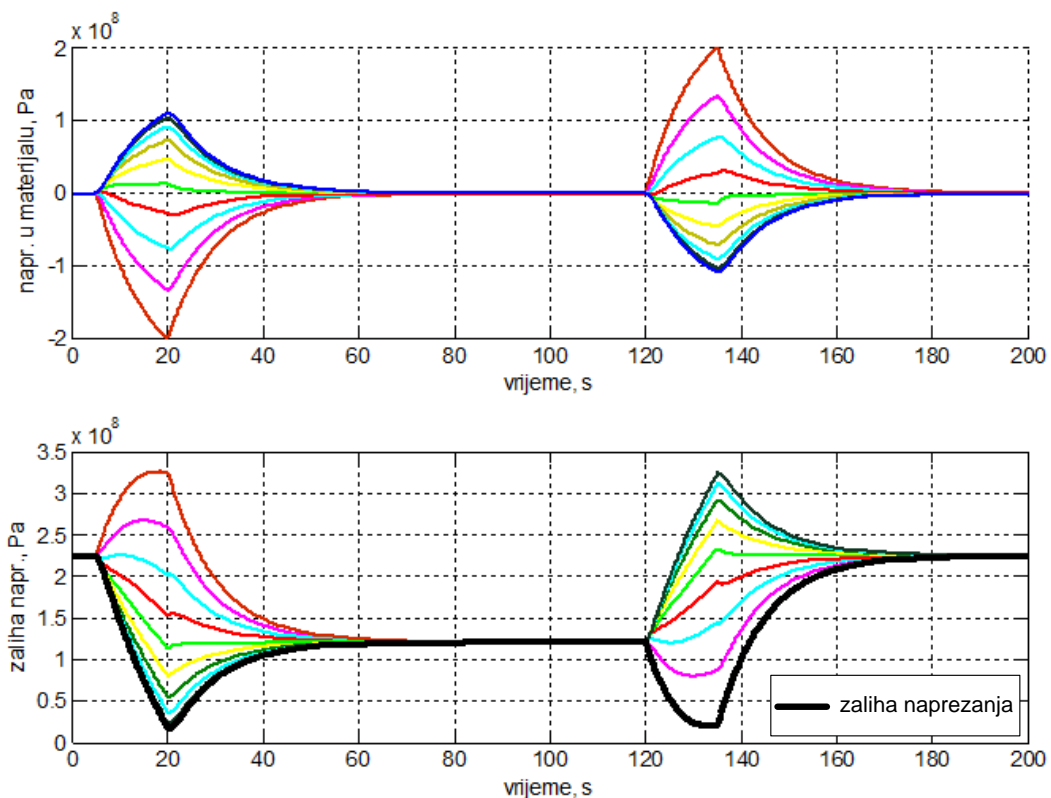


Slika 22. Simulacija promjene temperature materijala kućišta

Na slici 22 prikazana je nagla promjena temperature pare u turbini s 350 na 530 °C zajedno sa srednjom temperaturom kućišta, te temperature svih slojeva kućišta. Gradijent promjene



temperature kod progrijavanja i ohlađivanja u simulaciji iznosio je  $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$  i radi se o velikom nametnutom gradijentu, kao i koeficijentima prijelaza topline. Temperaturna raspodjela i brzina progrijavanja ovise i o drugim faktorima, kao što su primjerice debljina materijala i njegovoj sposobnosti brzog provođenja topline. Iz slike se može uočiti da se radi o velikoj toplinskoj inerciji modela zbog sporog provođenja topline kroz debelostijeni materijal za odabrane parametre modela zbog čega temperaturni gradijent zadnjeg sloja ne mijenja niti veći koeficijent prijelaza topline. Prvi sloj se ipak brže progrijava zbog većeg koeficijenta prijelaza topline, te je zbog toga u radu korišten  $\alpha = 15\,000\text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ .



**Slika 23. Promjena naprezanja u materijalu kućišta**

Naprezanja u kućištu rotora javljaju se zbog sporog provođenja topline, zbog čega se slojevi materijala na međusobno različitim temperaturnim nivoima naprežu uslijed opterećivanja odnosno rasterećivanja turbine. Na slici 23 debelom crnom linijom je prikazana zaliha naprezanja u materijalu kućišta. S obzirom da nije dosegla nulu, znači da bi se hipotetski materijal rotora mogao zagrijavati i pothlađivati brže od gradijenta nametnutog u simulaciji.

## 7. MODELIRANJE TOPLINSKIH NAPREZANJA U DEBELOSTIJENIM KOMPONENTAMA

Znatan dio raspoloživog radnog vijeka turbine koji uzrokuje oštećenja - obično 50-90% [9] za VT i ST rotore je rezerviran za cikluse pokretanja odnosno iskapčanja turbine iz pogona. Stoga je broj pokretanja, zajedno s načinom na koji se izvodi, izrazito važan kod procjene utjecaja promjena opterećenja na pogonsku raspoloživost i vijek debelostijenih komponenti. Kod konstrukcije turbina moraju se pretpostaviti promjenjivi ciklusi rada tijekom eksploatacije kao i učestale obustave iz pogona. Kada se govori o procjeni životnog vijeka, posebice sa stajališta današnjih zahtjeva za električnom energijom, pokazuje se neophodnim detaljnije pristupiti ovom problemu varijabilnog pogona bloka.

**Tablica 2. Parametri pokretanja turbine [9]**

| Tip pokretanja | Vrijeme mirovanja, h | Početna temperatura |        | Broj pokretanja, $N_i$ |
|----------------|----------------------|---------------------|--------|------------------------|
|                |                      | VT, °C              | ST, °C |                        |
| Vrući          | 8                    | 445                 | 430    | 6000                   |
| Topli          | 56                   | 310                 | 300    | 1500                   |
| Hladni         | 168                  | 90                  | 90     | 150                    |

Slična analiza se može primijeniti i na drugim lokacijama na rotoru. Sam proračun sastoji se od sljedećih koraka:

- 1) raspodjela životnog vijeka rotora između vrućeg, toplog i hladnog starta;
- 2) proračun amplitude dopuštenih napreznja kroz uporabu raspodijeljenog životnog vijeka i LCF krivulja;
- 3) pretvaranje dopuštenih temperaturnih napreznja u dopuštene razlike temperatura na definiranom rotorskom presjeku;
- 4) određivanje minimalnog vremena za vrući, topli i hladni start kod kojeg se neće prekoračiti dopuštena napreznja u materijalu [9].

Naravno da je moguće ovaj proces ponavljati za različita dodijeljena vremena te na taj način pronaći optimalna vremena pokretanja.

### 7.1. Raspodjela životnog vijeka

Ova metoda je zapravo proizvoljna te ovisi o operativnim prioritetima. Reducirani broj ciklusa,  $N_{j,red}$ , se račun prema sljedećoj formuli:

$$N_{j,red} = \frac{N_j}{x_j} \quad (11)$$

gdje je  $N_j$  broj pokretanja, a  $x_j$  udio u životnom vijeku. Reducirani broj ciklusa je stoga teoretski broj pokretanja u pogon prema danom tipu pokretanja  $j$  koji vodi do kompletnog trošenja životnog vijeka komponente.

Stoga su za danu turbinu snage 210 MW odabran raspodijeljeni parametri životnog vijeka kao u tablici 3. Pretpostavka je da se turbina može voditi u režimu konstantnog i modificiranog kliznog tlaka svježe pare.

**Tablica 3. Raspodjela životnog vijeka prema [9]**

| Tip pokretanja, $j$ | Broj pokretanja, $N_j$ | Udio u uk. životnom vijeku komponente, $x_j$ | $N_{j,red} = \frac{N_j}{x_j}$ |
|---------------------|------------------------|--|-------------------------------|
| Vrući               | 6 000                  | 0.625  | 9 600                         |
| Topli               | 1 500                  | 0.250  | 6 000                         |
| Hladni              | 150                    | 0.025  | 6 000                         |
| <b>Ukupno</b>       | -                      | <b>0.900</b>                                 |                               |

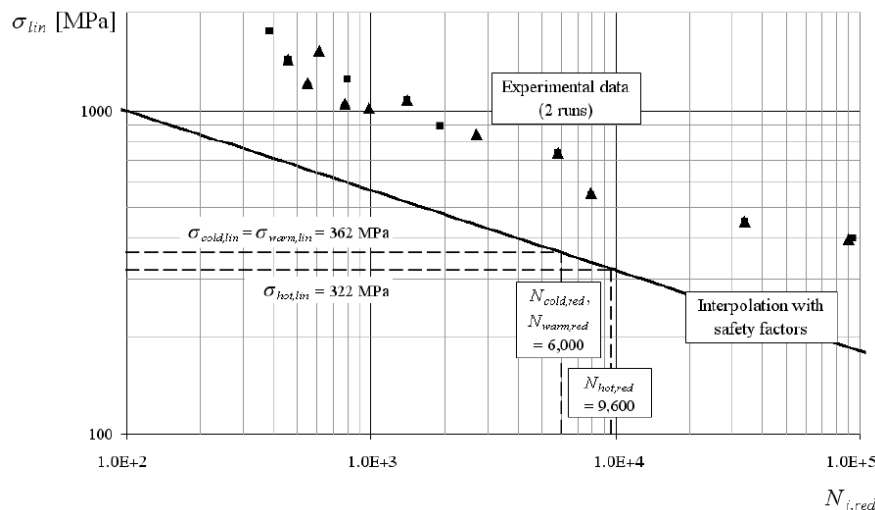
## 7.2. Proračun amplitude dopuštenih naprezanja

Dopuštena naprezanja se dobivaju temeljem eksperimentalnih podataka kao što su primjerice LCF (eng. Low Cycle Fatigue) krivulje za dani materijal. Podaci se skupljaju i obrađuju na temelju specifikacija materijala u temperaturnom rasponu između 200 do 600 °C, te se obrađuju kao na slici 24 [9].

Ova metoda koristi poopćeno Neuberovo pravilo za određivanje linearnog produljenja materijala [9] na bazi elastičnog  $\varepsilon_{el}$  i plastičnog produljenja  $\varepsilon_{pl}$ ,

$$\varepsilon_{lin} = \varepsilon_{el}^m (\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl})^{1-m} \quad (12)$$

gdje  $m = 0,1$  predstavlja toplinski uzrokovano naprezanje. Odgovarajuće dopušteno linearno naprezanje,  $\sigma_{lin} = E \cdot \varepsilon_{lin}$ , se potom proračunava iz LCF krivulje s primjenom odgovarajućih sigurnosnih faktora.



**Slika 24. Određivanje dopuštenog naprezanja  $\sigma_{j,lin}$  temeljem reduciranog broja pokretanja  $N_{j,red}$  za čelik 28CrMoNiV4-9 na temperaturi 400°C [9]**

S obzirom da su LCF krivulje ovisne o temperaturi, dopušteno linearno naprezanje je također funkcija temperature,  $\sigma_{j,lin} = \sigma_{j,lin}(T)$ , za svaki tip pokretanja  $j$  [9].

## 7.3. Proračun dopuštenih razlika temperatura

Jednom kada je maksimalno dopušteno naprezanje određeno, moguće je to naprezanje pretvoriti u dopuštenu razliku temperatura za dani presjek u kojemu se generira naprezanje. Ako je rotor aproksimiran kao kruti cilindar beskonačne duljine koji je hlađen ili grijan preko vanjske površine, moguće je izračunati površinska naprezanja koristeći već spomenutu jednadžbu (7):

$$\sigma(r, t) = \frac{\beta E}{1 - \nu} [T_{sr}(t) - T(r, t)]$$

U gornjem izrazu jedina varijabla je razlika temperature  $\Delta T$  koja je definirana kao razlika temperature između svježom parom grijane odnosno hladene površine rotora  $T_S$  i srednje integralne temperature rotora  $\bar{T}$ :

$$\Delta T = T_S - \bar{T} = T_S - \frac{2}{R^2} \int_0^R rT(r)dr. \quad (13)$$

S obzirom da je na površini rotora naprezanje koncentrirano na mjestima iznenadne promjene geometrije kao što su lopatice ili labirintne brtve, neophodno je aproksimaciju opisanu gore modificirati. Stoga se aksijalno toplinsko naprezanje množi sa faktorom koncentracije naprezanja  $k_c$ .

$$\sigma_z = -k_c \frac{E\beta\Delta T}{1 - \nu} \quad (14)$$

U labirintnim brtvama taj koeficijent obično iznosi između 1,6 do 2 [9]. Moguće ga je kontrolirati preciznom konstrukcijom rotora, ali svejedno će se u ovome radu pretpostaviti da je  $k_c = 2$ .

Koristeći maksimalno dopušteno naprezanje i gore prikazani raspodijeljeni životni vijek moguće je dakle izračunati maksimalnu razliku temperatura  $\Delta T_j$  za čelik 28CrMoNiV4-9. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 4.

**Tablica 4. Dopuštene temperaturne razlike  $\Delta T_j$  za simetrične cikluse opterećenja [9]**

| $\Delta T_j^+ [^\circ\text{C}]$ | Površinska temperatura rotora, $T_S [^\circ\text{C}]$ |      |      |      |
|---------------------------------|---|------|------|------|
|                                 | 200   | 400  | 500  | 600  |
| $\Delta T_{vrući}$              | -   | 43.0 | 32.6 | 23.7 |
| $\Delta T_{topli}$              | 60.1  | 48.3 | 37.2 | 27.4 |
| $\Delta T_{hladni}$             | 60.1  | 48.3 | 37.2 | 27.4 |

Opće je poznato da najmanja trajna dinamička čvrstoća nastupa pri simetričnom naprezanju. Upravo takvo naprezanje je pretpostavljeno prilikom proračuna u tablici 4. Naime, pokretanje odnosno gašenje turbine može se razmatrati kao jednu vršnu amplitudu ciklusa naprezanja i jednako je  $2\Delta T_j$ . Kakogod, u stvarnosti je ipak malo drugačija situacija, te je ciklus opterećenja turbine visoko asimetričan posebice ako je izveden bez forsiranog hlađenja. Ciklusom gašenja turbine dominira aksijalno provođenje topline kroz rotor, koje vodi izjednačavanju temperatura i smanjenju temperaturnih naprezanja, te je vođeno jedino sporim procesom hlađenja. Stoga su temperaturna naprezanja prouzrokovana gašenjem turbine veoma

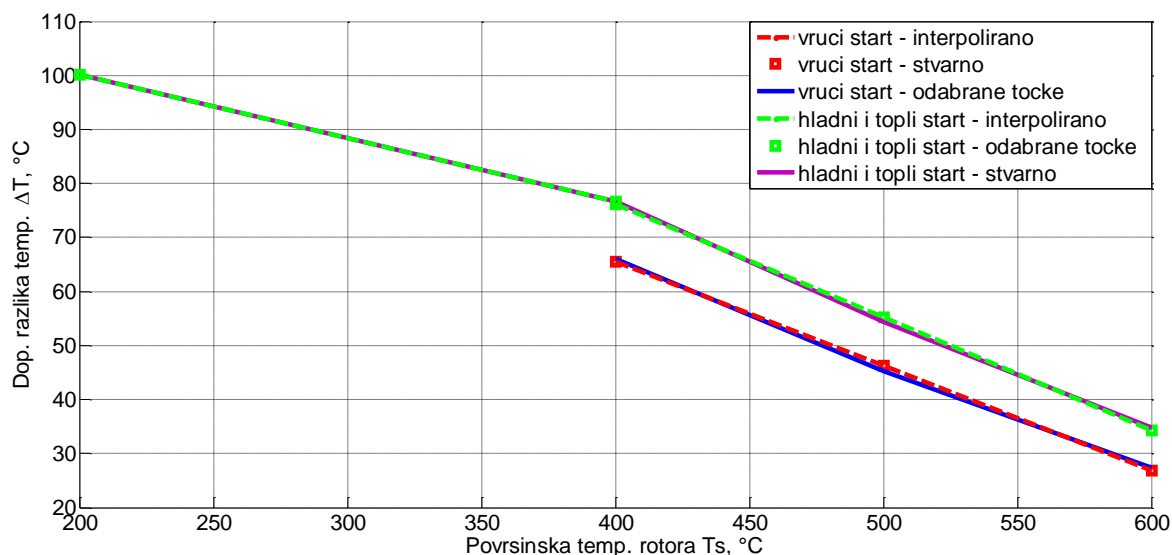
mala. Takva pretpostavka na prvi pogled izgleda da bi se onda dvostruka amplituda ciklusa  $2\Delta T_j$  mogla koristiti samo za pokretanje, ali to nije moguće.

Prvo, razumno je ostaviti sobu na cca 20 °C za negativne varijacije temperature koje uzrokuju naprezanja tijekom rada. Drugo, gornja granica  $\Delta T$  ograničena je s maksimalnim statičkim temperaturnim naprežanjem. S takvim razmatranjima, maksimalna razlika temperature koja se može postići za pokretanje u pogon tipa  $j$  poprima vrijednosti sukladno tablici 5.

**Tablica 5. Gornja granica dopuštene pozitivne temperaturne razlike  $\Delta T_j^+$  [9]**

| $\Delta T_j$ [°C]   | Površinska temperatura rotora, $T_s$ [°C] |      |      |      |
|---------------------|---|------|------|------|
|                     | 200                                       | 400  | 500  | 600  |
| $\Delta T_{vrući}$  | -   | 66   | 45.2 | 27.4 |
| $\Delta T_{topli}$  | 100.1                                     | 76.6 | 54.4 | 34.7 |
| $\Delta T_{hladni}$ | 100.1                                     | 76.6 | 54.4 | 34.7 |

Na temelju podataka iz prethodne tablice definirani su iznosi razlika temperatura za svaki pogonski režim kojim se neće prekoračiti naprezanja u materijalu. Potom su interpolirani pravci u ovisnosti o dopuštenim razlikama temperatura rotora u danom rasponu od 200 do 600 °C, koji će se mogu koristiti za kontrolu i ograničenja turbinskih naprezanja u nadređenom sustavu regulacije.



**Slika 25. Interpolacija dopuštenih razlika temperature pravcima**

Na temelju Slika 25 i raspoloživih podataka interpolirani su pravci za vrući, topli i hladni start. Vrući start je interpoliran s jednim pravcem, a topli i hladni start se nalaze na istom pravcu, ali im je ovisnost o temperaturi interpolirana s dva pravca kako bi se što ljepše opisali raspoloživi podaci. Jednadžbe pravaca glase:

- vrući start:

$$\Delta T_v = -0.193T_S + 142.7; \quad 400 \leq T \leq 600 \quad (15)$$

- hladni i topli start:

$$\Delta T_{ht,1} = -0.2095T_S + 159.9833; \quad 200 \leq T \leq 400 \quad (16)$$

$$\Delta T_{ht,2} = -0.1175T_S + 123.6; \quad 400 < T \leq 600 \quad (17)$$

Radi pojednostavljenja modela kontrole turbinskih naprezanja iz gornje tablice izračunata su dopuštena naprezanja uz pretpostavljena svojstva materijala kao u poglavlju „Matematički model progrijavanja rotora“. Rezultati su dani u tablici 6 i na Slika 26.

**Tablica 6. Gornja granica dopuštenih naprezanja za temperaturnu razliku  $\Delta T$**

| $\sigma$ [MPa]    | Površinska temperatura rotora, $T_S$ [°C] |     |     |     |
|-------------------|---|-----|-----|-----|
|                   | 200                                       | 400 | 500 | 600 |
| $\sigma_{vrući}$  | -   | 198 | 136 | 82  |
| $\sigma_{topli}$  | 300                                       | 230 | 163 | 104 |
| $\sigma_{hladni}$ | 300                                       | 230 | 163 | 104 |

Dopuštena naprezanja u gornjoj tablici su interpolirala pravcima, kao što je to bio slučaj s dopuštenim razlikama temperature. Vrući start je interpoliran s jednim pravcem, a topli i hladni start se nalaze na istom pravcu zbog iste temperaturne razlike što znači da će imati iste parametre pokretanja kod nadređene regulacije. S druge strane potonji su interpolirani s dva pravca kako bi se što ljepše opisao potrebnim temperaturnim rasponom i lom krivulje na temperaturi 400°C kao što je to bio slučaj s temperaturama kod hladnog i toplog starta. Jednadžbe pravaca glase:

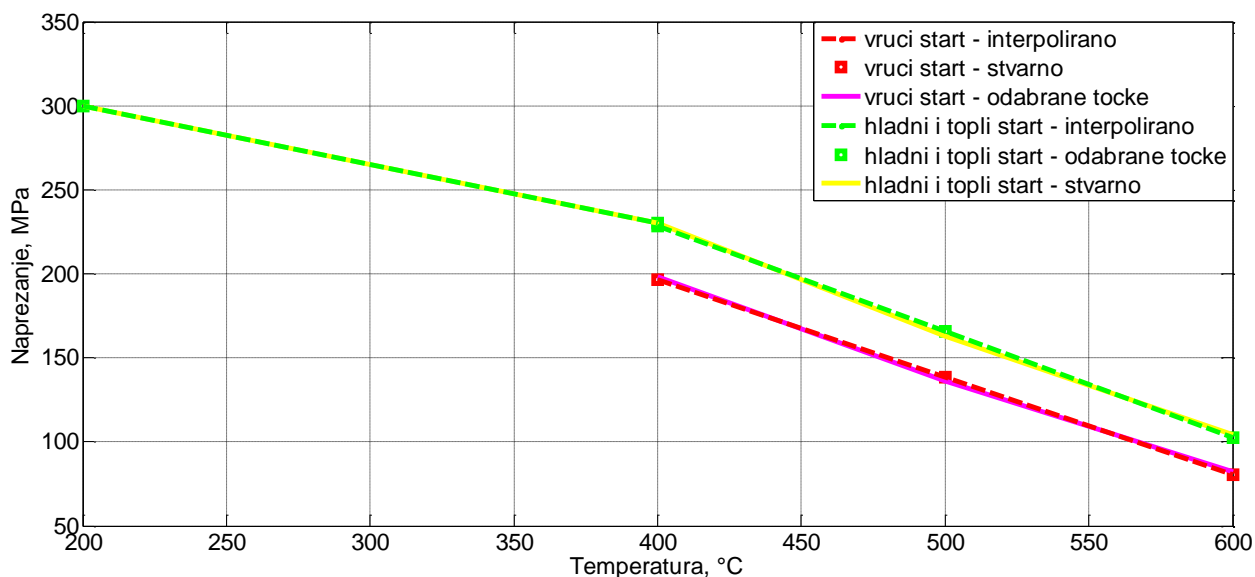
- vrući start:

$$\sigma_{dop,v}[MPa] = -0.58T + 428.67; \quad 400 \leq T \leq 600 \quad (18)$$

- hladni i topli start:

$$\sigma_{dop,h1}[MPa] = -0.35T + 370; \quad 200 \leq T \leq 400 \quad (19)$$

$$\sigma_{dop,h2}[MPa] = -0.63T + 480.67; \quad 400 < T \leq 600 \quad (20)$$



**Slika 26. Interpolacija dopuštenih naprezanja pravcima**

Dobiveni sustav jednadžbi će se koristiti za praćenje turbinskih naprezanja u računalu naprezanja, a ulazni podatak je temperatura rotora  $T_S$ . Kao izlazni podatak na temelju dinamičkom simulacijom dobivene temperature rotora dobivati će se dopuštena razlika temperature između pare i površinske temperature rotora odnosno u konačnici zaliha raspoloživih naprezanja. S tim podacima moguće je ugoditi model nadređenih regulatora s podređenima kako bi se ostvarilo optimalno djelovanje sustava nadzora turbinskih naprezanja na gradijente snage bloka. Ovi signali se u podređenim regulacijskim krugovima manifestiraju kroz promjenu intenziteta loženja odnosno promjenu temperature svježje pare u vodeno-parnom traktu TE bloka u ovisnosti o režimu rada i trenutnom stanju naprezanja.

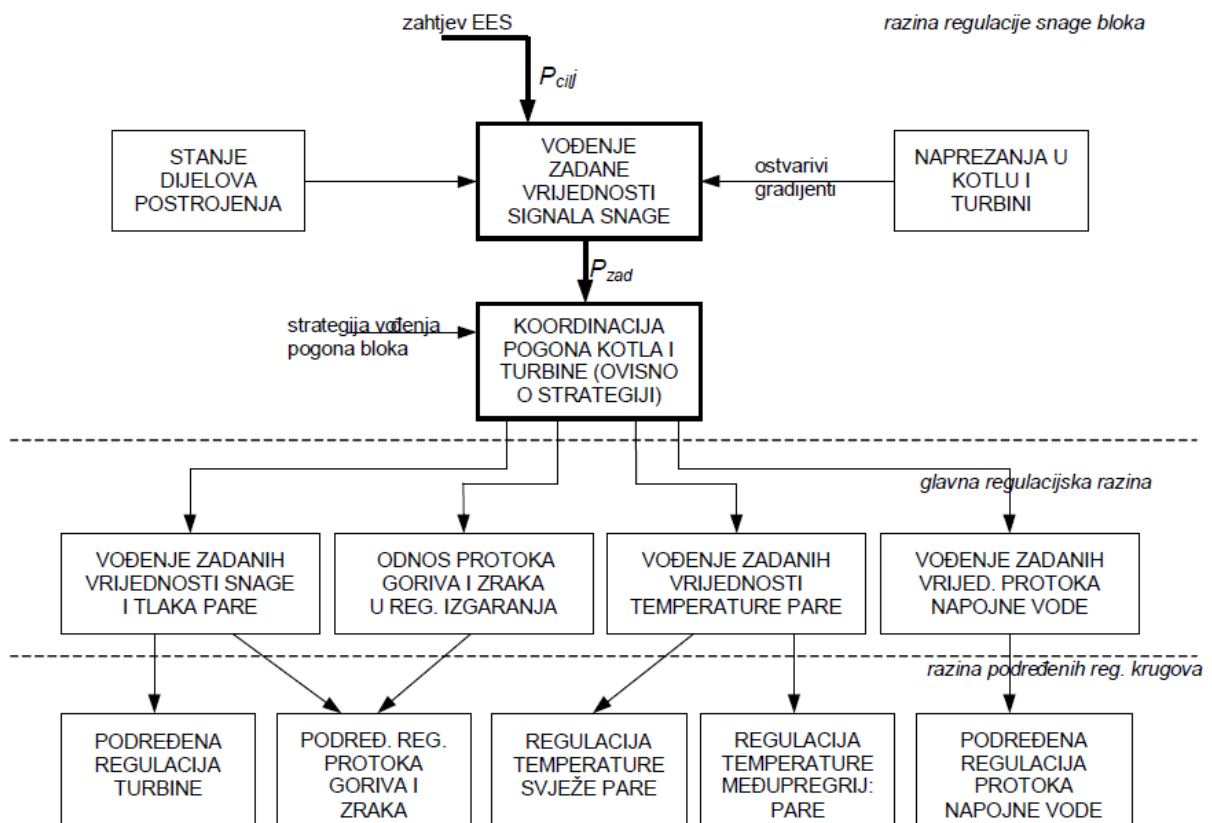
Ova analiza vrijedi i za kućište turbine gdje su primijenjene iste jednadžbe. Pretpostavka je da je materijal rotora i kućišta isti.



## 8. NADREĐENI SUSTAV VOĐENJA I REGULACIJE

Kao što se moglo primijetiti u prethodnim poglavljima, promjene opterećenja praćene su promjenama temperatura i tlakova radnog medija u komponentama TE bloka. Promjene temperature uzrokuju temperaturna naprezanja u materijalu, te se dodaju na postojeća pogonska naprezanja uslijed sile tlaka, centrifugalnih sila, itd. Varijabilnim pogonom može se drastično skratiti životni vijek postrojenja.

U ovom radu od posebnoga je interesa razina regulacije snage bloka. Naime ovdje se signal zahtijevane (ciljne) snage određuje na nekoliko mogućih načina: od strane osoblja, iz mrežnog regulatora ukoliko TE blok sudjeluje u prethodno spomenutoj regulaciji primarne energije ili pak signalom iz dispečerskog centra u slučaju da u sustavu djeluje mrežni regulator frekvencije (sekundarna regulacija).



Slika 27. Hijerarhijska struktura suvremenog regulacijskog sustava TE bloka [6]

Slika 27 strukturirano prikazuje tri razine regulacije TE bloka:

- **razina regulacije snage bloka**, na kojoj se signal zahtijevane snage raščlanjuje na specifične regulacijske zadatke glavnih tehnoloških cjelina (kotao i turbina) u ovisnosti o trenutnom stanju postrojenja (raspoloživost opreme, naprezanja u komponentama) i odabranoj strategiji vođenja;
- **glavna regulacijska razina**, na kojoj se zadane vrijednosti glavnih pogonskih varijabli (temperatura i tlak pare, protoci goriva, napojne vode i zraka, podizaji turbinskih ventila) određuju odgovarajućom kombinacijom predupravljanja i regulatora u povratnoj vezi;
- **razina podređenih regulacijskih krugova**, u kojima se djelovanjem izvršnih organa ostvaruje željena promjena pogonskih varijabli [6].

Zadana i ciljna snaga ne moraju biti iste. Naime, signal ciljne snage neophodno je na nadređenoj razini regulacije provjeriti na temelju raspoloživosti kako glavnih uređaja (napojnih pumpi, gorača, mlinova, zagrijača zraka, generatorskih sklopki, sustava za vlastitu potrošnju, itd.) tako i stanja naprezanja u komponentama kotla i turbine (kolektora svježe i međupregrijane pare, parovoda, te turbinskog kućišta i rotora). U ovisnosti o zatečenom stanju dijelova postrojenja i opreme formira se signal zadane vrijednosti snage s dopustivim gradijentima povećanja.

Iako se podrazumijeva da sustav regulacije i vođenja bloka vodi na način da se osigura i predvidi stanje svih komponenti u sustavu, u ovom radu će se nastojati pojednostavniti model bloka i sustav regulacije i vođenja kako bi se ostvarila samo željena dinamika u neophodnim ulaznim i izlaznim varijablama. Prije svega, to se odnosi na protoke svježe pare i goriva, akumulaciju i tlak pare u cjevovodima TE bloka, otvorenost ventila, temperature na ulazu u turbinu i proizvedenu električnu energiju.

U posebnom fokusu je nestacionarni pogon i pojava temperaturnih naprezanja kao posljedica temperaturnih gradijenata unutar samog materijala rotora i kućišta. U suvremenim rješenjima mjerenje temperature u određenim točkama u sustavu zamijenjeno je simulacijom nestacionarnog provođenja u cijevnoj stjenci (kućištu) odnosno cilindru. Ovdje će se pokušati tome problemu također doskočiti dinamičkom simulacijom kojom će se odrediti dopušteni gradijenti upuštanja u pogon, kao i vremena pokretanja odnosno obustave rada TE bloka.

Struktura sustava regulacije i vođenja bloka ovisi i o odabranom načinu regulacije tlaka svježe pare na izlazu iz kotla. S obzirom na problematiku zadatka, predviđene su strategije pogona s konstantnim i pogona s modificiranim tlakom čije će su specifičnosti već opisane.

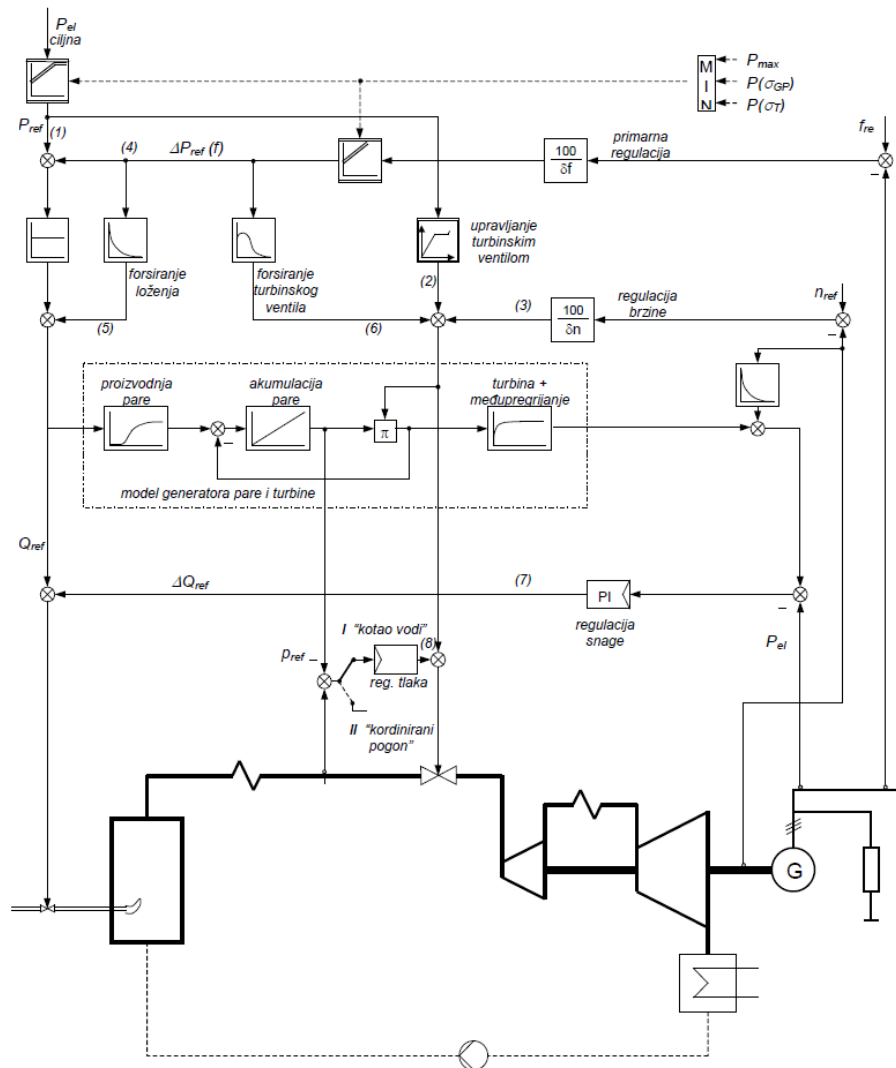
### **8.1. Matematički model nadređenog sustava regulacije i vođenja**

Nadređena razina regulacije formira ciljnu vrijednost snage bloka, a gradijent promjene snage se kod planiranih promjena formira po pretpostavci samostalno od sustava unutar dozvoljenih granica. Također je omogućen i izbor načina vođenja termoenergetskog bloka.

Modelirani nadređeni sustav regulacije i vođenja bloka u ovom radu podijeljen je na sljedeće funkcijske cjeline:

- vođenje zadane vrijednosti snage bloka
- formiranje signala ostvarive snage
- formiranje gradijenata ostvarive snage [7].
- nadzor turbinskih naprezanja.

Pojednostavljena verzija regulacije TE bloka prema [6] je prikazana na slici 28.



Slika 28. Načelna shema nadređenog sustava regulacije [6]

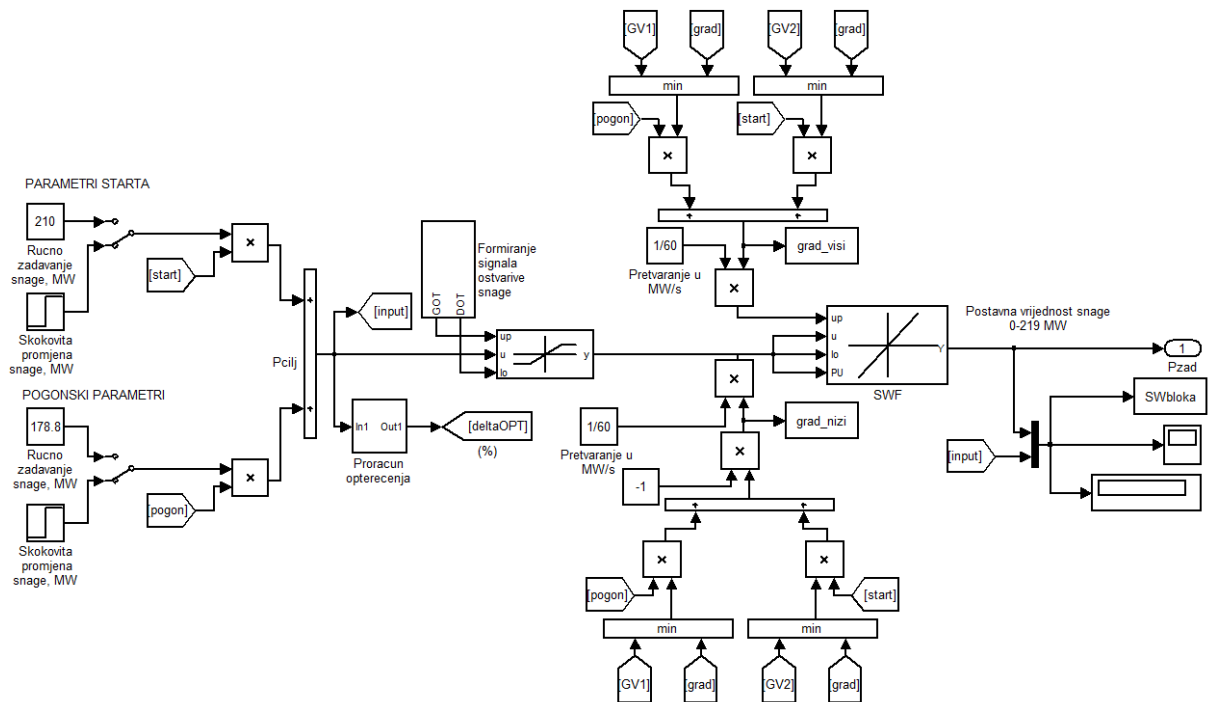
## 8.2. Vođenje zadane vrijednosti snage bloka

Na vrhu strukture nalazi se sustav kojemu se od strane operatera ili mreže definira zahtijevana snaga,  $P_{cilj}$ , i koju nadređena regulacija razmatra s obzirom na raspoloživost i stanje ostale opreme. Nju se također može zadati ručno ili prema predviđenom dnevnom planu proizvodnje električne energije TE bloka. Na temelju toga ciljne snage formira se vrijednost vođene odnosno zadane snage,  $P_{zad}$ , koja među ostalim proizlazi i iz djelatnih gradijenata koji se proračunavaju na temelju zatečenog dinamičkog stanja u turbini.

Nakon što se vođena veličina definira u nadređenom sustavu regulacije, ona biva prosljeđena u podređene sustave kojima su dodijeljeni specifični zadaci koji koriste odgovarajuće koncepte u povratnoj vezi za održavanje pogonskih varijabli kao što su temperature i tlakovi pare, protoci vode, zraka i goriva te relativne otvorenosti ventila.

Sklop za vođenje zadane vrijednosti snage bloka je podijeljen na:

- ručno zadavanje ciljne vrijednosti snage;
- ograničenje signala prema postojećem signalu ostvarive snage;
- vođenje prema djelatnom gradijentu.

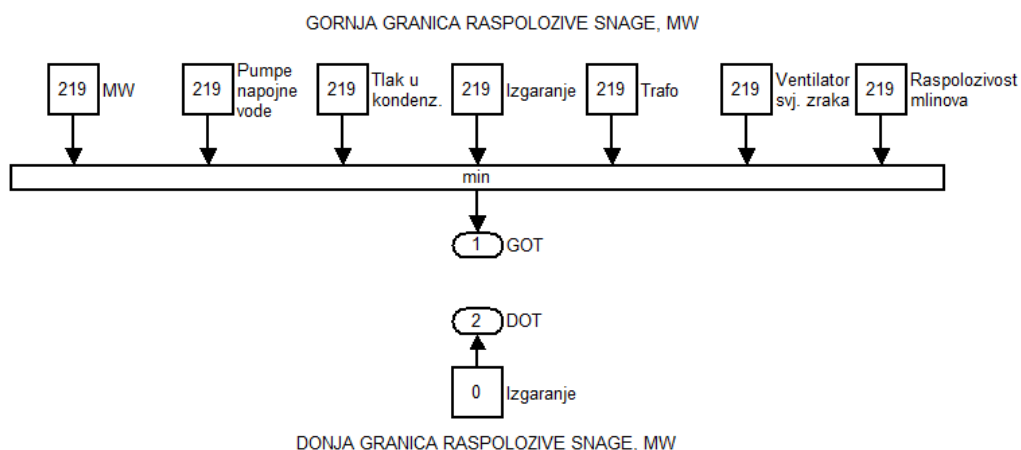


Slika 29. Vođenje zadane vrijednosti snage bloka

Najvažniji dio sklopa za vođenje zadane vrijednosti snage bloka je podsklop za vođenje djelatnih gradijenata. On dobiva informacije o raspoloživim gradijentima promjene opterećenja bloka iz drugih sklopova kao što su u ovom slučaju sklopovi za formiranje gradijenata ostvarive snage i nadzora turbinskih naprežanja. U obzir se uzima samo minimalna vrijednost od ponuđenih raspoloživih gradijenata u ovisnosti o režimu rada uz pomoć *MIN* bloka. U tom slučaju vrijedi pretpostavka da se takva promjena opterećenja vodi s minimalnim štetnim utjecajem na sve razmatrane komponente bloka.

### 8.3. Formiranje signala ostvarive snage

Zadaća sklopa je procjena (određivanje) minimalne i maksimalne dopuštene snage bloka i pripadnih gradijenata promjene tereta u slučaju pada raspoložive snage koja uvjetuje sniženje snage, te eventualno ograničavanje zadane vrijednosti električne snage. Na taj se način sprječava zadavanje snage koju blok ne može ostvariti što bi imalo za posljedicu dovođenje nekih podređenih regulatora na granicu njihovog radnog područja [7].



Slika 30. Sklop za formiranje signala ostvarive snage

Ovim blokom moguće je simulirati ispad mlinova u bloku i druge slične pojave, jer on kontrolira gornji i donji ostvariti teret generatora pare. Radi pojednostavljenja modela pretpostavljen je ispravan rad svih komponenti bloka.

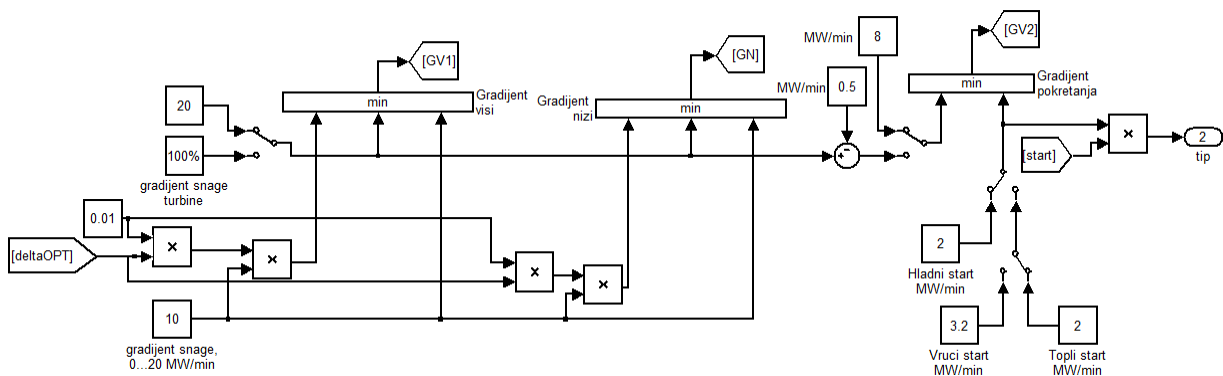
## 8.4. Formiranje gradijenata ostvarive snage

Sklop za formiranje gradijenata ima sljedeće mogućnosti:

- ručno zadavanje gradijenata;
- zadavanje gradijenata kod pokretanja bloka;
- ograničavanje gradijenata u pogonu pod opterećenjem.

Djelatni gradijent postavlja se na vrijednosti između 0 i 20 MW/min. On djeluje na postavnu vrijednost snage bloka kod pokretanja kao i kod normalnog pogona pod opterećenjem.

Uz to izvedeni su podsklopovi koji postavljaju dodatna ograničenja kod pokretanja turbine u ovisnosti o režimu rada (vrući, topli ili hladni start turbine), te u normalnom pogonu na mogućnost opterećivanja odnosno rasterećivanja turbine.



Slika 31. Sklop za formiranje gradijenata ostvarive snage

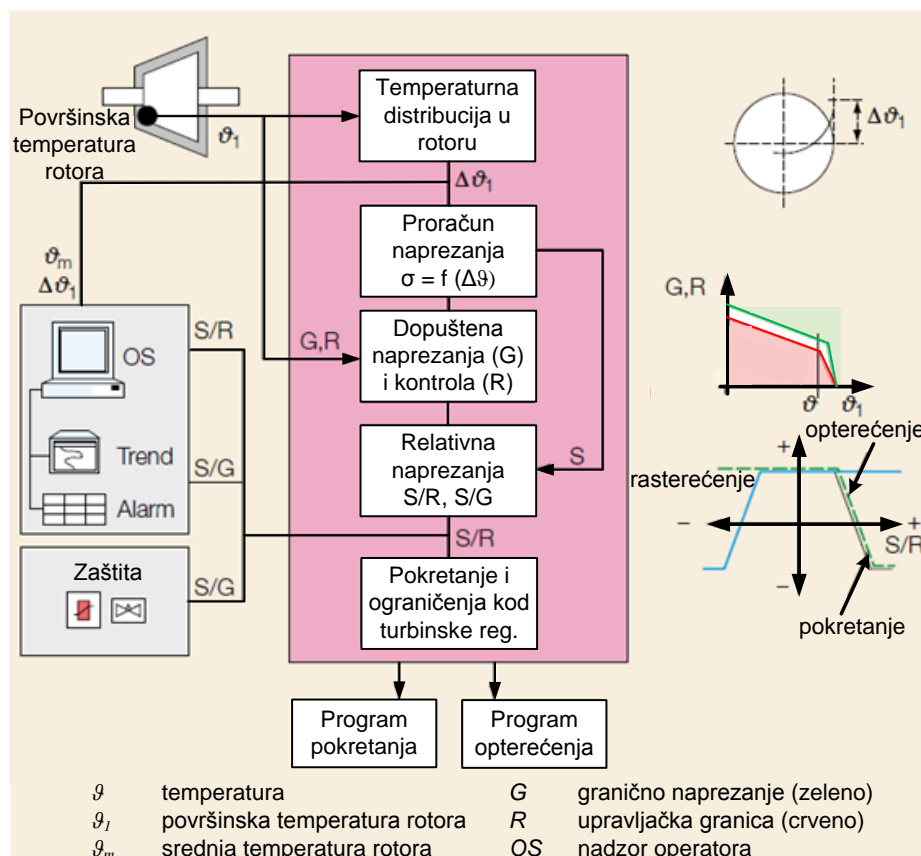
Osim sklopa prikazanog na slici 31, kod formiranja gradijenata snage aktivan je i sklop za nadzor turbinskih naprezanja. Oba signala prosljeđuju se u sklop za vođenje zadane snage bloka. Manji od dva spomenuta gradijenta ostvaruje svoje djelovanje putem *MIN* bloka. Na taj način osigurava se optimalno vođenje gradijenta snage.

## 8.5. Nadzor turbinskih naprezanja

Kod promjena snage bloka dolazi i do neminovnih promjena glavnih reguliranih procesnih veličina. Promjena temperature i tlaka svježih pare će, kako smo već ustvrdili, svakako uzrokovati dodatna temperaturna naprezanja u debelostijenim materijalima kućišta i turbine.

Kod TE blokova je postalo neophodno praćenje nastanka temperaturnih naprezanja koja se javljaju tijekom varijabilnog pogona u debelostijenim komponentama koje su od ključne važnosti za pogon TE bloka.

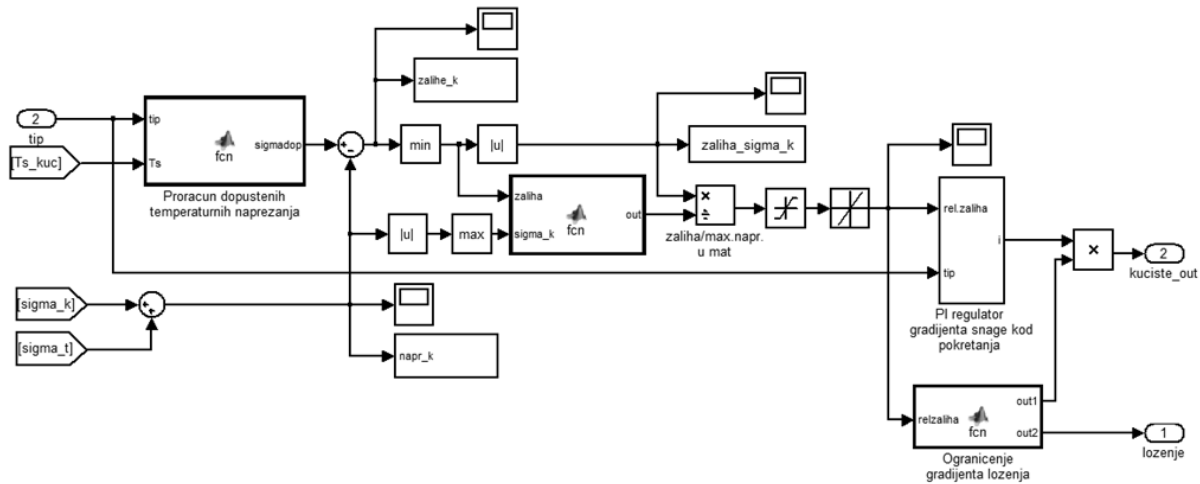
Radi se dakle o sustavu gdje se na nadređenoj razini vođenja bloka nastoji utjecati na cjelokupnu strategiju vođenja i regulacije bloka na način da se paralelno s varijabilnim pogonom vrše dinamičke simulacije za procjenu naprezanja kritičnih dijelova turbine i kućišta. Temeljem tih podataka računaju se ograničenja glede brzine promjene zadanih vrijednosti vođenih veličina procesa. Sklop za nadzor turbinskih naprezanja zajedno s nadređenim sustavom regulacije mora omogućiti podređenim regulacijskim krugovima vođenje zahtijevanog signala snage bloka.



Slika 32. Blok dijagram programa za nadzor turbinskih naprezanja [10]



Modul prikazan na Slika 32 osigurava siguran start turbine kao i promjene opterećenja dok drži toplinska naprezanja na minimumu. Na temelju prethodne slike modelirati će se sustav nadzor turbinskih naprezanja.



**Slika 33. Ograničenje porasta snage kod promjene opterećenja bloka**

Na slici 33 prikazan je sklop za nadzor turbinskih naprezanja u kućištu. Sličan sklop se koristi i kod nadzor naprezanja u rotoru, samo što on nema dodatni proračun tlačnih naprezanja jer se ona kod rotora zanemaruju. Ulazni podaci su srednja temperatura rotora  $T_{sr\_rot}$  dobivena dinamičkom simulacijom, površinska temperatura rotora  $T_{s\_kuc}$ , tip pogona  $tip$ , polje naprezanja u slojevima materijala rotora  $\sigma_k$ , kao i tlačna naprezanja u kućištu  $\sigma_t$ . Tlačna naprezanja dobivena su također pomoću dinamičke simulacije u računalu naprezanja. Sklop na temelju ulaznih podataka temperature pare i matematičkog modela progrijavanja kućišta računa dopuštene temperaturne razlike i naprezanja iz čega se dalje računaju raspoložive zalihe naprezanja koje se još mogu ostvariti u pogonu. Za regulaciju gradijenta snage je ugrađen PI regulator koji prati omjer zaliha naprezanja i maksimalnog naprezanja u materijalu. Regulator je postavljen tako da će pojačavati svoje djelovanje u cijelom području rada, osim kada se omjer zaliha i maksimalnih naprezanja smanji ispod određenog postotka koji se definira u obliku regulirane veličine u PI regulatoru. Obično postavna vrijednost relativne zalihe naprezanja iznosi 20%.

Signal ograničenja porasta snage  $kuciste\_out$  prosljeđuje signal zajedno sa sličnim signalom  $rotor\_out$  iz identičnog sklopa za nadzor turbinskih naprezanja u rotoru dalje u nadređeni sustav regulacije u podsklop koji proračunava u kojoj komponenti bloka (rotoru ili kućištu) je manja raspoloživa zaliha naprezanja, te uzima tu vrijednosti kao referentu proračunatu i šalje ju u sklop za vođenje zadane vrijednosti snage putem već spomenutih *MIN* blokova. Dodan je

i blok koji direktno djeluje na podređeni regulacijski sustav loženja. Ukoliko postavna vrijednost relativnih zaliha padne ispod 20% ovaj sklop obustavlja daljnji porast loženja bloka uslijed čega uskoro dolazi do stacioniranja snage, a u konačnici i temperatura debelostijenih komponenti.

## 9. SIMULACIJA POKRETANJA TURBINE

Kao što je već navedeno u radu, postoje tri vrste starta turbine: hladni, topli i vruć. U ovom poglavlju izvršene su simulacije upuštanja u pogon. Krucijalne razlike između pojedinih tipova pokretanja su razlike u vremenu potrebnom za dostizanje punog opterećenja bloka, te ukupni utjecaj na preostali životni vijek bloka. Naime, što je veća razlika između toplinskih stanja pri varijabilnom pogonu bloka više će se utjecati na trošenje komponenti bloka.

Da bi se osigurao rad i pouzdanost sustava kod faze individualnog starta turbine neophodno je održavati određene procesne parametre u odgovarajućim granicama. To je ujedno i najkompliciranija i najopasnija faza rada parne turbine jer uključuje brojnu dodatnu opremu i pomoćne sustave, čijim se radom odvijaju brojni nestacionarni mehanički i termodinamički procesi (npr. prijelaz topline, promjenjivi protoci pare, ubrzavanje rotora, vibracije, itd.). Tijekom dugogodišnjeg vođenja pokretanja u pogon kao i razvijanja ovakvih sustava inženjeri, konstruktori i operateri su podijelili pokretanje turbine na tri segmenta:

- priprema turbine za start;
- pokretanje turbine do praznog hoda i sinkronizacija;
- opterećenje turbine električnim generatorom [11].

### 9.1. Priprema turbine za start

Priprema turbine počinje s vrtnjom rotora sa zupčanim prijenosnicima. Zupčanici su pokretani električnim ili hidrauličkim motorom. Rotor turbine mora biti termički stabiliziran, a linija otklona mora se podudarati s gravitacijskom linijom. Hlađenje rotora tijekom zastoja uslijed bržeg hlađenja stražnjeg kraja bi vodilo do trenja i oštećenja labirintnih brtvi.

Prioritet kod hladnog starta bi trebao biti rotirajući sustav koji bi uz pomoć zupčanika okretao rotor turbine što je moguće duže. Posebnu brigu potrebno je posvetiti startovima koji imaju vrijeme pripreme rotora manje od 72 h. U takvim slučajevima turboagregat bi trebao imati produženo progrijavanje na srednjim brzinama vrtnje. Vrijeme grijanja je ograničeno s postizanjem odgovarajućih dinamičkih stanja tijekom kontinuiranog pokretanja.

Pogonski stroj se može isključiti kada su najviše temperature VT i ST unutarnjeg kućišta niže od 100 °C. Ako je potrebno, pogonski stroj se može isključiti na 15 minuta nakon jednog dana vrtnje, odnosno na 30 minuta nakon 2 dana vrtnje u slučaju da se javljaju neki problemi

primjerice u kondenzatoru i parnom privodu. Maksimalno vrijeme mirovanja pokretnog stroja ovisi o tipu turbine.

## 9.2. Pokretanje turbine do praznog hoda i sinkronizacija

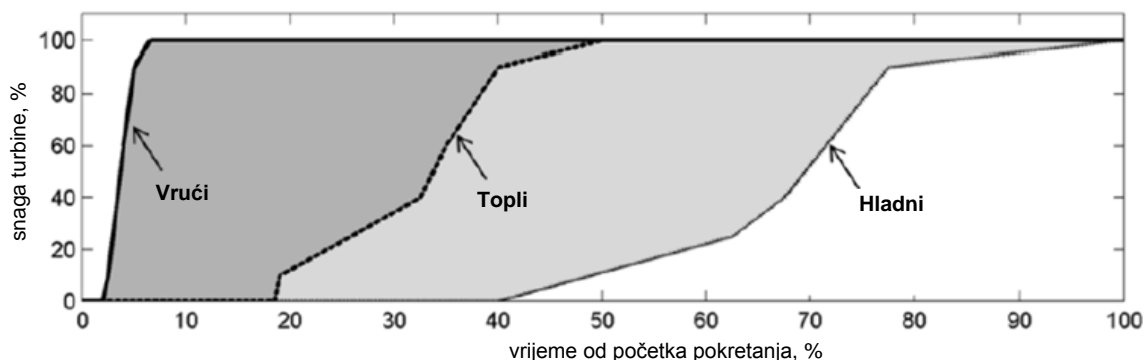
Faza pokretanja može se podijeliti na tri skupine, a one ovise o temperaturama VT i ST kućišta. Brojni autori navode različite iznose temperatura materijala kod pokretanja, a ovdje će se spomenuti pokretanja prema [11]:

- **hladni start:** kada je temperatura VT i ST unutarnjeg kućišta niža ili jednaka 170°C,
- **topli start:** kada je temperatura VT i ST unutarnjeg kućišta niža ili jednaka 430°C,
- **vrući start:** kada je temperatura VT i ST unutarnjeg kućišta veća od 430°C.

Krucijalne razlike između navedenih tipova pokretanja su u vremenu potrebnom za dostizanje punog opterećenja. Također, različiti su protoci goriva, pare, tlakovi svježih pare i brojni drugi parametri.

Hladni start se obično javlja nakon 5 - 6 dana mirovanja. Razlika između gore navedenih tipova pokretanja turbine je u tome da u prvom slučaju dobavljena para u turbinu ima veću temperaturu nego metal kućišta, dok u zadnja dva slučaja, ovisno o karakteristikama kotla, temperatura pare može biti niža ili viša od temperature kućišta.

U praksi se vrijeme pokretanja određuje ili putem nadzora turbinskih naprezanja koji uživo proračunavaju dozvoljene gradijente porasta procesnih veličina ili putem definiranih krivulja pokretanja. Krivulje pokretanja daju detaljan raspored gradijenata kako bi turbina u najkraćem roku i što „bezbolnije“ dosegla puno opterećenje. Krivulje pokretanja se rade od strane proizvođača koji rade proračune na temelju geometrije debelostijenih komponenti. Na Slika 33 prikazan je primjer krivulja pokretanja.



Slika 34. Krivulje pokretanja kod vrućeg, toplog i hladnog starta [3]

U praksi se mjerenjem temperature kućišta u više točaka određuje koja će se krivulja koristiti za upuštanje. Prioritet se određuje prema najnižoj izmjerenoj temperaturi. [3] Što je turbina toplija, to će dakle i pokretanje u pogon biti brže.

## 9.2. Hladni start

Kako bi se zaštitilo turbinu i kućište od pucanja, određene su minimalne temperature za dani materijal u poglavlju 7.3. Proračun dopuštenih razlika temperatura koje treba poštovati prilikom bilo kojeg tipa pokretanja.

Za razliku od generatora pare, gdje hladni start može biti s temperaturom i tlakom vode na razini okoliša, za hladni start turbine pregrijana i međupregrijana para moraju biti stabilizirane i iznositi barem  $50^{\circ}\text{C}$  više od temperature zasićenja što bi primjerice za tlak pare od 50 bar iznosilo minimalno  $315^{\circ}\text{C}$ .

Pokretanje turbine iz hladnog stanja, koje ima uobičajene parametre svježje pare na ulazu  $535^{\circ}\text{C} / 180 \text{ bar}$ , trebalo bi biti provedeno sa sljedećim početnim parametrima pare:

- svježja para:  $p = 50 \text{ bar}$ ,  $T = 350 \text{ do } 425^{\circ}\text{C}$ ,
- međupregrijana para:  $p = 8 \text{ bar}$ ,  $T = 350 \text{ do } 400^{\circ}\text{C}$  [11].

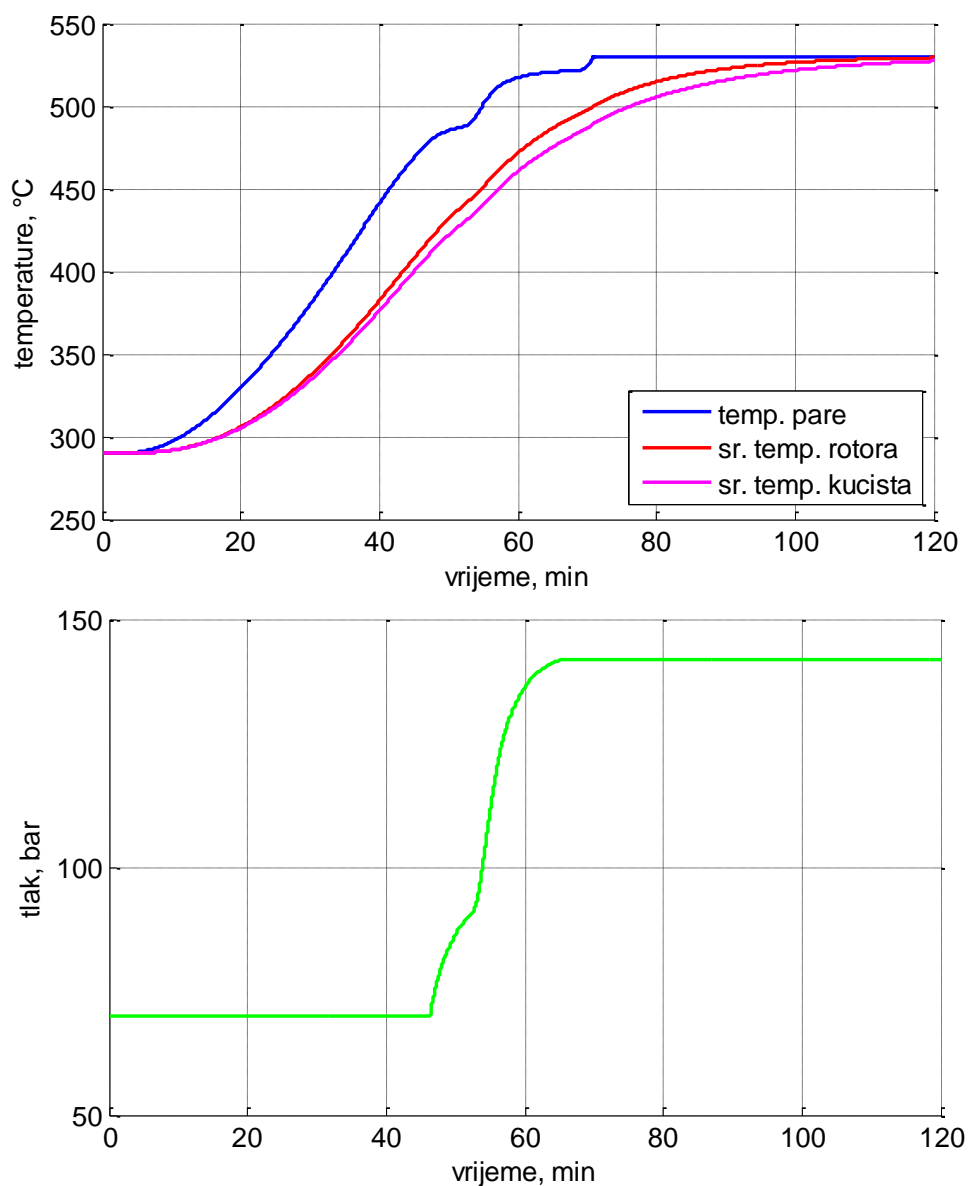
Nakon što se postigne odgovarajući vakuum u kondenzatoru i nakon što se provjeri jesu li ekscentar rotora i njegova diferencijalna ekspanzija unutar dozvoljenih granica može se početi otvarati VT i ST ventile i propuštati paru u turbinu. U regulatoru brzine vrtnje definira se željena brzina na primjerice  $3000 \text{ min}^{-1}$  i brzina porasta od primjerice  $75 \text{ min}^{-2}$ . Ukoliko je dinamičko ponašanje rotora takvo da unutar definiranog raspona brzina postoji kritična brzina vrtnje ne smije se dogoditi situacija da sustav gasi ili smanjuje brzinu porasta na toj razini, već mora prijeći kritičnu brzinu vrtnje pa tek onda usporiti daljnji porast brzine vrtnje. Što se tiče

propuštanja pare kod pokretanja, ono se može provesti propuštanjem pare kroz VT, ST i NT ventile, ali može se i mimovodom propuštati samo kroz jedan od tih ventila, npr. VT, kako bi se osiguralo optimalne uvjete pokretanja.

### 9.2.1. Simulacija hladnog starta

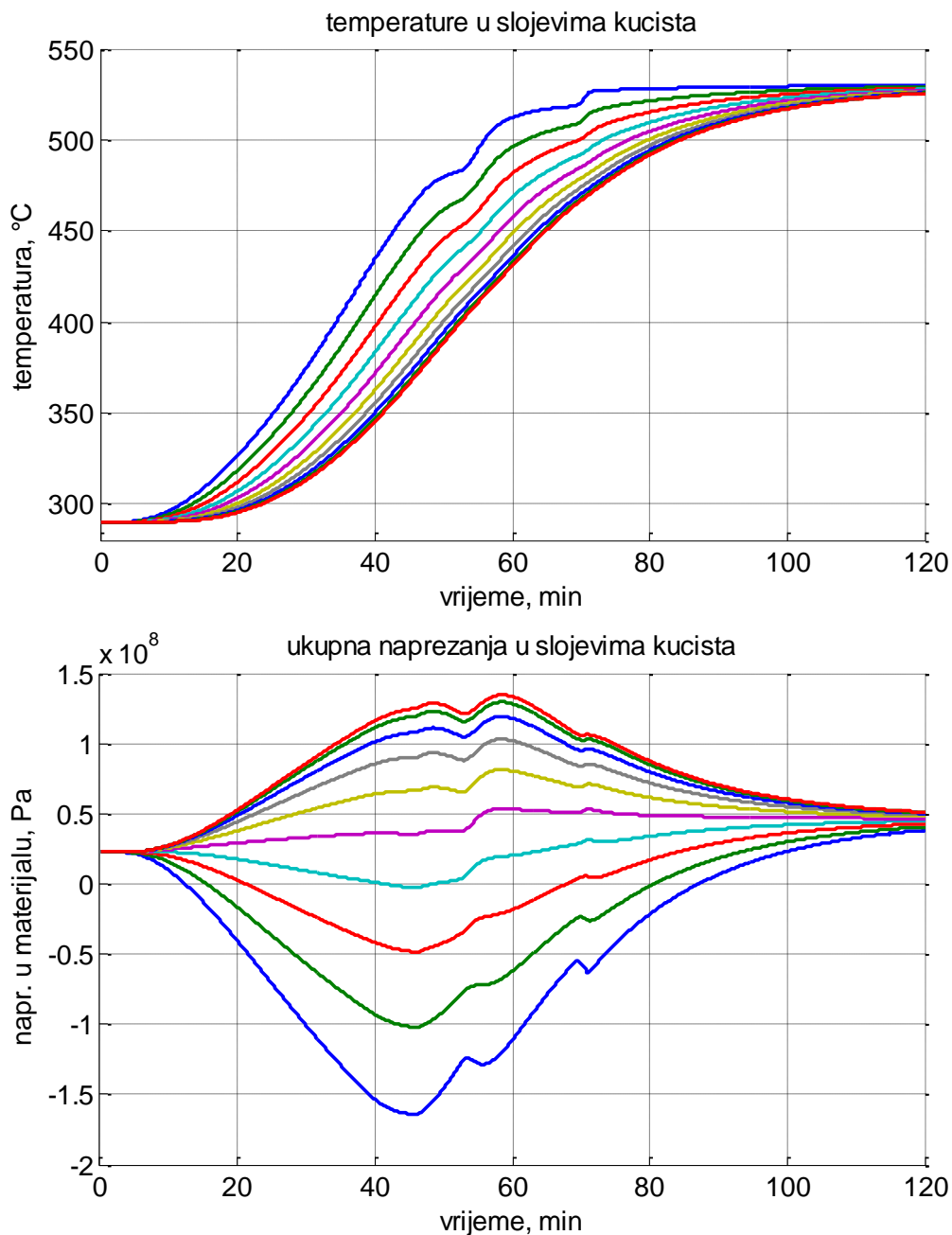
Na temelju izvedenog matematičkog modela i danih uvjeta izvršena je simulacija hladnog starta turbine. Slika 35 prikazuje rezultate simulacije pokretanja turbine iz hladnog stanja.

Temperatura pare na početku simulacije je jednaka temperaturi rotora i iznosila je 290°C. Tijekom prijelaznih pojava razlika se povećavala što je rezultiralo povećanjem toplinskih napreznja. Regulacija tlaka namještena je da održava tlak od 70 bar do temperature pare 500°C odnosno da ga nakon toga počne povećavati, kao što je prikazano na Slika 35 dolje.



**Slika 35. Hladni start turbine**

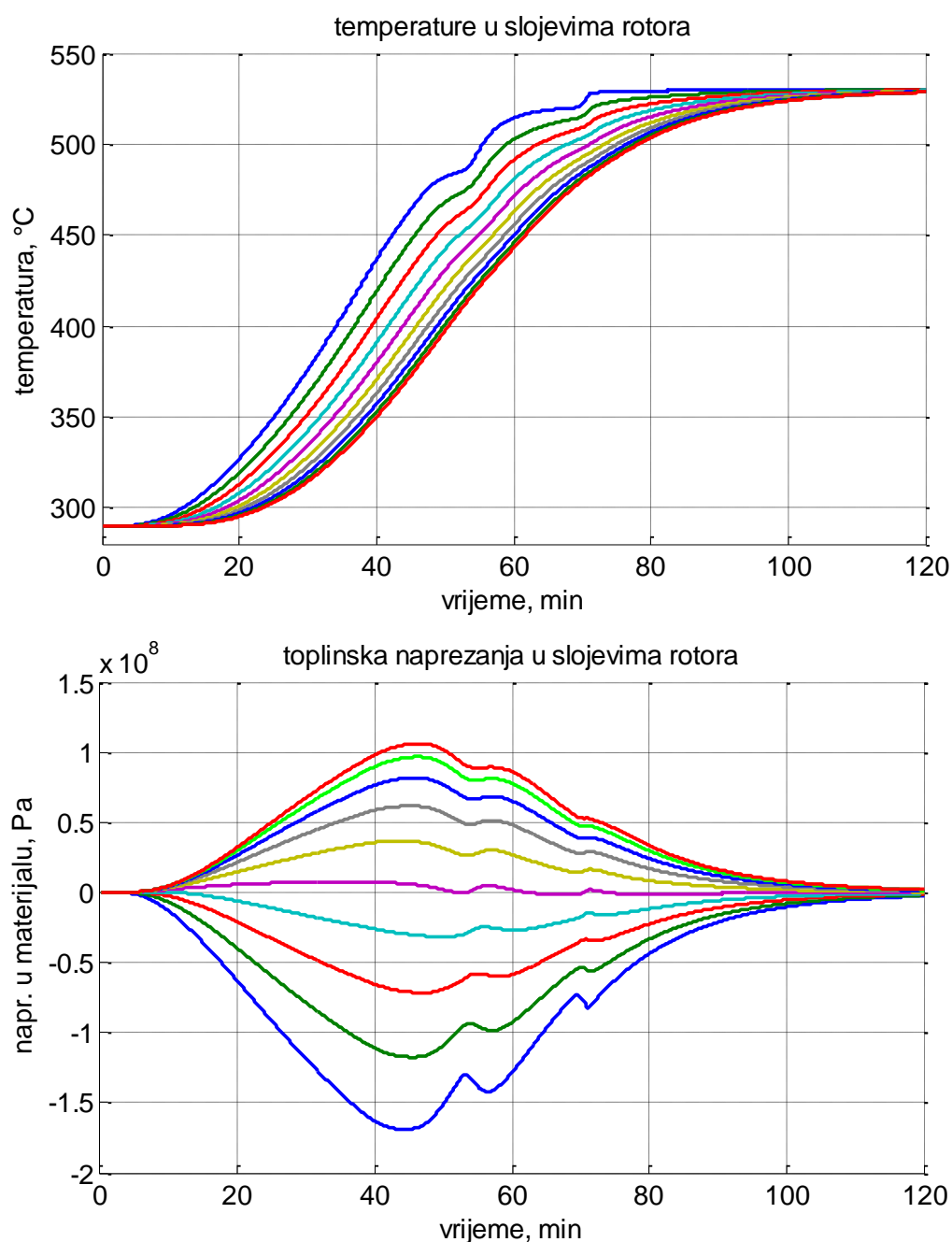
Iz rezultata simulacije može se vidjeti da se kućište nešto sporije progrijava. Također, ono je tlačno opterećeno tako da će se na promjene tlačnih napreznja dodavati toplinska napreznja za vrijeme prijelaznih pojava. Vrijeme starta iznosi približno 70 minuta.



**Slika 36. Temperature i ukupna napreznja u slojevima kućišta kod hladnog starta**

Slika 36 prikazuje promjenu temperature i napreznja u slojevima rotora. U prvoj polovici dijagrama temperature imaju veći gradijent te se zbog toga javljaju veća toplinska napreznja u slojevima rotora. Također, može se uočiti da se radna tlačna napreznja s porastom tlaka

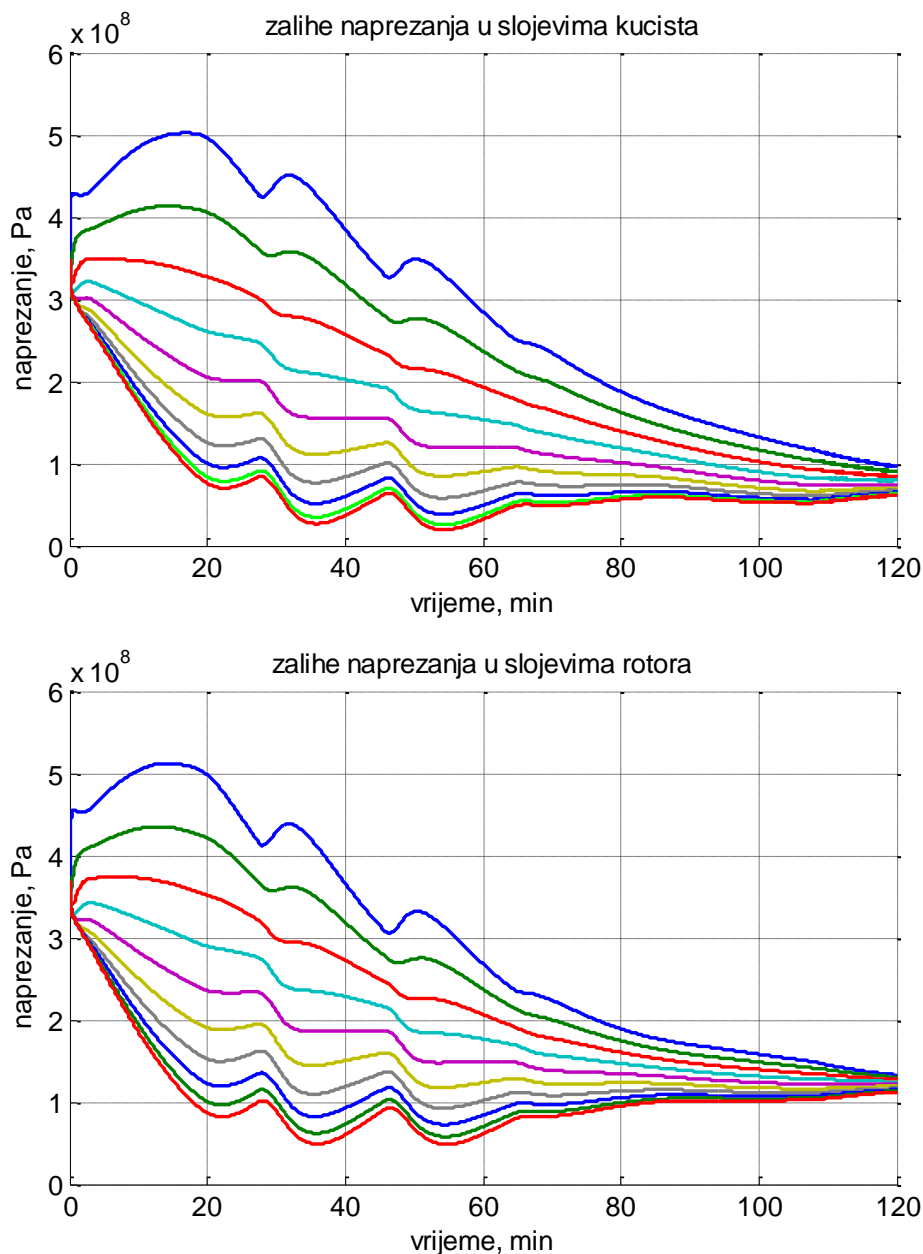
počinju superponirati na toplinska, ali kako su red veličine manja, ne utječu previše na ukupna naprezanja u materijalu rotora koja nakon 60-te minute počinju iščezavati.



**Slika 37. Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod hladnog starta**

Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod hladnog starta prikazani su na slici 37. Kod rotora postoje samo toplinska naprezanja jer se tlačna naprezanja zanemaruju. Najveća su u 20. minuti kada se javlja najveća razlika temperature između pare i stjenke rotora. Može se vidjeti da ubrzo nakon toga sustav kontrole turbinskih naprezanja reagira i utječe na usporavanje porasta gradijenta temperature.





**Slika 38. Usporedba zaliha naprezanja kod hladnog starta**

Kao što se može vidjeti na Slika 38, zalihe naprezanja kod kućišta su nešto niže nakon postizanja punog opterećenja. To je posljedica rasta tlaka odnosno tlačnih naprezanja s opterećenjem dok istovremeno toplinska naprezanja iščezavaju. Kućište je kritičnija deblostijena komponenta od rotora i u ovom slučaju.

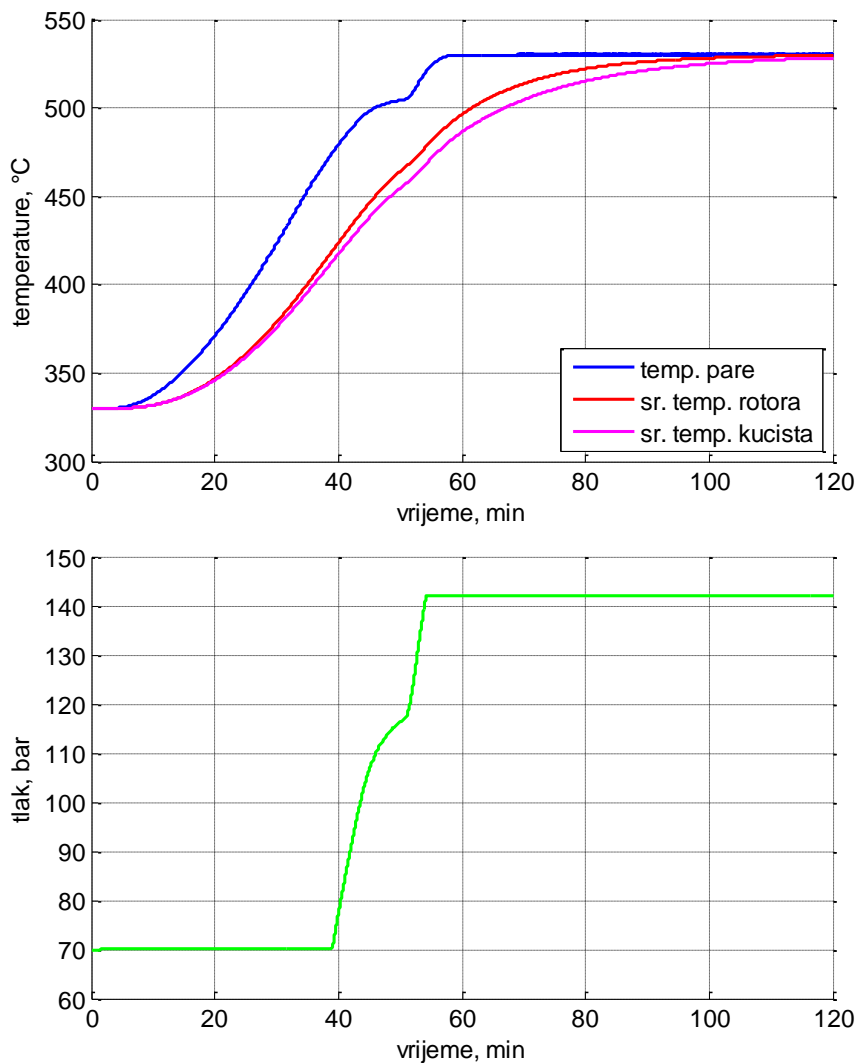
Isto tako može se vidjeti da za vrijeme nametnutog režima promjene temperature zalihe naprezanja nisu potrošene. To znači da se u teoriji može provesti hladni start turbine snage 210 MW s početne temperature rotora i kućišta  $200^{\circ}\text{C}$  na  $530^{\circ}\text{C}$  za dva sata bez prekoračenja dopuštenih naprezanja.

### 9.3. Topli start

Topli start turbine, kao i vrući, podrazumijeva pokretanje u kojem generator pare dovoljno topao da može odmah u startu početi isporučivati paru s visokim parametrima tlaka i temperature. Time se omogućuje brže upuštanje u pogon u odnosu na hladni start.

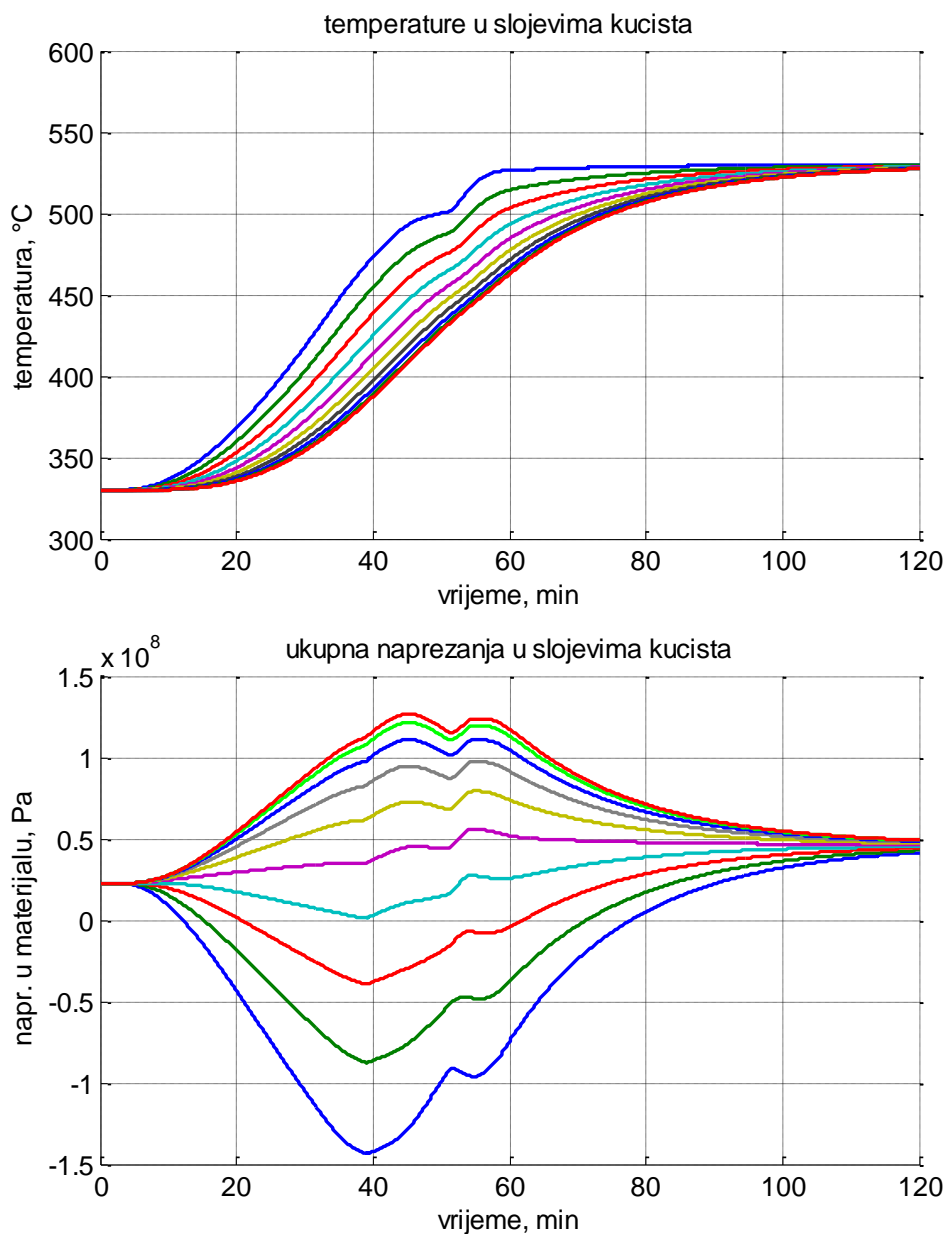
#### 9.3.1. Simulacija toplog starta

Za simulaciju toplog starta odabrani su sljedeći početni uvjeti: temperature slojeva rotora i kućišta jednake su temperaturi pare 330 °C. Gradijent temperatura biva nadziran od strane sustava nadzora turbinskih naprežanja koja će ga spustiti ukoliko će progrijavanje biti prebrzo. Regulator tlaka je namješten da mijenja tlak po krivulji na slici 39. Tlak je u početku simulacije na 70 bar, te se u rasponu temperatura od 450 do 500 °C mijenja do konačnih 142 bar.

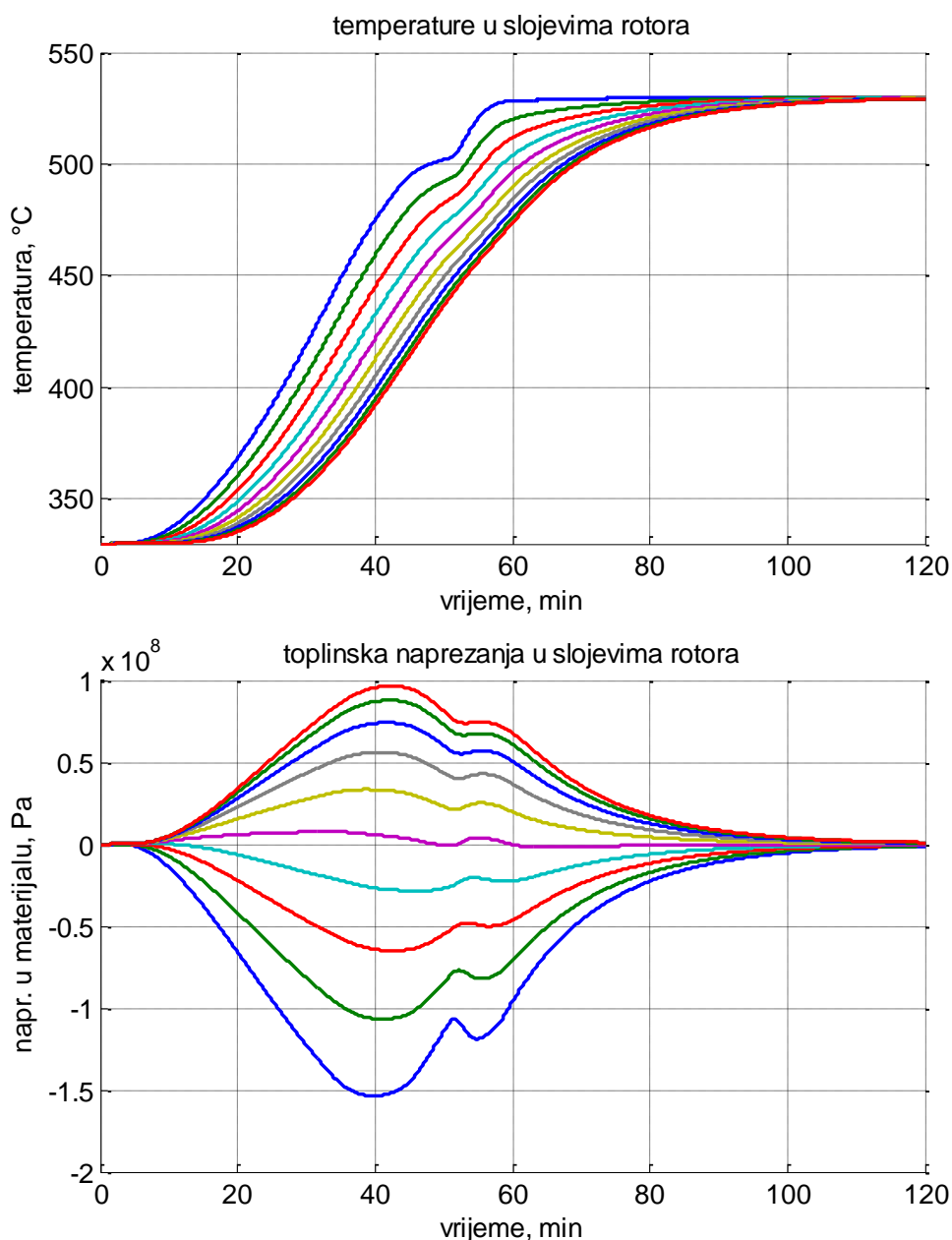


**Slika 39. Topli start turbine**

Slika 39. Topli start turbine pokazuje da topli start turbine s temperature 330 °C traje oko sat vremena. Na slikama 40 i 41 prikazane su temperature i naprezanja u slojevima u kućištu i rotoru.

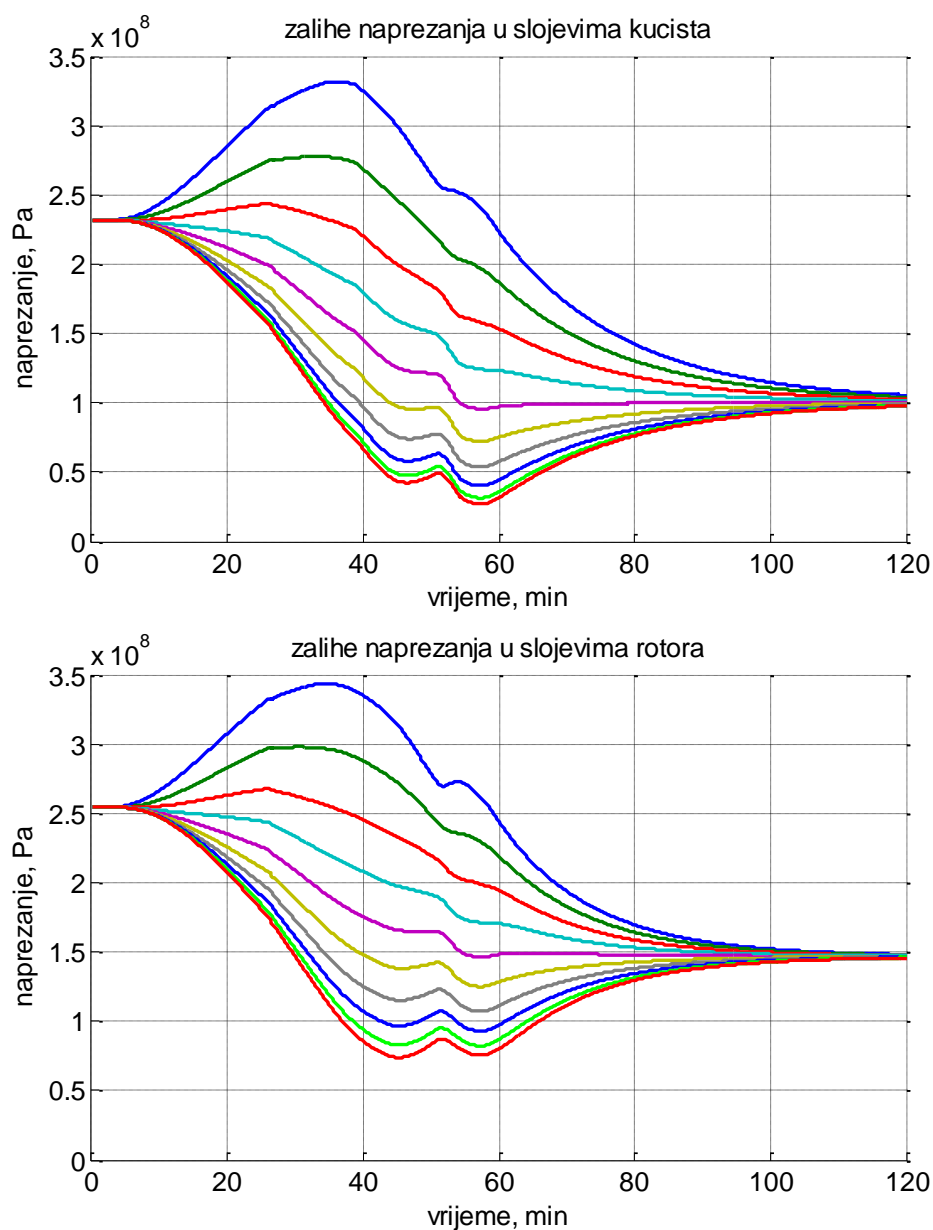
**Slika 40. Temperature i ukupna naprezanja u slojevima kućišta kod toplog starta**

Na slici 40 se može vidjeti da su tlačna naprezanja u kućištu za red veličine manja od ukupnih naprezanja tijekom prijelaznih pojava. Nakon uspostave novog stacionarnog stanja, na kućište ostaju djelovati samo radna tlačna naprezanja.



**Slika 41. Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod toplog starta**

Temperature slojeva u početnom trenutku su bile jednake temperaturi pare. Nakon toga loženje se intenzivira i dolazi do povećavanja temperaturnih razlika između pare i slojeva materijala, te se toplinska naprezanja povećavaju do 40 min, nakon čega se aktivira sustav za nadzor turbinskih naprezanja. Kroz nekoliko minuta, nakon dinamičkog odziva bloka na promjene ulaznih varijabli goriva i napojne vode, gradijent temperature pare se počinje smanjivati nakon čega toplinska naprezanja počinju opadati. Kako se uskoro doseže stacionarna željena temperatura, toplinska naprezanja počinju iščezavati.



**Slika 42. Usporedba zaliha napreznja kod toplog starta**

Slika 42 lijepo prikazuje promjenu zaliha napreznja kod toplog starta turbine, tijekom prelaska iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Za vrijeme trajanja prijelaznih pojava događa se situacija da se zalihe napreznja počinju smanjivati, ali oko 50. minute sustav za nadzor napreznja reagira i usporava daljnje napredovanje gradijenata temperature odnosno toplinskih napreznja putem odgovarajućeg djelovanja u nadređenom sustavu regulacije i podređenih regulacijskih krugova.

#### 9.4. Vrući start

Ubrzavanje turbine i opterećivanje mora biti brže nego u hladnog starta kako bi se izbjeglo nedopušteno hlađenje turbine. Ubrzavanje treba biti oko 250 do 300 min<sup>-2</sup>. Tijekom pokretanja treba se pratiti očitavanja s temperaturnih sondi kao i diferencijalnu ekspanziju kako ne bi prešle dozvoljene iznose. Tipično je za ovu vrstu pokretanja turbine na brzinu od 3000 min<sup>-1</sup> potrebno približno 10 min. Nakon što se dosegne željenu brzinu, turboagregat je spreman za sinkronizaciju s mrežom što automatika sama obavlja opterećujući turboagregat s nekim minimalnim postotkom nominalnog opterećenja.

Neovisno o vrsti pokretanja moraju se pratiti i temperature ležajeva. Vrijeme ubrzavanja s nominalnim parametrima pare ne bi trebalo prijeći 30 min, a temperatura na ulazu u VT turbinu ne bi trebala biti viša od 430 do 450 °C.

Povećanje opterećenja je obično vođeno prema nadležnom sustavu regulacije, a ovisi o povećanju tlaka svježeh pare i postupnom otvaranju turbinskih ventila. Nominalno opterećenje se postiže kada se zadnji ventil koji je djelomično pritivoren omogućuje regulaciju snage iznad ili ispod nominalne snage.

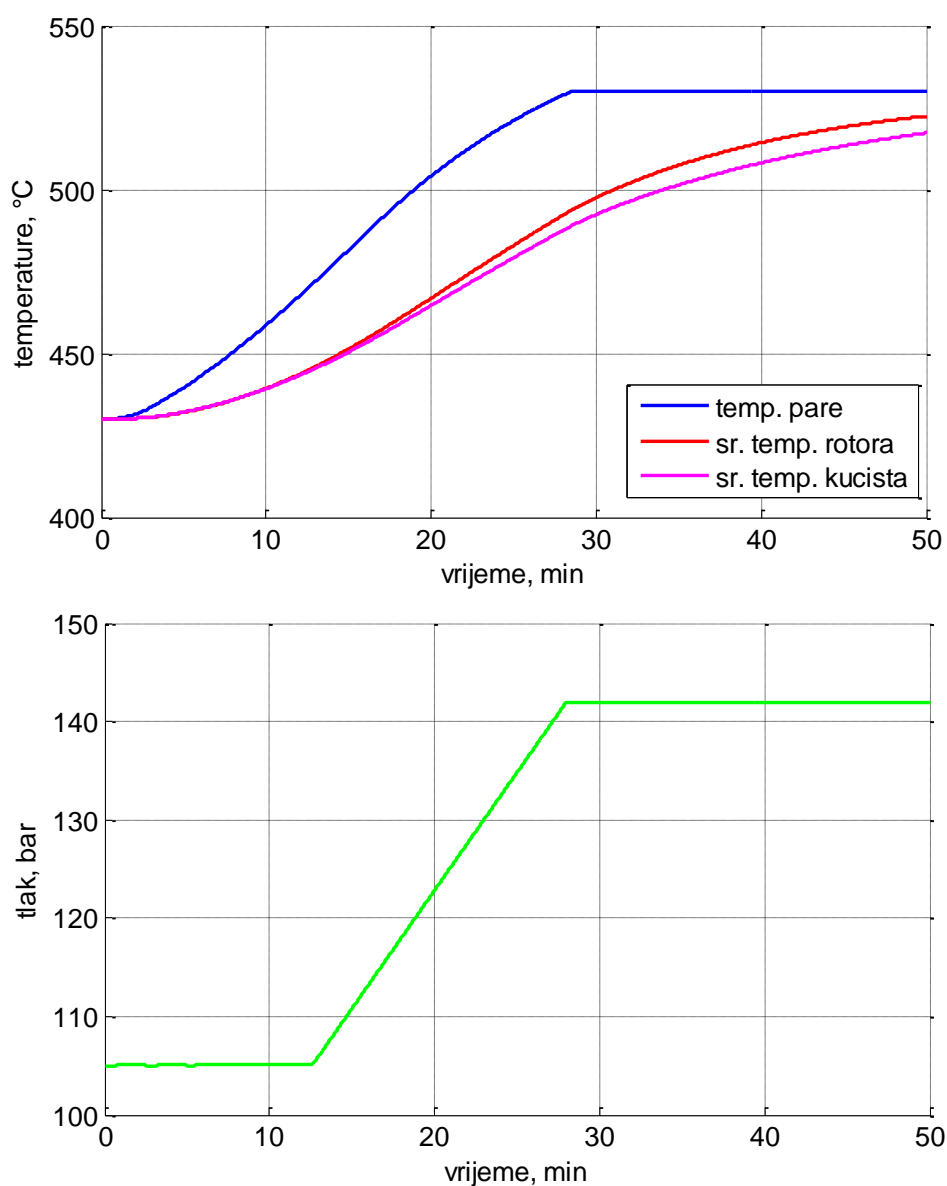
Tijekom faze opterećivanja maksimalni iznos toplinskih naprezanja smije iznositi 80%. Ukoliko je ova veličina prekoračena, opterećenje se mora smanjivati tako da se u najgorem slučaju naprezanja mogu zaustaviti na 100%. U slučaju kvara temperaturne sonde, za pokretanje se također može koristiti gradijent temperature unutarnjeg kućišta, te se vrijednost od 2 do 3 °C/min ne smije prekoračiti.

Vrući start podrazumijeva da je TE blok može proizvoditi pregrijanu paru visokih parametara. Ovo je ujedno i najbrža vrsta starta.

### 9.4.1. Simulacija vrućeg starta turbine

Za simulaciju vrućeg starta odabrani su sljedeći početni uvjeti: temperatura površine rotora i kućišta iznosi temperatura pare 430°C. Gradijent temperatura biva nadziran od strane sustava nadzora turbinskih napreznja koja će ga spustiti ukoliko će progrijavanje biti prebrzo. Regulator tlaka je namješten da mijenja tlak po krivulji na slici 43 dolje. Tlak je u početku simulacije na 105 bar, te ga regulacija mijenja do konačnih 142 bar.

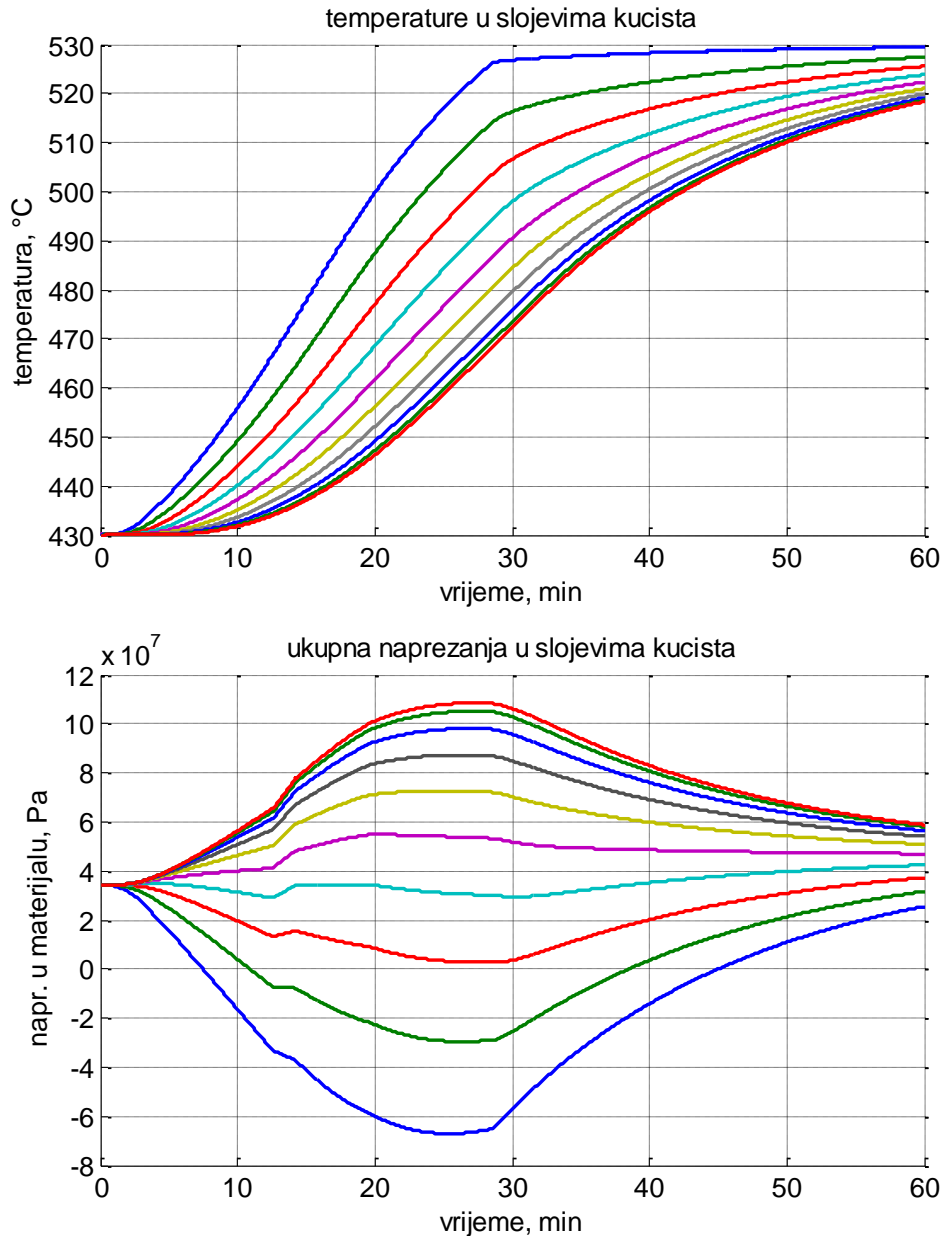
Rezultati simulacije vrućeg starta turbine prikazani su na slici. Najveća temperaturna razlika je u trenutku kada para dostiže stacionarnu temperaturu, te se tada može očekivati najveće toplinsko napreznje.



Slika 43. Vrući start turbine

Kao što se može vidjeti sa slike, temperatura pare doseže ciljani iznos za 28 minuta, te se to vrijeme može proglasiti vremenom starta.

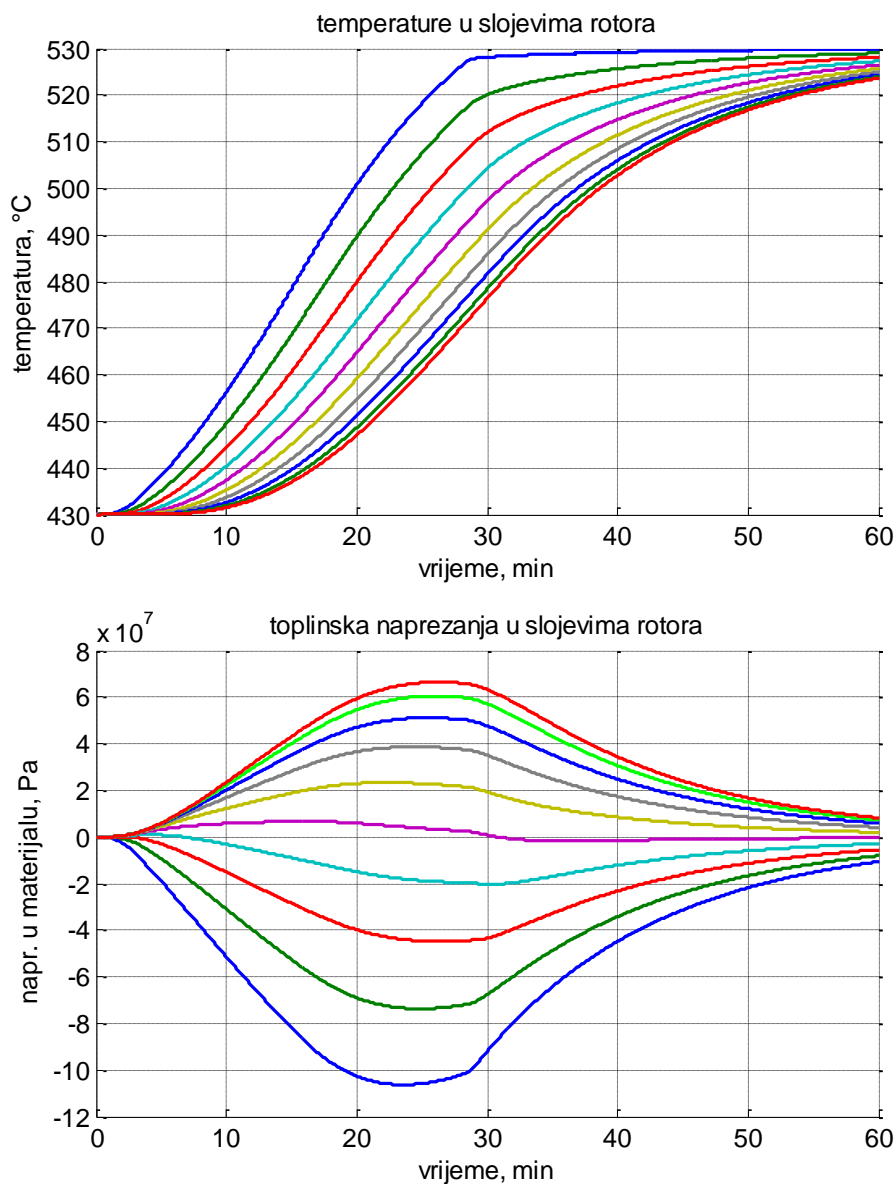
Postignut je prilično brzi start a da se nije iskoristilo zalihe napreznaja do kraja.



**Slika 44. Temperature i ukupna napreznaja u slojevima kućišta kod vrućeg starta**

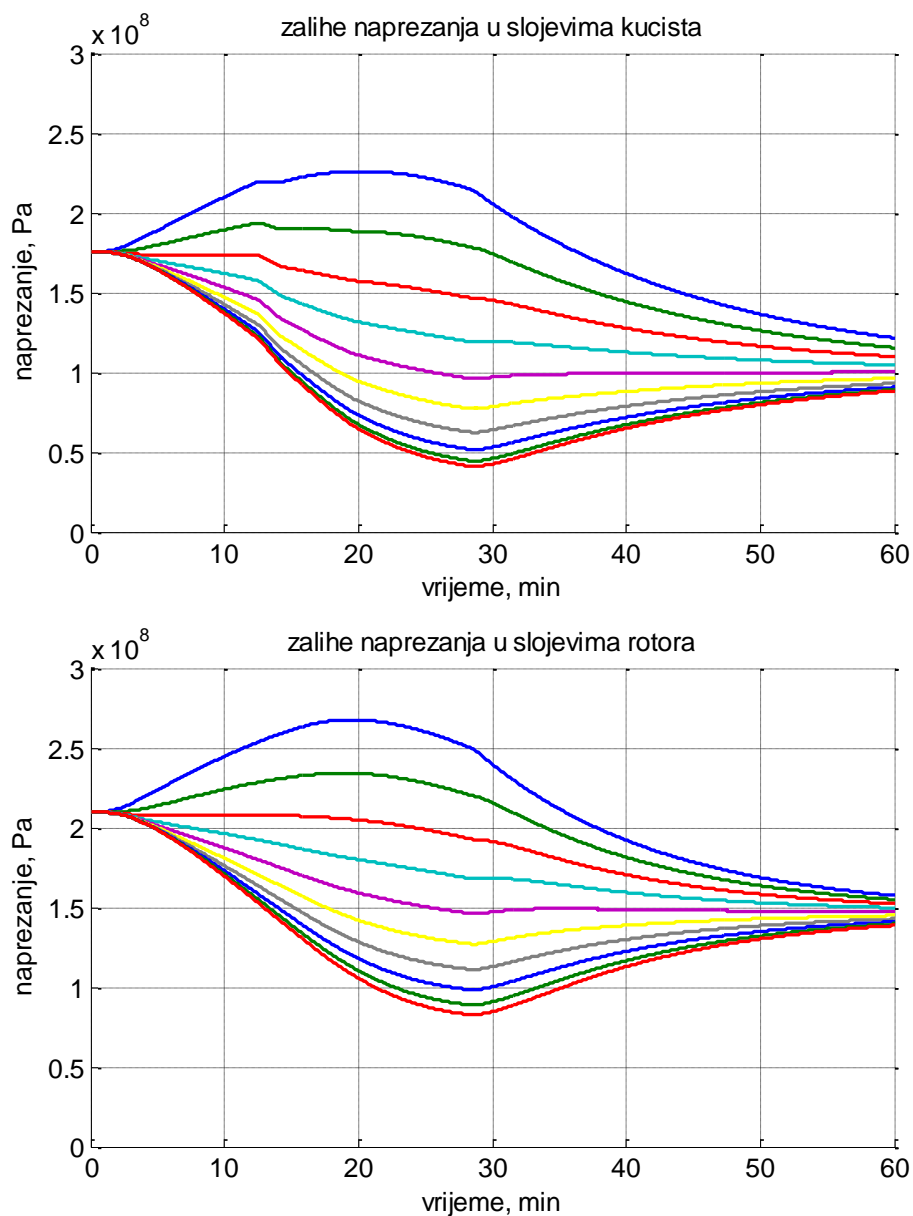
Toplinska napreznaja vjerno prate razlike temperatura, te dosežu svoj maksimum malo prije negoli temperatura pare dosegne svoj stacionarnu temperaturu, dakle oko 25. minute. Nakon toga se temperaturna napreznaja počinju smanjivati. U isto vrijeme tlak raste sa 105 na 142 bar, ali očito niti ta promjena tlačnih napreznaja ne utječe previše na ukupna radna napreznaja jer su toplinska napreznaja za red veličine viša. Nakon iščezavanja toplinskih napreznaja u materijalu ostaju samo tlačna napreznaja i iznose oko 50 MPa.





**Slika 45. Temperature i toplinska naprezanja u slojevima rotora kod vrućeg starta**

U rotoru toplinska naprezanja predstavljaju ukupna naprezanja. Zbog toga, a i zbog kontinuiranog porasta temperature u slojevima toplinska naprezanja imaju zaobljen i pravilan oblik. Ako se toplinska naprezanja u slojevima rotora kod vrućeg starta usporede s primjerice istim naprezanjima kod hladnog starta, na Slika 37, može se vidjeti da su manjeg iznosa. Dakle, vrijedi pravilo da što je turbina hladnija prilikom starta, to je veći utjecaj na smanjenje njezina preostalog životni vijek jer se javljaju puno veći ciklusi naprezanja u materijalu.



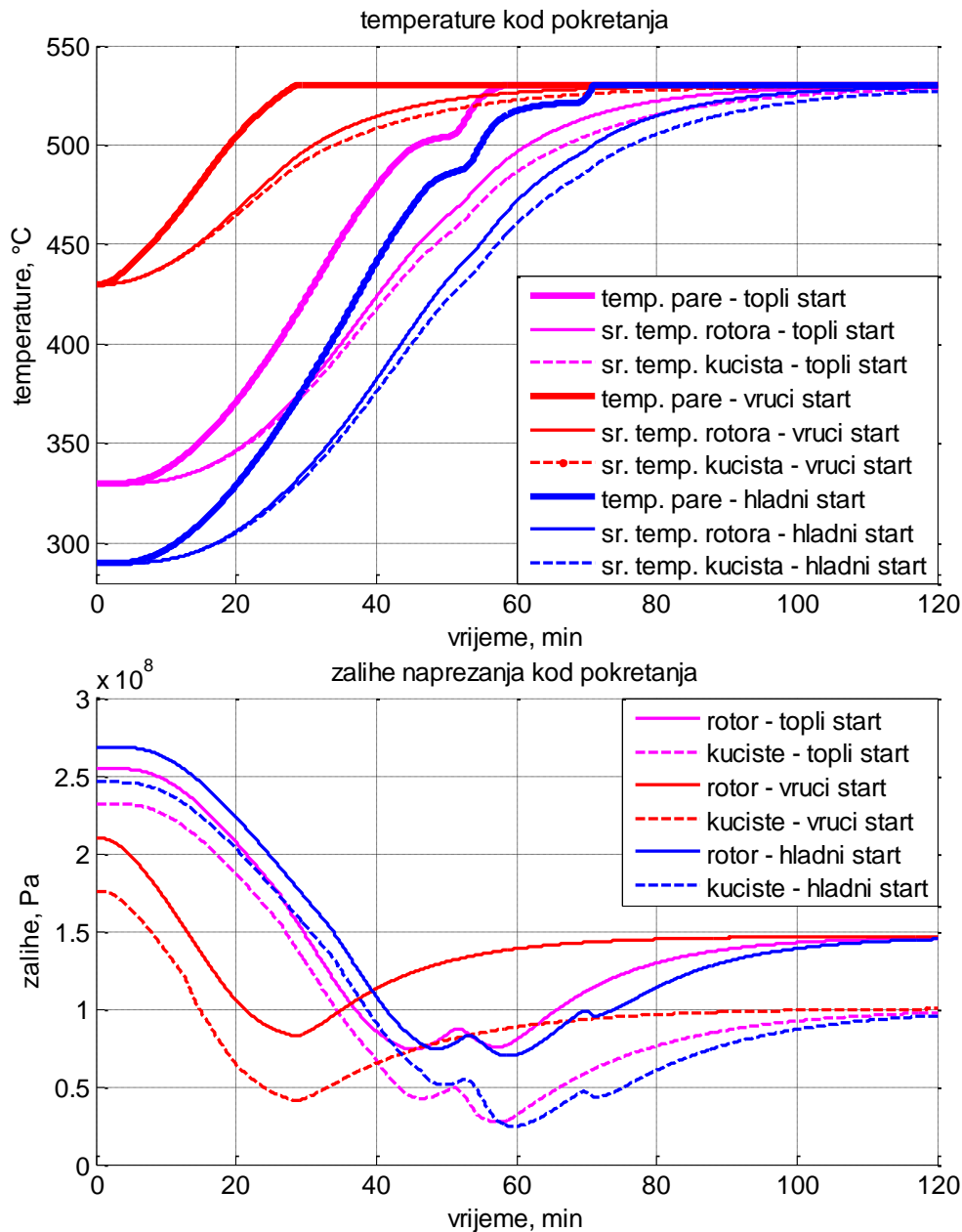
**Slika 46. Usporedba zaliha naprezanja kod vrućeg starta**

Zalihe naprezanja su očuvane tijekom vrućeg starta. I u o ovom slučaju rotor ima veće zalihe nakon uspostavljanja novog stacionarnog stanja jer je kućište opterećeno dodatnim tlačnim naprezanjima.

Vrijeme vrućeg starta turbine iznosilo je približno 30 minuta. Za vrijeme simulacije se nisu prekoračile zalihe naprezanja što znači da bi se u teoretski moglo turbinu upuštati i s većim gradijentima temperatura.

### 9.5. Usporedba zaliha napreznja kod hladnog, toplog i vrućeg starta

Nakon što su rezultati simulacije pokretanja iz hladnog, toplog i vrućeg starta prikazani u zasebnim poglavljima, ovdje su ponovno prikazani i u istom koordinatnom sustavu kako bi se lakše međusobno usporedili i interpretirali.



Slika 47. Usporedba temperatura i zaliha napreznja kod hladnog, toplog i vrućeg strata

Slika 47 prikazuje promjene temperature pare, srednjih temperatura rotora i kućišta, kao i pripadajućih zaliha napreznja u rotoru i kućištu za sve tri vrste pokretanja turbine.

Kao što je već napisao, što je start hladniji, što je potencijal smanjivanja životnog vijeka turbinskih materijala veći. Tako se iz ovih slika može vidjeti da se kod hladnog starta javlja

najveća razlika temperatura zbog čega su i velike promjene toplinskih naprezanja u materijalu naprezanja što svakako skraćuje životni vijek materijala.

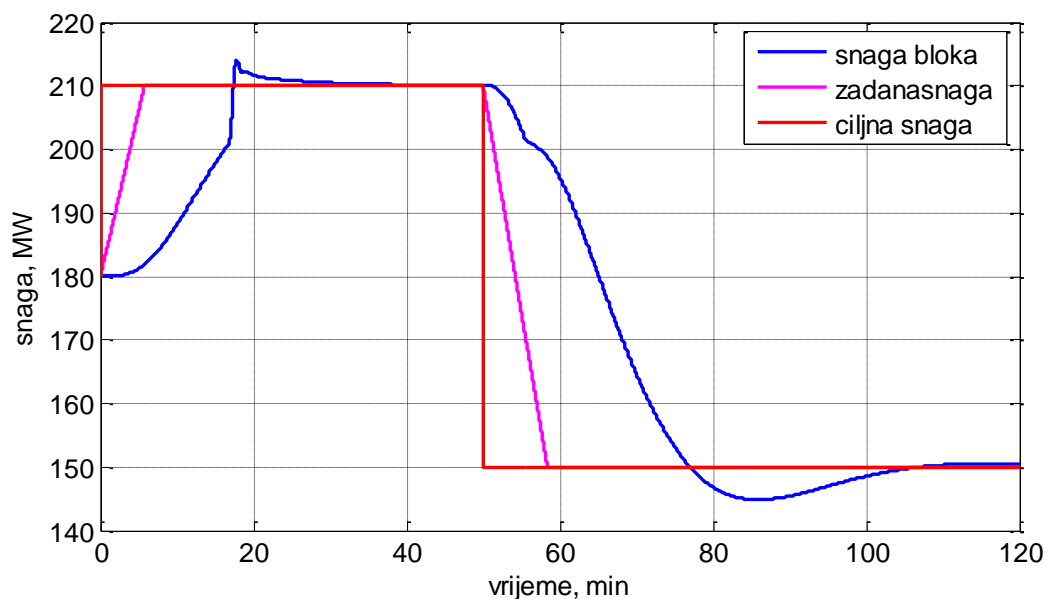
Kućište se pokazalo kao kritičnija komponenta jer mora osim tlačnih naprezanja podnositi velike promjene toplinskih naprezanja u relativno kratkom vremenu.

Ne mora se nužno prekoračiti granica dopuštenog naprezanja materijala da bi se oštetio materijal. Dovoljne su ponekad i velike amplitude toplinskih naprezanja da prouzrokuju pucanje materijala. U simulaciji hladnog starta je temperatura pare u početku bila 50°C veća od temperature materijala, te je zbog toga i bila nešto veća amplituda u samom startu, ali je zato turbina puno brže pokrenuta u pogon.

Kako start postaje topao odnosno vruć, ovisno o stanju u kojem se turbina nalazi, upuštanje u pogon postaje brže, te su manje amplitude naprezanja koje nastaju tijekom prijelaznih pojava manje što je pogodno za materijale.

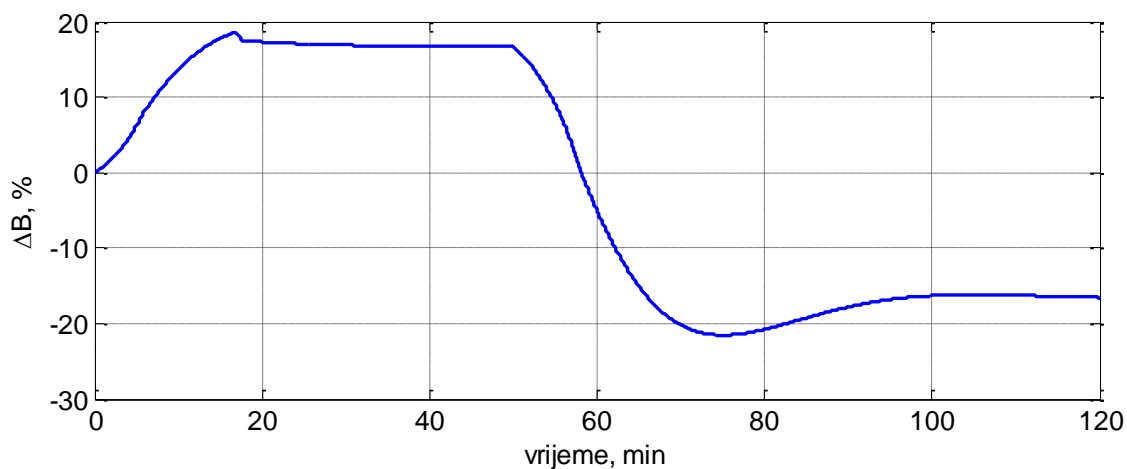
## 10. SIMULACIJA PROMJENE OPTEREĆENJA BLOKA S RAZLIČITIM GRADIJENTIMA

U ovom poglavlju izvedena je simulacija varijabilnog pogona bloka gdje se blok rasterećivao i opterećivao s različitim gradijentima snage u režimu s modificiranim kliznim tlakom. Vrijeme simulacije je 100 minuta.



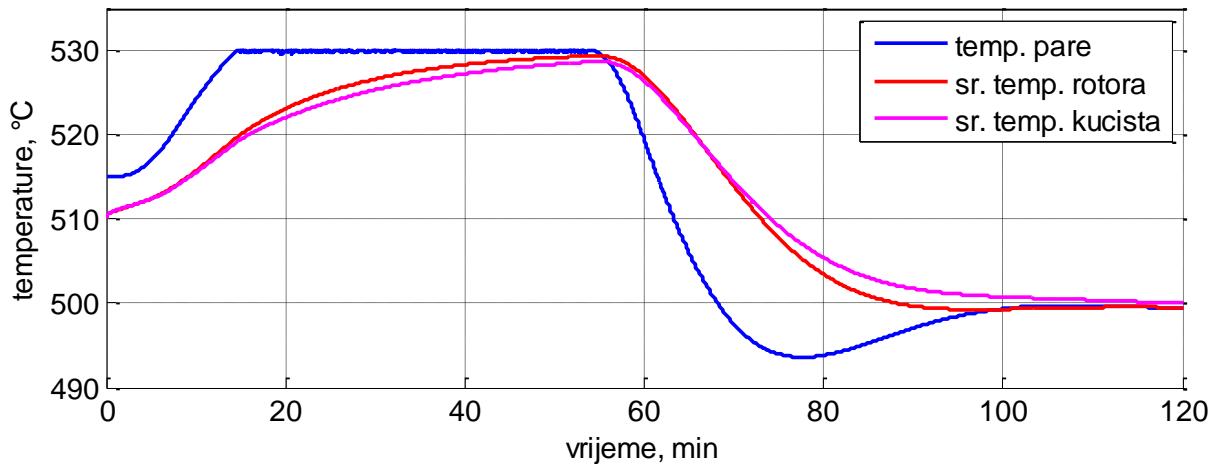
Slika 48. Promjena snage bloka s različitim gradijentima

Prvo se blok opterećivao sa 180 MW na 210 MW da bi se potom u 50. minuti snaga smanjila na 150 MW. Na slici 48 vidi se djelovanje nadređenog sustava regulacije. Zadana snaga posljedica je paralelnih proračuna koji se vode u nadređenom sustavu regulacije i na temelju kojih se vrši formiranje signala vrijednosti zadane snage.



Slika 49. Promjena intenziteta loženja

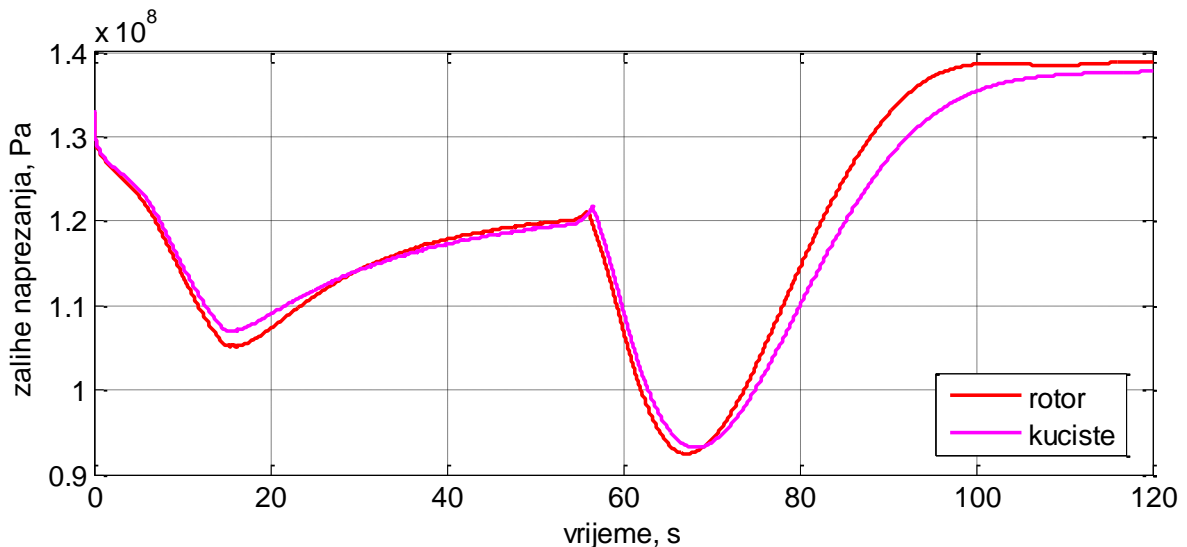
Što se tiče loženja, nadređeni sustav regulacije nije zaustavljao porast ili smanjenje njegov porast što znači da su bile i dalje dovoljno velike zalihe napreznja u materijalu.



**Slika 50. Promjena temperature pare, te srednjih temperatura rotora i kućišta**

Temperatura pare raste puno brže od srednjih temperatura rotora i stjenke, a zatim od 30 do 60 min počinje opadati uslijed čega počinje propadati i ima oblik sedla oko 80 min što nije poželjna pojava jer izaziva toplinska napreznja u materijalima. Kako se radi o razlici temperatura od 15-ak °C za vrijeme najvećeg propadanja, sustav nije niti reagirao na ovu pojavu.

Što se tiče progrijavanja rotora i kućišta, brzina provođenja topline u rotoru je očito nešto viša.

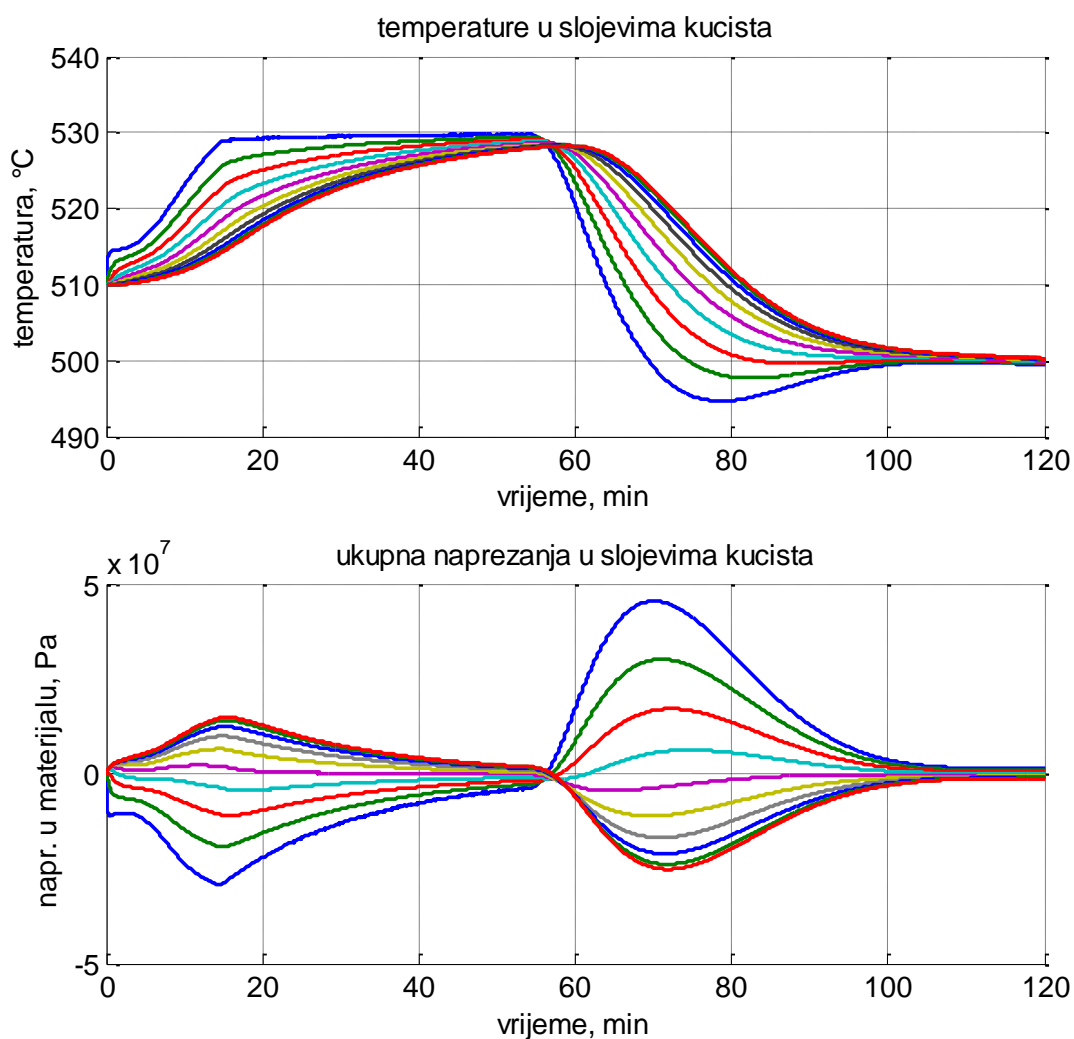


**Slika 51. Zalihe napreznja u rotoru i kućištu**

Na slici 51 prikazane su zalihe napreznja u debelostijem materijalu. Rotor ima veće zalihe koje se nisu iskoristile do kraja. Zanimljiv je drugi dio simulacije i smanjenje loženja, jer tada

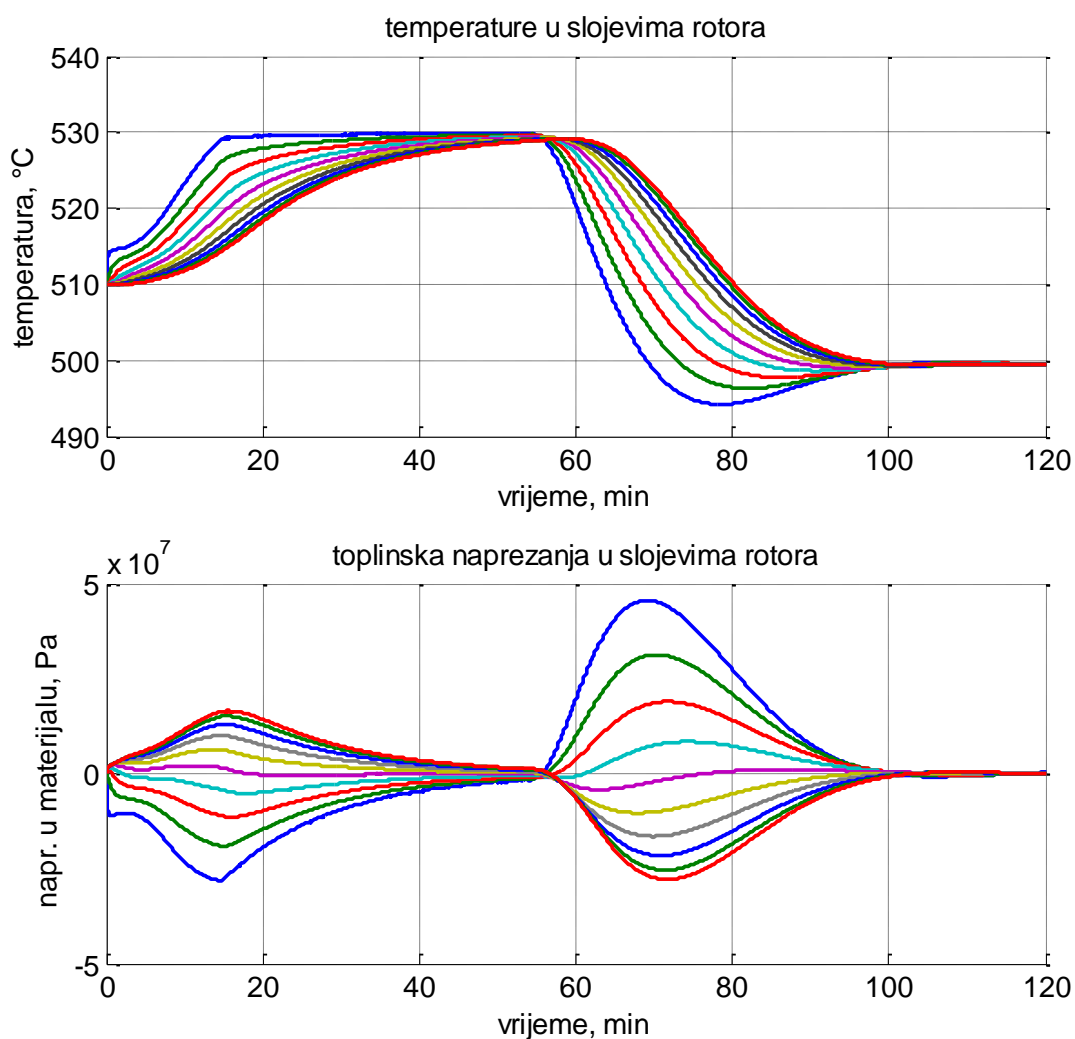
para koja se proizvodi u bloku ima nešto nižu temperature nego površinske temperature kućišta i rotora zbog čega potonji bivaju hlađeni od strane pare.

Prekomjerno smanjenje snage također nije poželjno jer izaziva velika naprezanja, a samim time i ubrzano trošenje debelostijenih komponenti.



**Slika 52. Temperature i naprezanja u slojevima rotora**

Slika 52. pokazuje da se u drugom dijelu simulacije naprezanja u materijalu intenziviraju, te da mijenjaju smjer zbog promjene temperature radnog medija u odnosu na površinsku temperaturu kućišta.



**Slika 53. Temperature i naprežanja u slojevima kućišta**

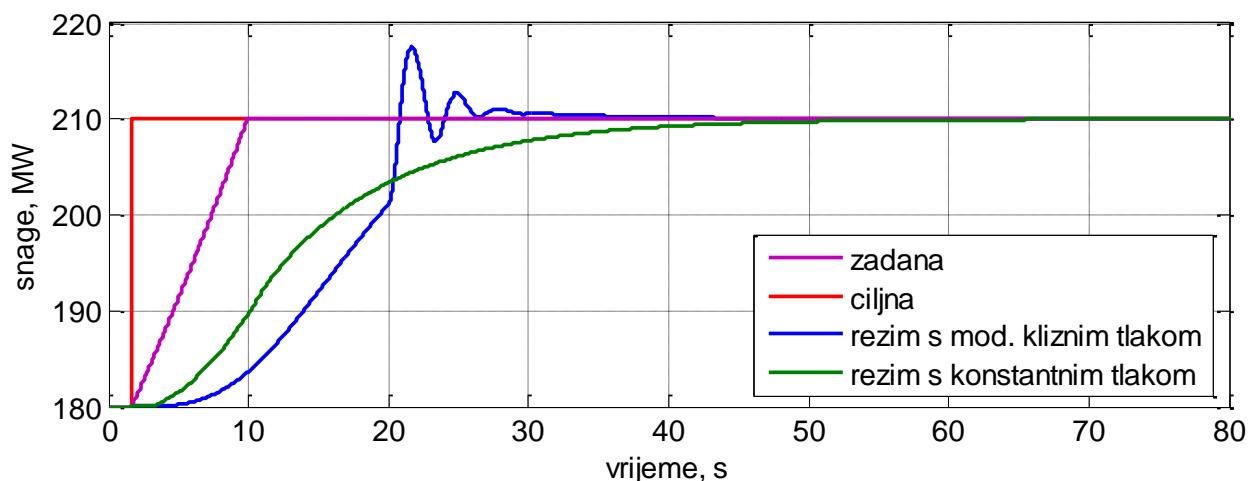
S slike 52 i 53 može se uočiti da temperature prvog sloja kućišta i rotora vrlo brzo prate dinamiku hlađenja i grijanja, te su obje vrlo sličnog uzorka, a najveća naprežanja se javljaju u prvom sloju debljastijeg materijala koji je u kontaktu s parom.



## 11. USPOREDBA STRATEGIJA VOĐENJA S KONSTANTNIM I MODIFICIRANIM KLIZNIM TLAKOM

U ovom poglavlju izvedene su simulacije pogona s konstantnim i modificiranim kliznim tlakom svježe pare u kontekstu naglog povećanja snage bloka.

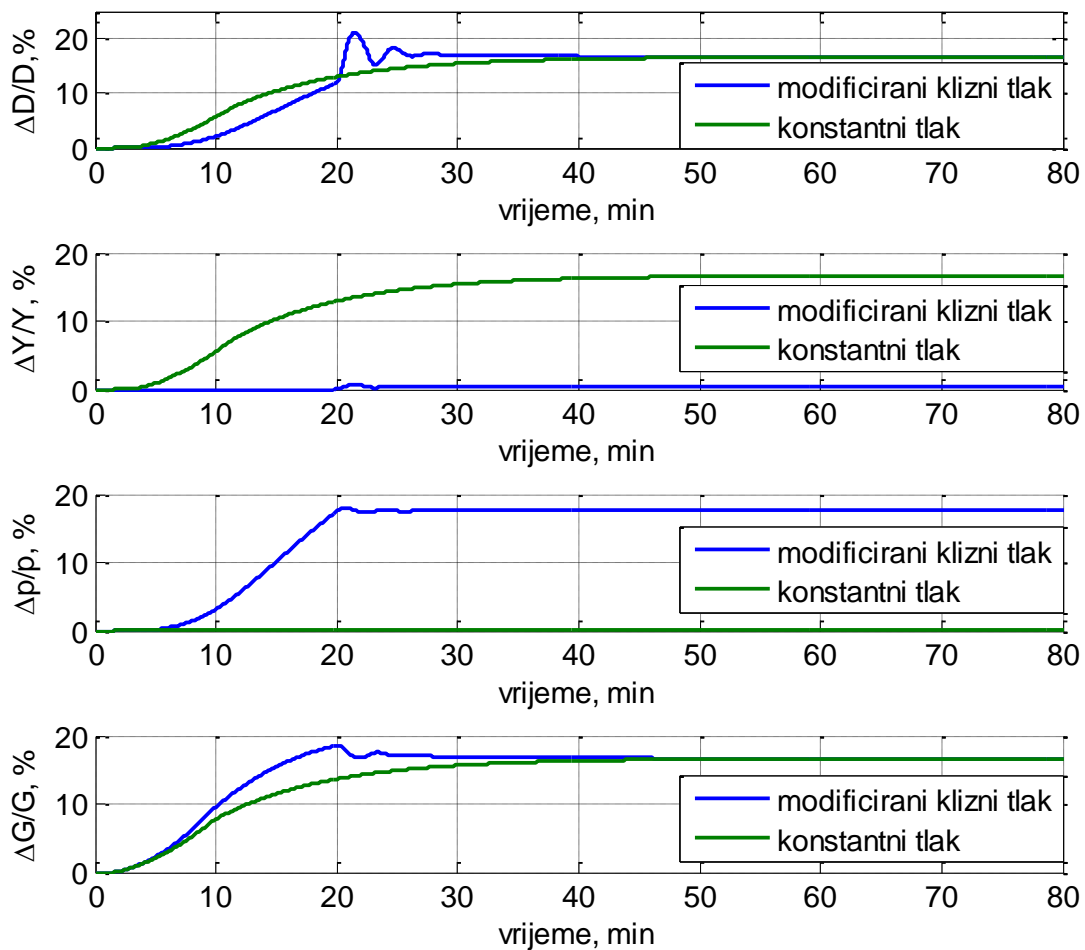
Simuliran je nagli skok ciljne snage sa 180 na 210 MW na temelju kojega se formirao signal zadane snage odnosno u konačnici i električne snage na stezaljkama generatora za oba režima rada. Nadređeni sustav regulacije vodi signal zadane snage prema prethodno definiranim algoritmima. Parametri modela u početnim trenucima obje simulacije su isti. Brzina otvaranja glavnih parnih ventila u režimu s modificiranim kliznim tlakom je prilagođena tako da ne dođe do prenog otvaranja ventila. Naime, TE blok je dinamički sustav višeg reda zbog čega se kod naglog otvaranja ventila javljaju velike oscilacije procesnih varijabli čije stacioniranje može trajati jako dugo, a sustav se tada može naći na granici stabilnosti.



Slika 54. Usporedba snaga bloka u oba režima rada

Režim rada s modificiranim kliznim tlakom specifičan je po tome što kod njega otvorenost ventila nije funkcija snage, kao što se može vidjeti na Slika 18 **Error! Reference source not found.**, već ovisi o definiranom rasponu kliznog tlaka. Iz tog razloga u ovoj vrsti pogona ventili su blago prigušeni, te tlak u sustavu raste kao u režimu s prirodnim kliznim tlakom (Slika 55). Osim nadređene regulacije koja prati promjene gradijenata temperature, regulacija tlaka prati promjene tlaka svježe pare, te kada on više nije u definiranom rasponu kliznog tlaka, otvara parne ventile do kraja kako bi se povećao protok pare kroz turbinu. Zbog toga dolazi do naglog porasta snage bloka, a tlak svježe pare se nakon ove akcije počinje stacionirati.

Što se tiče odziva snaga prikazanih na Slika 54, kod režima rada s modificiranim kliznim tlakom se dobivaju nešto brži odzivi nego li u režimu s konstantnim tlakom.

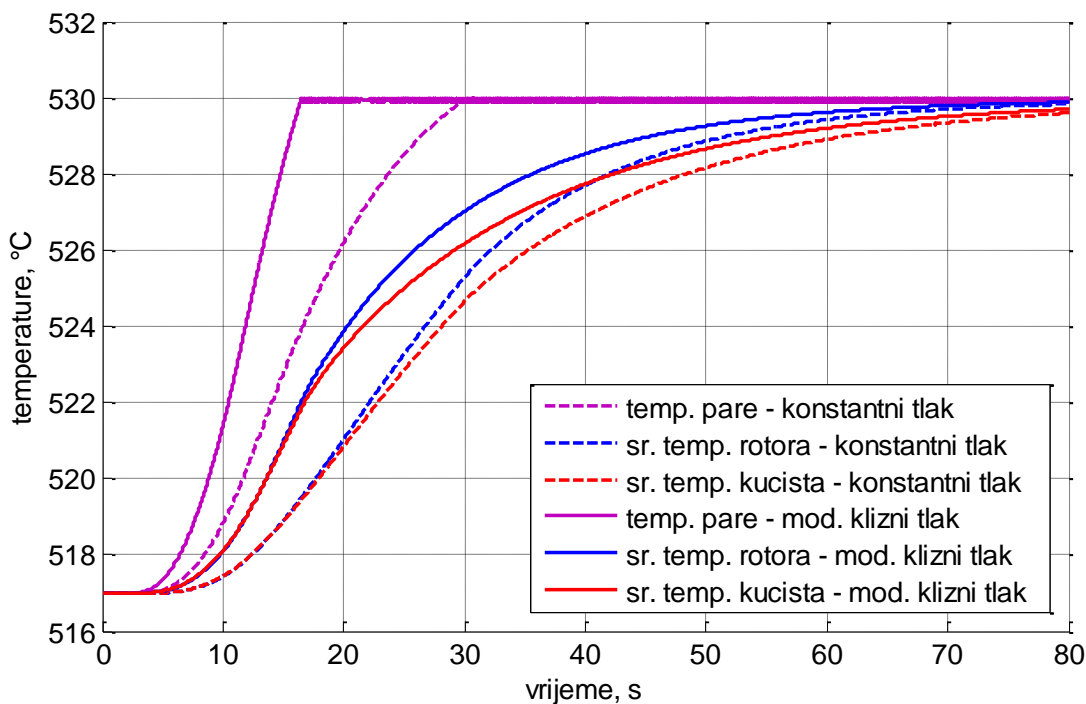


**Slika 55. Usporedba promjene protoka, otvorenosti ventila, tlaka i protoka goriva za oba režima rada**

Dok su ventili prigušeni, u režimu modificiranog kliznog tlaka, toplinska energija i para se akumuliraju u cijevnoj masi termoenergetskog bloka. Zbog toga ovaj režim rada omogućuje brže povećanje snage jer veći tlak uzrokuje veći protok pare kroz turbinu odnosno brži porast snage u prvim sekundama i minutama nakon otvaranja ventila, ovisno o dinamičkim performansama bloka.

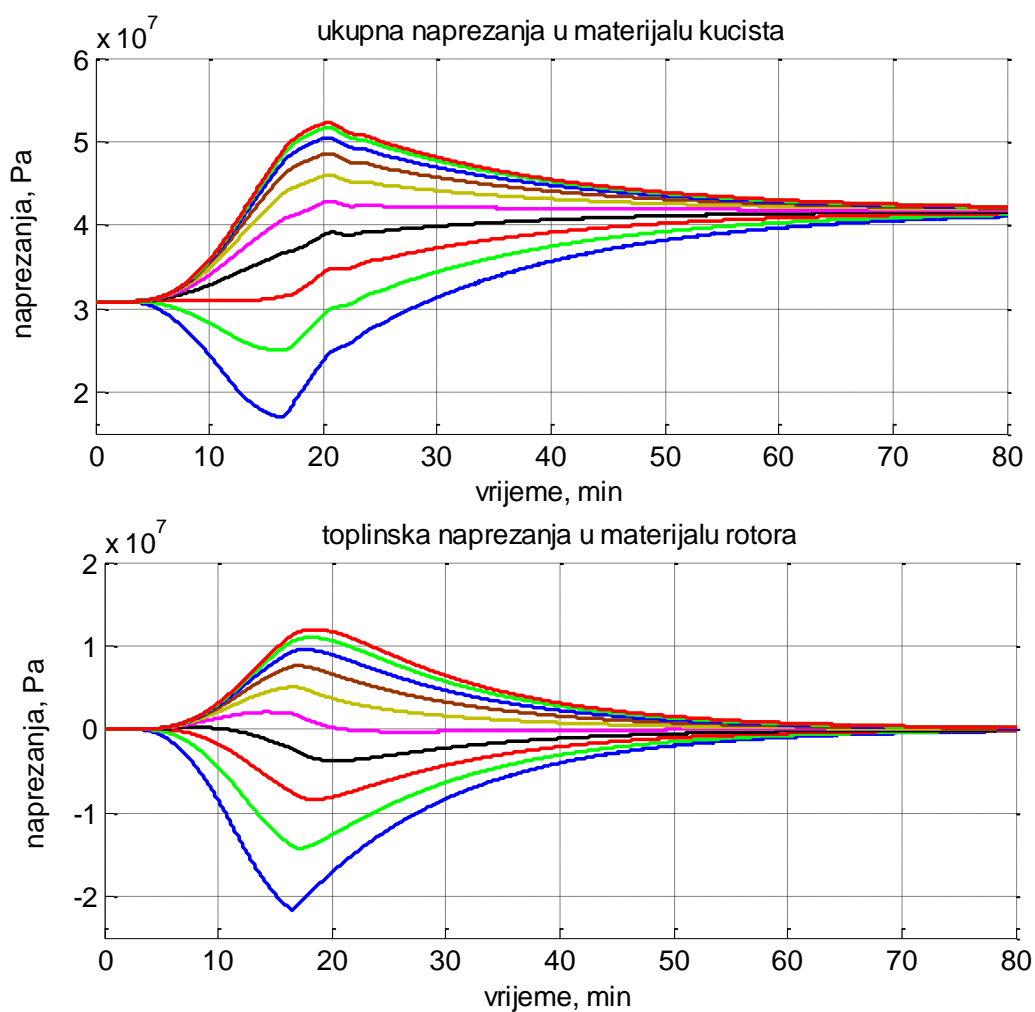
Kod pogona s konstantnim tlakom regulacijski sustav ventila prilagođava protok pare kroz turbinu kako bi održao konstantan tlak u zadanoj točki bloka, a njegovo djelovanje je prikazano na slici 50. Tlak se ne mijenja, a protok u ovom režimu polagano raste, kao i pripadajuća krivulja snage. Karakterizira ga sporiji gradijent snage bloka, ali je zbog toga pogodniji za očuvanje životnog vijeka debelostijenih komponenti.

Ako se pretpostavi da je površina ispod krivulja snage na Slika 54, koja predstavlja proizvedenu električnu energiju, za oba režima rada jednaka, onda se može reći da je režim s modificiranim kliznim tlakom termodinamički nešto lošiji jer se na slici 50 može vidjeti da troši više goriva. Uz to ovakvim vođenjem procesa vrši se veće prigušivanje pare koje je također nepovratan proces.



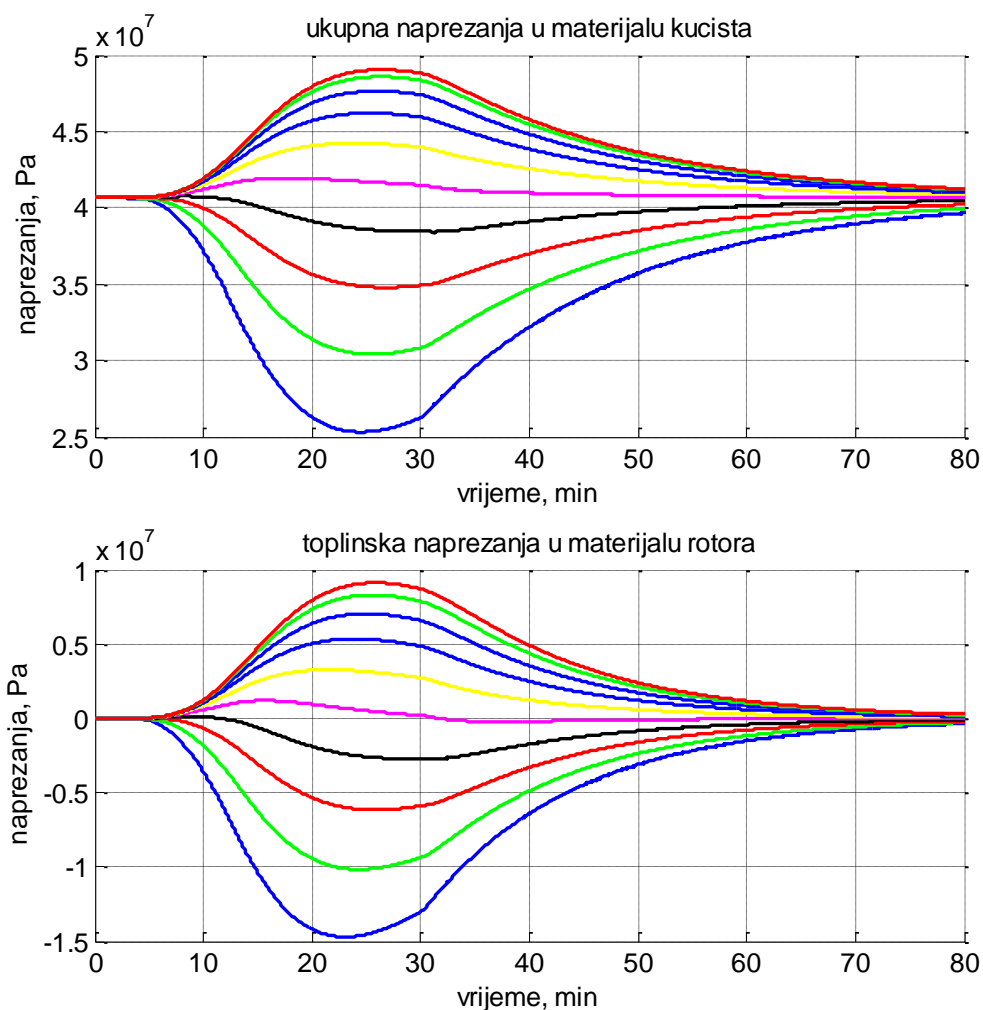
**Slika 56. Usporedba temperatura pare, rotora i kućišta u oba režima rada**

Kod pogona s konstantnim tlakom krivulje temperature imaju oblik S krivulje. Ovaj režim rada ima sporije odzive, zbog čega se progrijavanje debelostijenih materijala odvija sporije. Iz tog razloga će toplinska naprezanja u materijalu biti niža tijekom prijelaznih pojava, ali će zato nešto sporije iščeznuti nego li kod režima s modificiranim kliznim tlakom. Toplinska naprezanja u materijalima kućišta i rotora u ovoj simulaciji prikazana su na slikama Slika 57 i Slika 58.



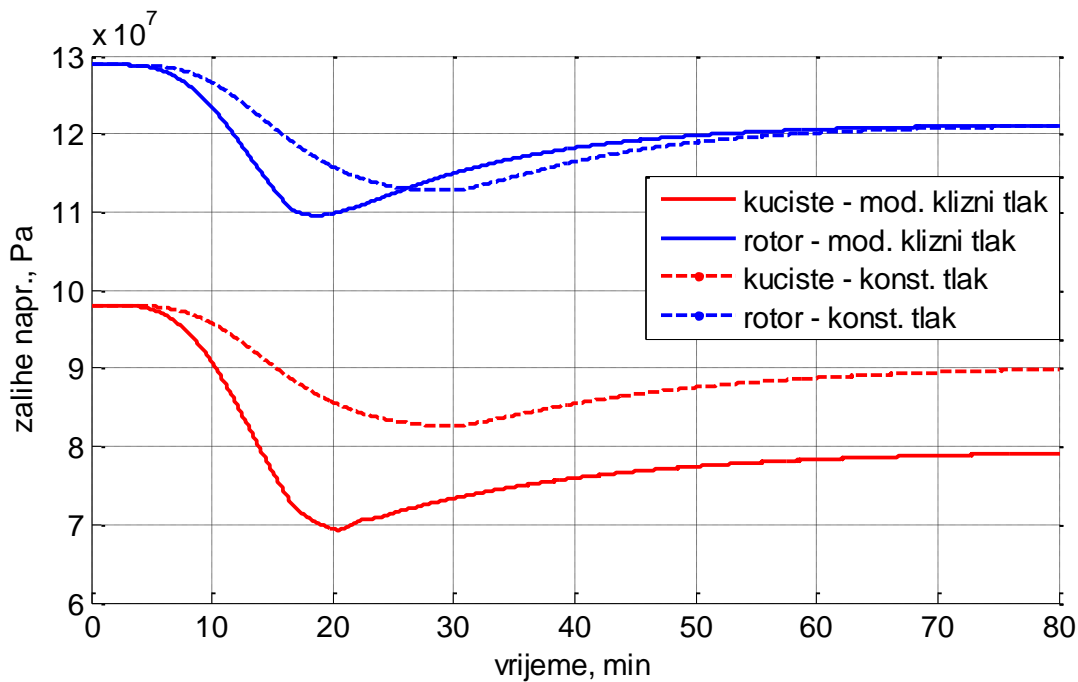
**Slika 57. Napreznja u slojevima kućišta u režimu s modificiranim kliznim tlakom**

Kod režima rada s modificiranim kliznim tlakom superponiraju se radna tlačna s toplinskim napreznjima. Nakon što se uspostavi ciljna snaga bloka, temperature komponenti se stacioniraju i u konačnici u materijalu kućišta ostaju samo tlačna napreznja. Što se tiče rotora već je spomenuto da se tlačna napreznja na njemu poništavaju jer je rotor modeliran kao cilindar beskonačne duljine.



**Slika 58. Srednje temperature i zalihe napreznja u rotoru i kućištu za oba režima rada**

Kod pogona s konstantnim tlakom javljaju se samo sitne oscilacije tlaka. Zbog toga je ovaj režim rada pouzdaniji u pogon jer postoji manja vjerojatnost od prekoračenja dopuštenih napreznja u materijalu. Iako ima brže odzive negoli pogon s prirodnim kliznim tlakom, ovaj režim rada ipak ima slabiju fleksibilnost od pogona s modificiranim kliznim tlakom koja može biti od krucijalne važnosti u današnjim tržišnim utakmicama.



Slika 59. Zalihe naprezanja u kućištu i rotor za oba režima rada

Ovdje je prikazana usporedba zaliha naprezanja za oba režima rada. Kako je već rečeno, kod režima s modificiranim kliznim tlakom javljaju se veći tlakovi zbog akumulacije pare u cjevovodima TE bloka uslijed čega se javljaju dodatna tlačna naprezanja u materijalu koja „troše“ zalihe naprezanja. Minimumi na odzivima sa Slika 59 nastaju tijekom prijelaznih pojava i prikazuju koliki dio zaliha naprezanja je potrošilo toplinsko naprezanje u odnosu na novo stacionarno stanje.

U oba režima rada nisu se potrošile zalihe naprezanja što znači da se teoretski pogon mogao voditi još fleksibilnije, s intenzivnijim prijelaznim pojavama. Problem može biti što gradijent temperatura ponekad može biti prevelik, te jako brzo može potrošiti zalihe naprezanja. Iz tog razloga posebna je pažnja posvećena kućištu s aspekta zaliha naprezanja. Postavna vrijednost relativnih zaliha naprezanja iznosila je 30% umjesto 20%. Ukoliko bi bila postavljena na nižu vrijednost dolazilo bi do iskorištavanja svih zaliha naprezanja u materijalu zbog velike inercije bloka i prevelikog porasta temperature pare.

## 12. PROCJENA UTJECAJA PROMJENA OPTEREĆENJA NA POGONSKU RASPOLOŽIVOST TERMOENERGETSKOG BLOKA

Životni vijek debelostijenih komponenti ovisi, među ostalim, o puzanju i umoru materijala koji se događa uslijed izlaganja materijala visokim, a danas sve češće, i varijabilnim temperaturama. Pri tome sustav regulacije ima veliku ulogu na cjelokupne performanse i raspoloživost TE bloka.

Pozitivne i negativne promjene snage, kao što se moglo vidjeti iz simulacija, donose i velike promjene u tlaku i temperaturi pare koji pak uzrokuju velika toplinska i tlačna naprezanja. Zbroj toplinskih i tlačnih naprezanja predstavlja ukupno naprezanje u materijalu tijekom ciklusa promjene opterećenja bloka. Tlačna naprezanja su proporcionalna apsolutnoj vrijednosti tlaka unutar debelostijenih komponenti, a temperaturna naprezanja su proporcionalna razlici temperatura koja se javljaju unutar slojeva debelostijenih komponenti.

$$\sigma_m = \sigma_p + \sigma_\vartheta = \alpha_m \frac{d_{ms}}{2e_{ms}} \Delta p + \alpha_\vartheta \frac{\beta_{L\vartheta}}{1 - \nu} \Delta \vartheta_w \quad (21)$$

Nakon što prijelazne pojave u pogonu iščeznu, debelostijene komponente bivaju progrijane na traženu temperaturu, a toplinska naprezanja se također smanjuju i u konačnici minimiziraju, te dalje ovise samo o oscilacijama temperature pare. U materijalu tada manje-više ostaje samo tlačno naprezanje.

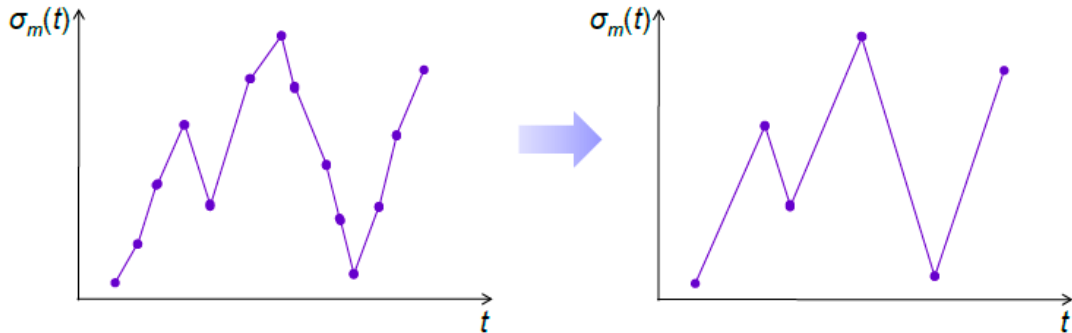
Kako bi se spriječilo prekoračenje projektnih naprezanja neophodno je reducirati toplinska naprezanja. Da bi se to osiguralo, nužna je veoma precizna regulacija temperature pare u fleksibilnom pogonu, kao i dobri algoritmi za procjenu toplinskih naprezanja kojima će se omogućiti bolje vođenje procesa.

Da bi se odredio intenzitet zamora materijala neophodno je procijeniti naprezanja i otkriti cikluse u kojima se ona ponavljaju. S obzirom da samo ciklička opterećenja iznad određenih vrijednosti naprezanja uzrokuju zamor, potrebno je klasificirati ciklička opterećenja.

Zamor materijala ne ovisi o apsolutnoj vrijednosti naprezanja u materijalu, već o broju i veličini cikličkih naprezanja. Da bi se otkrilo cikličko naprezanje u materijalu, potrebno je otkriti ekstremne vrijednosti procijenjenih naprezanja. Otkrivanje ekstremnih vrijednosti je primijenjeno u svakom nizu od tri vrijednosti naprezanja u materijalu,  $\sigma_{m1}$ ,  $\sigma_{m2}$ ,  $\sigma_{m3}$  koristeći sljedeću metodu [8]: ako je Booleov izraz

$$(\sigma_{m1} < \sigma_{m2} \text{ AND } \sigma_{m3} < \sigma_{m2}) \text{ OR } (\sigma_{m1} > \sigma_{m2} \text{ AND } \sigma_{m3} > \sigma_{m2})$$

istinit, tada je naprezanje  $\sigma_{m2}$  relativni maksimum ili relativni minimum i potrebno ga je spremati kronološkim redom u skupinu s ostalim ekstremnim naprezanjima u materijalu kako je prikazano na slici ispod.



**Slika 60. Naprezanja u materijalu i otkrivene ekstremne vrijednosti naprezanja [8]**

Prema smjernici DIN EN 19252-4 [8],  $\Delta\sigma_m = 190 \text{ N/mm}^2$  je gornja granica izdržljivosti materijala kod koje se neće dogoditi nikakav zamor, te se vrijednosti ispod  $190 \text{ N/mm}^2$  trebaju izbacivati iz proračuna.

U primjeru u [8], a i u simulacijama u ovom radu pokazano je da se veliki ciklusi naprezanja događaju upravo tijekom naglih promjena snage. Što je veća promjena snage bloka veća je *peak-to-peak* vrijednost tlačnih naprezanja u materijalu. Ako su *peak-to-peak* vrijednosti toplinskih naprezanja velike tada će ciklus naprezanja materijala biti jako velik, te se lako može prijeći dozvoljenu granicu od  $190 \text{ N/mm}^2$ .

Kako bi se izbjeglo prekoračenje dozvoljene granice, *peak-to-peak* vrijednost toplinskih naprezanja treba se minimizirati držanjem razlike temperatura u definiranom rasponu. Ovaj raspon nema neku striktno definiranu konstantnu vrijednost, ali sigurno ovisi o iznosu promjene opterećenja, geometriji debelostijenih komponenti, te o fizikalnim svojstvima materijala. Ako se definira granica od  $190 \text{ N/mm}^2$ , iznad koje će se analizirati rezultati, moguće je procijeniti dopuštene razlike temperature u debelostijenim komponentama  $\Delta\vartheta_w$  prema sljedećoj formuli [8]:



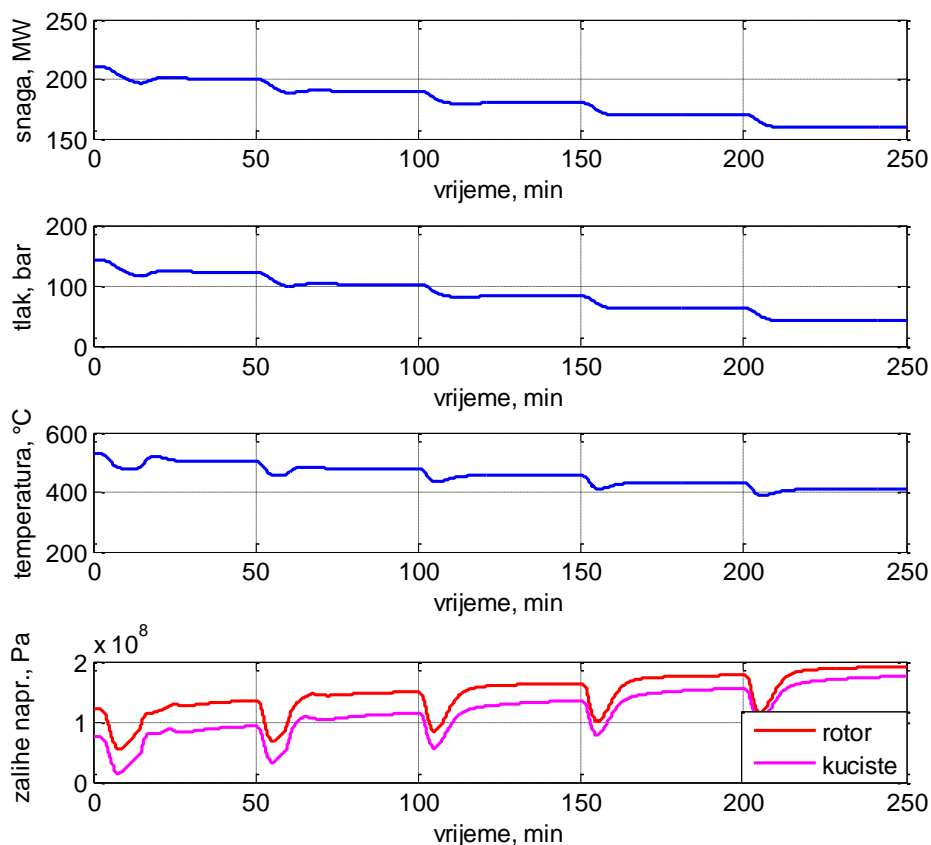
$$\begin{aligned}
\Delta\sigma_m &\leq 190 \\
|\sigma_{m1} - \sigma_{m2}| &\leq 190 \\
|\sigma_{m1} - \sigma_{m2}| &= |\sigma_{p1} + \sigma_{\vartheta1} - \sigma_{p2} - \sigma_{\vartheta2}| \\
|\sigma_{m1} - \sigma_{m2}| &= \left| \frac{d_{sr}}{2e} (p_1 - p_2) + k_c \frac{\beta E}{1 - \nu} (\Delta\vartheta_{w1} - \Delta\vartheta_{w2}) \right| \\
\left| \frac{d_{sr}}{2e} \Delta p + k_c \frac{\beta E}{1 - \nu} \Delta\vartheta_w \right| &\leq 190 \\
|\Delta\vartheta_w| &\leq \frac{190 - \frac{d_{sr}}{2e} \Delta p}{k_c \frac{\beta E}{1 - \nu}}
\end{aligned} \tag{22}$$

Koristeći gore raspisanu formulu moguće je procijeniti dopuštenu temperaturu određene deblostijene komponente tijekom varijabilnog pogona. Odabrani materijal kućišta i rotora je čelik 28CrMoNiV4-9. Svojstva čelika i geometrijske dimenzije obje komponente dane su u tablici ispod.

**Tablica 7. Geometrijske i fizikalne karakteristike deblostijenih komponenti**

| Varijabla | KUĆIŠTE  | ROTOR | Jedinica             |
|-----------|--|-------|----------------------|
| $k_m$     | 2  | 2     | [-]                  |
| $k_c$     | 2  | 2     | [-]                  |
| $d_{sr}$  | 1180   | 600   | [mm]                 |
| $e$       | 180  | -     | [mm]                 |
| $\beta$   | $0.1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |       | [1/°C]               |
| $E$       | 210 000  |       | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| $\nu$     | 0,3  |       | [-]                  |

Simulirano je smanjenje snage bloka za 5% svakih 50 minuta, s punog opterećenja pa sve do vrijednosti 160 MW. Valja napomenuti da za niže vrijednosti linearni dinamički model TE bloka nije davao dobre rezultate za promjene tlaka, te se iz tog razloga nije radila opširnija simulacija s nižim iznosima snaga. Na slici ispod prikazani su rezultati simulacije. Tijekom punog opterećenja tlak je iznosio 142 bar.



Slika 61. Simulacija postupne promjene snage bloka

Također, rotor se računa samo za toplinska naprezanja, bez utjecaja tlačnih naprezanja jer je pretpostavka da je rotor cilindar, te se samim time tlak po obodu cilindra poništava. Prema maksimalnoj radnoj vrijednosti tlaka izračunate su *peak-to-peak* vrijednosti tlaka pare  $\Delta p$  za simuliranu promjenu opterećenja bloka  $\Delta P$ . U tablici ispod mogu se vidjeti procijenjene dopuštene razlike temperature  $\Delta \vartheta_{w,kuć}$  i  $\Delta \vartheta_{w,rot}$ .

Tablica 8. Procijenjene vrijednosti dopuštenih razlika temperatura tijekom varijabilnog pogona

| $P$<br>(MW) | $\Delta P$<br>(%) | $\Delta p$<br>(bar) | $\Delta \vartheta_{w,kuć}$<br>(°C) | $\Delta \vartheta_{w,rot}$<br>(°C) |
|-------------|-------------------|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 200         | 5                 | 19,5                | 30,6                               | 31,7                               |
| 190         | 10                | 39,8                | 29,5                               | 31,7                               |
| 180         | 15                | 59,7                | 28,4                               | 31,7                               |
| 170         | 20                | 79,6                | 27,3                               | 31,7                               |
| 160         | 25                | 99,5                | 26,2                               | 31,7                               |

Može se vidjeti da što je veća promjena opterećenja bloka, manje su dopuštene vrijednosti temperaturnih razlika  $\Delta\vartheta_{w,kuć}$  dok se dopuštena promjena temperature rotora  $\Delta\vartheta_{w.rot}$  ne mijenja jer ne ovisi o tlaku.

Manja od ove dvije dopuštene temperaturne razlike, a to je dopuštena promjena temperature kućišta  $\Delta\vartheta_{w,kuć}$ , uzima se u obzir kao dopuštena čime se povoljno djeluje na životni vijek obje debelostijene komponente.

*Peak-to-peak* vrijednost temperaturne razlike u debelostijenim komponentama je uvijek niža od *peak-to-peak* vrijednosti temperature pare. Stoga dopuštena temperaturna razlika  $\Delta\vartheta_w$  može biti korištena za određivanje dopuštene *peak-to-peak* vrijednosti temperature pare tijekom varijabilnog pogona bloka. Ukoliko se definira dopuštena *peak-to-peak* vrijednost temperature pare koristeći ovu metodu, smatra se da je uzeta u obzir velika temperaturna sigurnost.

### 13. ZAKLJUČAK

Proteklih godina tržište električne energije je bilo, a zasigurno će i ostati, jedan od najdinamičnijih ekonomskih sustava na svijetu. Na njega su utjecale brojne izmjene u direktivama, liberalizacija tržišta električnom energijom, povećanje udjela obnovljivih izvora energije, provođenje mjera energetske učinkovitosti i smanjenja emisija stakleničkih plinova, razvoj distribuiranih izvora energije, postrojenja na biomasu i centraliziranih toplinskih sustava. U ovakvim uvjetima natjecanja na tržištu očekuje se vrlo fleksibilan rad TE blokova.

Prednost TE blokova u odnosu na druge izvore energije je što imaju veliku rotirajuću masu u EES-u koja predstavlja spremnik kinetičke energije. Ova karakteristika ih čini kompetentnima na tržištu pomoćnih usluga. Zbog toga su TE blokovi u stanju veoma brzo reagirati na način da naglo povećaju svoju snagu na izlazu otvaranjem glavnih turbinskih ventila i pojačanjem loženja s adekvatnom tehnikom vođenja bloka, te time sudjeluju na tržištu električne energije u primarnoj, sekundarnoj ili tercijarnoj regulaciji frekvencije. Za očekivati je da će se u budućnosti problematika uravnoteženja frekvencije na tržištu pomoćnih usluga odvijati preko fleksibilnih TE blokova, barem dok se ne riješi problem skladištenja većih količina energije i uravnoteženja frekvencije mreže novim tehnologijama u energetici.

Problem varijabilnog pogon TE bloka postale su prijelazne pojave koje se javljaju kod naglih promjena opterećenja ili pokretanja odnosno iskapčanja iz pogona uslijed čega dolazi do velikih toplinskih naprezanja u debelostijenim elementima.

U radu je simuliran varijabilni pogon TE bloka snage 210 MW u uvjetima pokretanja i promjene opterećenja s različitim metodama vođenja bloka. Ključno ograničenje kod varijabilnog pogona bila je brzina progrijavanja debelostijenih komponenti koje su od ključne važnosti za pouzdan pogon.

Potrebno je napomenuti da su korišteni matematički modeli bitno pojednostavljeni u skladu s raspoloživim vremenom za izradu ovoga rada. Iz toga razloga bilo je teško simulirati neke intenzivnije promjene opterećenja bloka, posebice u situacijama kada je bio veliki otklon od stacionarnog referentnog stanja linearnog dinamičkog modela TE bloka.

Rezultati svih simulacija ukazuju na činjenicu da nagle promjene snage nose sa sobom velike promjene temperature i tlaka pare. U takvim uvjetima rada intenziviraju se toplinska naprezanja u materijalu koja se potom superponiraju na radna tlačna naprezanja. Osim naprezanja dolazi i do diferencijalne ekspanzije materijala kućišta i rotora. Ona su u ovom

zadatku pokrivena s modificiranim LCF krivuljama koje uzimaju u obzir toplinski inducirana naprezanja, ali se nisu razmatrala u simulacijama.

Za pokretanje turbine može se definirati generalno pravilo: što je turbina toplija prije pokretanja, to će pokretanje u pogon biti brže. Kako bi se to ostvarilo u praksi neophodno je unaprijediti tijek pokretanja turbine. Poboljšanja uključuju bolju izolaciju kućišta s električnim grijačima, povećanje tlaka svježeh pare, te povećanje protutlaka i brzine vrtnje vratila uz paralelnu praćenje svih parametara procesa s nadređenim sustavom regulacije.

Uspoređujući strategiju vođenja s konstantnim i modificiranim kliznim tlakom može se reći da režim s modificiranim kliznim tlakom daje brži odziv. Ova strategija vođenja je termodinamički gledano nešto lošija jer troši nešto više goriva za istu količinu proizvedene energije. Posljedica je to prigušivanja pare u velikom rasponu kliznog tlaka. Nagle promjene opterećenja koje je ovaj način vođenja u stanju izvesti poželjne su sa ekonomskog stajališta, tj. bolje kotira na tržištu pružanja pomoćnih usluga. S druge strane, odziv snage kod strategije vođenja s konstantnim tlakom je sporiji i ima oblik S krivulje što ga čini pogodnijim za očuvanje životnog vijeka debelostjenih materijala. Toplinska naprezanja u materijalu su u tom slučaju puno niža. Unatoč tome ciklički tip naprezanja može drastično skratiti životni vijek komponenti.

Gledano s teoretskog stajališta, rezultati simulacija su dali očekivane rezultate, jer je pokazano da je moguće postići veoma brži odziv bloka uz minimiziranje utjecaja toplinskih naprezanja korištenjem sustava za nadzor turbinskih naprezanja, te samim time fleksibilnije sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga.

## LITERATURA

- [1] Šerman, N., Lončar, D.: Utjecaj tehnološke opreme i strategije vođenja na dinamičke performance termoenergetskog bloka, FSB Zagreb, 2009.
- [2] Lončar, D., Šerman, N.: Modeli agregata priključenih na 220 i 400 kV prijenosnu mrežu u hrvatskom elektroenergetskom sustavu
- [3] Topel, M.: Steam Turbine Thermal Modeling for Improved Transient Operation, KTH Royal Institute of Technology, 2014.
- [4] Henderson, C.: Increasing the flexibility of coal-fired power plants, IEA Clean Coal Centre, September 2014.
- [5] Lončar, D.: Vođenje energetske sustava, interne prezentacije iz kolegija, FSB Zagreb, 2014.
- [6] Lončar, D.: Primjena neizrazite logike u regulacijskom sustavu TE bloka, FSB Zagreb, 2001.
- [7] Šerman, N., Bogdan, Ž., Lončar, D.: Sustav vođenja i regulacije bloka 210 MW TE „Plomin“ - izvedeno stanje, FSB Zagreb, prosinac 2000.
- [8] Knierim-Dietz, N., Hanel, L., Lehner, J.: Definition and Verification of the Control Loop Performance for Different Power Plant Types, Institute of Combustion and Power Plant Technology, University of Stuttgart, May 2012
- [9] Panek, P., Černy, V., Kapic, M., Prchlik, L.: Thermal Stress Monitoring and Control System for Steam Turbines, Škoda Power, a Doosan Company
- [10] Suter, F., Sauter, R.: Upgrading control & safety systems of reheat steam turbines, ABB Review, 2/1999
- [11] Banaszkiwicz, M.: Steam turbines start-ups, The Szewalski Institute of Fluid Flow Machinery, Polish Academy of Sciences, Energy Conversion Department, No. 126, 2014, 169-198
- [12] [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012\\_energy\\_roadmap\\_2050\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf), pristupljeno 23.11.2015.

## **PRILOZI**

CD-R disk