

UDK 536.2:621.311.2

Toplotna obremenitev Save zaradi hladilne vode iz termoelektrarn

MATIJA TUMA

1. ODVOD TOPLOTE IZ TERMoeLEKTRARN

Za odvod toplote iz turbinskega krožnega procesa se po svetu in tudi v Jugoslaviji zelo pogosto uporablja rečna voda. Črpalke črpajo vodo iz vtočnega objekta in jo po dovodnem cevovodu potiskajo v kondenzator. V kondenzatorju ta voda prevzame kondenzacijsko toploto turbinske pare in se pri tem ogreje, nato pa se ogreta vrača po povratnem cevovodu nazaj v reko. Pri kondenzacijskem obratovanju termoelektrarne (pridobivanje elektrike) se voda v sodobnih kondenzatorjih ogreje za 9 do 14 °C, pri odjemno-kondenzacijskem obratovanju (hkratio pridobivanje toplote in elektrike) pa za 30 do 50 odstotkov manj. K tej količini je treba pristeti še 5 do 8 odstotkov vode za hlajenje in pogon pomožnih sistemov, npr.: hlajenje mazalnega in dvignega olja, hlajenje statorja in rotorja generatorja, hlajenje regulacijske tekočine, pogon vodnih ejektorjev itn. Povratni cevovod se konča v iztočnem objektu, ki je navadno postavljen na rob struge. Mešanje tople vode iz termoelektrarne s hladno rečno vodo je kljub turbulentnemu toku reke slabo, kar potrjujejo številne meritve in modelni preizkusi. Dejanjskega mešanja računsko ni mogoče natančno zajeti, znane pa so poenostavljene rešitve [6]. Taka rešitev je bila podana tudi za trboveljsko elektrarno 125 MW in načrtovano toplotarno 200 MW za primer, da odteka topla voda iz obeh turbinskih kondenzatorjev v načrtovano umetno jezero HE Suhadol [7]. Intenzivnejše mešanje manjšega — toplega in večjega — hladnega rečnega toka izdatno pospešuje razgibanost struge, dotoki stranskih potokov, veter, izhlapevanje, padavine itn.

Sava sodi k hudourniškim rekam, zato so njene naravne spremembe temperature precejšnje, kar potrjujejo tudi meritve. Z inštituta »Boris Kidrič« so meseca avgusta v letih 1966, 1967 in 1988 merili temperature rečne vode po reki navzgor od tovarne celuloze in papirja »Videm«, Krško. Iz teh meritev je razvidno, da znašajo razlike zaradi sončnega sevanja med jutranjo in najvišjo dnevno temperaturo rečne vode 1,0 do 3,9 K. To potrjuje tudi podrobnejša raziskava naraščanja temperature Save zaradi odvoda toplote iz termoelektrarne Trbovlje in hkratnega sončnega sevanja. Ta raziskava je bila opravljena v zvezi z načrtovano gradnjo toplotarne Trbovlje 200 MW za rečni odsek Zidani Most — Krško za značilni nizki pretok 61 m³/s in za najvišjo mogočo temperaturo vode 21,2 °C. Zaradi obratovanja obeh toplotnih postrojenj v Trbovljah je bilo pri Zidanem Mostu predpostavljeno nenadno zvišanje temperature rečne vode nad njeno naravno za 1,82 K. Sončno sevanje pa je

povzročilo, da se je Sava na razdalji okrog 39 km še dodatno segrela za 1,7 K v normalnem in za 3,1 K v vročem poletju. Če sončnega sevanja ne bi bilo, bi se Sava na tej poti ohladila za 0,37 oziroma za 0,62 K [8]. Z inštituta »Jožef Stefan« pa poročajo o naslednjih večjih temperaturnih spremembah: temperatura savske vode se je na primer poleti zvišala v enem dnevu (od jutra do večera) za 3 K, prvi veliki dež v drugi polovici avgusta je ohladil reko v dveh dneh za 8 K, v začetku septembra se je Sava po močnem deževju v enem tednu spet ogreela za 7 K [5].

Z izpustom ogrete vode iz termoelektrarn se lahko poruši biološko in kemično ravnotežje reke, pri tem gre za več problemov hkrati [6], [4].

Biološki problemi:

- previsoka temperatura rečne vode lahko povzroči odmiranje rastlin in živih bitij,
- zmerno visoka temperatura lahko povzroči pri rastlinah in živih bitjih izgubo plodnosti,
- precejšnji del vsesanih mikroorganizmov na prehodu skozi kondenzator odmre, kar lahko vpliva na prehrano drugih živih bitij v vodi.

Kemični problemi:

- delež v vodi raztopljenega kisika se z višanjem temperature manjša,
- pri višjih temperaturah imajo živa bitja povečan metabolizem, kar zahteva večjo porabo kisika,
- z zmanjšano količino kisika se zmanjšuje sposobnost vode oksidirati organske onesnaževalce.

2. PREDPISI V ZVEZI Z DOVOLJENO TOPLOTNO OBREMENITVIJO REK

V Evropi in ZDA veljajo glede toplotne obremenitve rek naslednje omejitve [3]:

- največje dovoljeno zvišanje srednje temperature nad naravno temperaturo reke: 2,8 K (ZDA), 3 K (ZR Nemčija in Švica), 3–5 K (Sovjetska zveza),
- najvišja dovoljena absolutna temperatura reke: 25 °C (Švica), 28 °C (ZR Nemčija),
- najvišja dovoljena absolutna temperatura hladilne vode iz turbinskega kondenzatorja na vtoku v reko: 30 °C (ZR Nemčija in Švica),
- nekatere druge omejitve: delež raztopljenega kisika se ne sme zmanjšati pod 5 mg/l (ZR Nemčija), pretok reke mora biti trikrat večji od pretoka vode skozi kondenzator (Sovjetska zveza), absolutna temperatura talnice zaradi toplotnega toka iz termoelektrarn ne sme preseči 15 °C (Švica).

V Franciji ni splošno veljavnih predpisov, postavitev vsake nove elektrarne je obravnavana posebej.

V Jugoslaviji so dokaj stroge zahteve glede toplotne obremenitve rečne vode zbrane v vodnogospodarskem dovoljenju za JE Krško, ki je veljavno do konca leta 1995 [10]:

- za hlajenje sme jedrska elektrarna jemati največ 25% rečnega pretoka,
- najvišja dopustna temperatura rečne vode na mernem mestu v Brežicah je 28 °C,
- zvišanje temperature Save je omejeno na 2 K, če je temperatura reke višja od 8 °C,
- zvišanje temperature Save je omejeno na 3 K, če je temperatura reke nižja od 8 °C,
- jedrska elektrarna mora zmanjšati moč, če po goj $\Delta T = 2$ K oziroma 3 K ni izpolnjen.

3. TERMoeLEKTRARNE, POSTAVLJENE OB SAVI IN NJENIH PRITOKIH

Ob Savi in Ljubljani so na treh krajih postavljene termoelektrarne, ki za odvod toplote iz parnega krožnega procesa uporabljajo večje količine rečne vode. Nekateri tehnični podatki za ta toplotna postrojenja so zbrani v preglednici 1. V njej je navedena tudi načrtovana toplotna Trbovlje 200 MW.

Preglednica 1. Velike termoelektrarne, hlajene z rečno vodo Ljubljanice in Save

Indeks OK: odjemno-kondenzacijsko obratovanje.
Indeks K: čisto kondenzacijsko obratovanje.

Toplotno postrojenje	Največja moč turb. P_{OK}/P_K MW	Največja topl. moč Q_{OK}/Q_K MW	Največji topl. tok v hladilni vodi $Q_{OK,od}/Q_{K,od}$ MW	Količina hlad. vode $\dot{m}_H$ m ³ /s
TO	32/ 32	36/0	37/ 63	1.67
Ljubljana	32/ 32	36/0	37/ 63	1.67
	50/ 50	56/0	58/ 99	1.67
TE	125/125	0/0	166/ 166	4.55
Trbovlje	170/200	157/0	136/ 249	5.2
JE Krško	664/664	0/0	1201/1201	25.0
Skupaj	1073/1103	285/0	1635/1841	39.75

Vrednosti v preglednici 1 so zaokrožene, vendar so vzete po tehničnih podatkih izdelovalcev parnih turbin [2], [9]. Električna moč, izkoristek in druge pomembnejše veličine vsake termoelektrarne so natančno izračunane, številčna vrednost kupcu zagotovljena in pred začetkom rednega obratovanja preverjena s prevzemnimi preizkusi. Vse pomembnejše tehnične veličine je zato mogoče natančno določiti, med njimi tudi toplotni tok iz turbinskega kondenzatorja v okolico. Če je znan pretok hladilne vode skozi kondenzator, je mogoče natančno določiti tudi temperaturo te vode.

Poleg tega je ob Savi in njenih manjših in večjih pritokih postavljenih več industrijskih parnih turbin, ki potrebujejo hladilno vodo [2]. Vsa ta toplotna postrojenja so grajena za hkratno pridobivanje toplote in elektrike, tako da je odvod toplote iz parnega krožnega procesa v hladilno vodo zelo majhen, v večini primerov manjši kakor odpadna toplota iz njihovih tehnoloških procesov. Te industrijske toplotne so zbrane v preglednici 2, nimajo pa opaznega vpliva na zviševanje naravne temperature Save.

Preglednica 2. Industrijske toplotne, postavljene ob Savi in njenih pritokih.

Podjetje	Kraj	Največja el. moč	Hladilna voda
Železarna	Jesenice	4.1 MW	Sava
Aero	Medvode	6.4 MW	Sora
Papirnica	Vevče	6.4 MW	Ljubljana
Stol	Kamnik	1.6 MW	Kam.Bistrica
Papirnica	Količevo	10.0 MW	Mlinščica
		3.0 MW	Mlinščica
Tov. papirja	Radeče	5.2 MW	Sopota
Videm	Krško	6.4 MW	Sava
		7.0 MW	Sava
Krka	Novo mesto	3.3 MW	Krka
Skupaj		53.4 MW	

4. VPLIV OGRETE VODE IZ TO LJUBLJANA

Toplotna obremenitev Ljubljanice zaradi Toplarne Ljubljana računsko ni zanemarljiva, saj mora reka prevzeti v primeru čistega kondenzacijskega obratovanja vseh treh parnih turbin toplotni tok 225 MW. Tak primer je zgolj teoretičen, v praksi je v reko odvajana toplota za približno 40 odstotkov manjša, namreč največ 132 MW. Pri polni obremenitvi in kondenzacijskem obratovanju je temperatura hladilne vode iz kondenzatorjev (skupaj: 5,0 m³/s hladilne vode) v povprečju za 10,7 K višja od rečne vode, pri normalnem odjemnokondenzacijskem obratovanju pa za 6,3 K.

Vzemimo, da je naravna temperatura Ljubljanice $T = 17^\circ\text{C} = 290$ K, njen trenutni pretok pa $\dot{m} = 50$ m³/s ≈ 50 000 kg/s. Toplotni tok reke je potem:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p T = 50\,000 \text{ kg/s} \cdot 4,19 \text{ kJ/(kgK)} \cdot 290 \text{ K} = 60\,755\,000 \text{ kW}.$$

K temu toplotnemu toku je treba prišteti toplotni tok zaradi odvoda toplote iz toplotne Q_{od} (primerjaj pregl. 1). Iz teorije toplotnih turbinskih strojev je znano, da je električna moč približno premo sorazmerna toplotnemu toku, ki je iz krožnega procesa odveden v okolico s hladilno vodo in ta toplotni tok zopet premo sorazmeren zvišanju temperature hladilne vode [1]. Če vzamemo, da obratujejo vse tri parne

turbine s polno močjo in v čistem kondenzacijskem obratovanju, potem se Ljubljana zaradi ljubljanske toplotne segreje v povprečju za:

$$\Delta T = \frac{Q + Q_{od}}{\dot{m} c_p} - T = \frac{60\,755\,000 \text{ kW} + 132\,000 \text{ kW}}{50\,000 \text{ kg/s} \cdot 4,19 \text{ kJ/(kgK)}} - 290 \text{ K} = 0,63 \text{ K}$$

Če ponovimo račun za različne rečne pretoke $\dot{m}$ za odjemno-kondenzacijsko in za čisto kondenzacijsko obratovanje, dobimo krivulji 1 in 2 (sl. 1). Krivulja 1 kaže segrevanje Save pri odjemno-kondenzacijskem obratovanju vseh treh parnih turbin pri imenski moči, krivulja 2 pa segrevanje Save pri čistem kondenzacijskem obratovanju pri enakih robnih pogojih, vse v odvisnosti od rečnega pretoka.

Čeprav toplotna obremenitev Ljubljane ni zamenljiva, pa je mogoče predpostaviti, da toplotni tok iz ljubljanske toplotne na temperaturo Save v Trbovljah nima vpliva. Že omenjena študija [8] je pokazala, da je ohlajevanje rečne vode sicer slabo, vendar pa je razdalja od Ljubljane do Trbovelj približno za 1,7-krat daljša od podrobno raziskane razdalje Zidani Most – Krško, toplotni tok iz ljubljanske toplotne pa približno polovico manjši kakor toplotni tok iz trboveljske elektrarne in načrtovane toplotne. Poleg tega se Ljubljana na poti od Ljubljane do Trbovelj meša s Savo, Kamniško Bistrico in drugimi vodami.

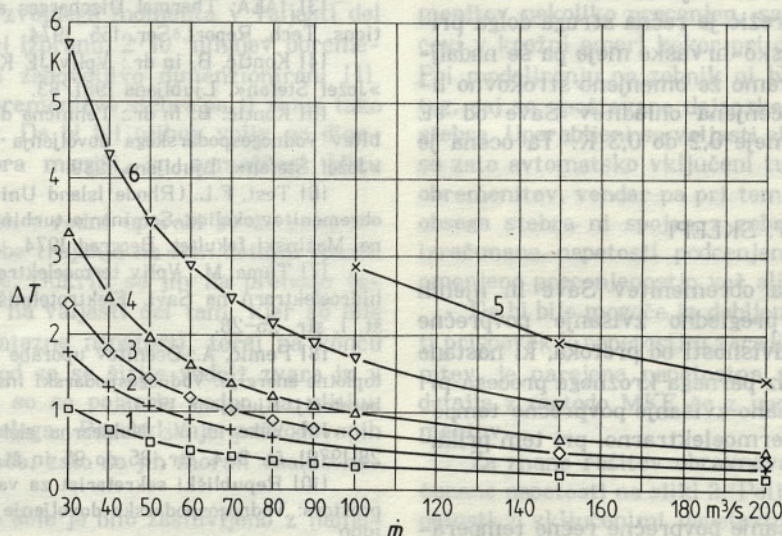
5. VPLIV OGRETE VODE IZ TE TRBOVLJE

Sedanja termoelektrarna Trbovlje 125 MW potrebuje za odvod toplote iz parnega krožnega procesa

4,55 m³/s savske vode; ta voda se vrača v reko ogre-ta za 8,7 K. Načrtovana toplotna Trbovlje 200 MW potrebuje približno 5,2 m³/s in jo ogreje v čistem kondenzacijskem obratovanju za 11,4 K in v odjemno-kondenzacijskem obratovanju za 6,2 K. V povprečju se hladilna voda iz obeh kondenzatorjev segreje za 10,2 K. Krivulja 3 na že omenjeni sliki kaže segrevanje Save pri čistem kondenzacijskem obratovanju obeh parnih turbin pri imenski moči, krivulja 4 pa segrevanje Save pri kondenzacijskem obratovanju parne turbine 125 MW in odjemno-kondenzacijskem obratovanju načrtovane turbine 170/200 MW, vse v odvisnosti od rečnega pretoka.

Po že omenjenem računskem modelu [8] je hladilna voda iz termoelektrarne na razdalji okrog 39 km od Zidanega mosta do Krškega oddala del toplote okoli in se pri tem ohladila za 0,37 do 0,62 K. Če to vrednost pri enakih robnih pogojih ekstrapoliramo za razdaljo Trbovlje – Krško, potem se ohladitev zviša na 0,48 do 0,82 K; če upoštevamo nadalje hudourniški značaj reke, razgibanost struge, mešanje savske vode s Savinjo, Sevnico, Mirno in drugimi manjšimi pritoki, potem se temperatura Save zniža bolj, kakor je izračunano z modelom.

Vpliv hladilne vode iz TE Trbovlje na rečno vodo pri Krškem je očitno tudi pri ekstremnih razmerah precej manjši, kakor je predviden z računskim modelom. Na podlagi dosedanjih podatkov, ki bi jih bilo treba sčasoma še obdelati, je ocenjeno zvišanje rečne temperature nad njeno naravno temperaturo pri Krškem 0 do 0,5 K. To velja za najneugodnejše razmere in za polno obratovanje termoelektrarne 125 MW in načrtovane toplotne 200 MW. Ocena se ujema z navedbo v strokovni literaturi, ki pravi, da je potrebno 10 km rečne struge in več, da se temperatura reke zniža za 1 K [6]. Pri tem je treba omeniti, da segrevanje reke zaradi sevanja sonca ni upoštevano.



Sl. 1. Toplotna obremenitev Save in njenih pritokov.
Zvišanje temperature ΔT v odvisnosti od rečnega pretoka $\dot{m}$.

6. VPLIV OGRETE VODE IZ JE KRŠKO

Pri rečnih pretokih, ki so večji od $100 \text{ m}^3/\text{s}$, je za odvod toplote iz parnega krožnega procesa predvideno $25 \text{ m}^3/\text{s}$ savske vode, pri tem se ta voda vrača v reko ogreta za $11,5 \text{ K}$. Pri pretokih Save, ki so manjši od $100 \text{ m}^3/\text{s}$, pa se vključi hladilni stolp, ki ohlaja $15 \text{ m}^3/\text{s}$ hladilne vode. Preostanek hladilne vode iz kondenzatorja količine $10 \text{ m}^3/\text{s}$ se pomeša s $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ohlajene hladilne vode iz hladilnega stolpa in teče v Savo (skupaj torej $15 \text{ m}^3/\text{s}$). Preostalih $10 \text{ m}^3/\text{s}$ ohlajene vode iz hladilnega stolpa teče nazaj v črpališče, zaradi česar je treba odjemati iz reke samo $15 \text{ m}^3/\text{s}$ [5], [9]. Krivulja 6 na sliki kaže segrevanje Save pri imenski moči parne turbine v odvisnosti od pretoka reke za primer, da hladilni stolp ni v obratovanju, medtem ko kaže krivulja 5 segrevanje Save za manjše rečne pretoke, kjer mora del toplote iz parnega krožnega procesa prevzeti zrak in ne savska voda. Tako obratovanje je predvideno glede na tehnično zasnovno postrojenje, glede na vodnogospodarsko dovoljenje [10] pa mora hladilni stolp obratovati ne samo pozimi ($T < 8^\circ\text{C}$), ko se zmanjša pretok reke pod $100 \text{ m}^3/\text{s}$ in zviša temperatura Save za elektrarno za $\approx 3 \text{ K}$, ampak tudi poleti ($T > 8^\circ\text{C}$), brž ko se rečni pretok zmanjša pod $150 \text{ m}^3/\text{s}$, temperatura Save za elektrarno pa se zviša za $\approx 2 \text{ K}$. Če hladilni stolpi poleti ne zmorejo odvajati dovolj toplote iz hladilne vode v zrak, je treba zmanjšati toplotni tok iz kondenzatorja; zmanjšanje toplotnega toka iz kondenzatorja pa je mogoče samo z zmanjšanjem moči parne turbine. Če je pretok reke manjši od $60 \text{ m}^3/\text{s}$, je odjem hladilne vode prevelik, saj znaša več kot četrtino rečne vode. Glede na veljavno vodnogospodarsko dovoljenje, ki je nenavadno strogo, je treba hladilni sistem preurediti, da bo odjem hladilne vode manjši od $15 \text{ m}^3/\text{s}$ in hkrati zmanjšati moč parne turbine, da ne bo temperatura Save za elektrarno višja od 3 K .

Od Krškega do Brežic je rečna struga dolga približno 7 km , do slovensko-hrvaške meje pa še nadaljnjih 9 km . Če upoštevamo že omenjeno strokovno literaturo, potem je ocenjena ohladitev Save od JE Krško do republiške meje $0,2$ do $0,3 \text{ K}$. Ta ocena je zelo groba.

7. SKLEPI

Slika 1 »Toplotna obremenitev Save in njenih pritokov« prikazuje pregledno zvišanje povprečne temperature reke v odvisnosti od pretoka, ki nastane zaradi odvoda toplote iz parnega krožnega procesa pri imenski moči. Izračunano zvišanje povprečne temperature velja takoj za termoelektrarno, pri tem prikazuje:

— krivulja 1: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike in toplote v TO Ljubljana,

— krivulja 2: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike v TO Ljubljana,

— krivulja 3: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike in toplote v TE Trbovlje,

— krivulja 4: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike v TE Trbovlje,

— krivulja 5: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike v JE Krško, hladilni stolpi v obratovanju,

— krivulja 6: zvišanje povprečne rečne temperature zaradi pridobivanja elektrike v JE Krško brez hladilnih stolpov.

Ljubljanska toplarna in druge manjše industrijske toplarne, ki so postavljene ob Savi ali njenih pritokih, nimajo nobenega vpliva na temperaturo rečne vode pri Trbovljah.

Pri tipično nizkem pretoku savske vode $61 \text{ m}^3/\text{s}$ se hladilna voda zaradi odvoda toplote iz sedanje termoelektrarne in načrtovane toplarne Trbovlje (skupaj $9,75 \text{ m}^3/\text{s}$ rečne vode za hlajenje) v najneugodnejšem primeru (samo pridobivanje elektrike) ogreje za $1,62 \text{ K}$; pri teh ekstremnih razmerah je ocenjeno zvišanje temperature Save pri Krškem nad njeno naravno temperaturo komaj opazno: 0 do $0,5 \text{ K}$.

Sava prestopa slovensko-hrvaško mejo ogreta nad svojo naravno temperaturo. Zvišanje temperature je odvisno od rečnega pretoka in od moči JE Krško (krivulji 5 in 6), medtem ko je prispevek drugih termoelektrarn, ki so postavljene ob Savi in njenih pritokih, zanemarljiv.

8. LITERATURA

- [1] Černigoj, B.: Toplotne turbine, izvedbe, obremenitve, obratovanje. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1985.
- [2] Tehnični podatki proizvajalcev parnih turbin in toplotne bilance za TO Ljubljana in TE Trbovlje, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana.
- [3] IAEA: Thermal Discharges at Nuclear Power Stations. Tech. Report. Ser. 155. 1974.
- [4] Kontič, B. in dr.: Vpliv JE Krško na okolje. Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana 1981/83.
- [5] Kontič, B. in dr.: Tehnična dokumentacija za pridobitev vodnogospodarskega dovoljenja za JE Krško. Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana 1989.
- [6] Test, F.L. (Rhode Island University): Toplotna preobremenitev okolice. Seminar o turbinah za jedrske elektrarne. Mašinski fakultet, Beograd 1974.
- [7] Tuma, M.: Vpliv termoelektrarne Trbovlje na verigo hidroelektrarn na Savi. Elektrotehniški vestnik 55 (1988), št. 1, str. 25-28.
- [8] Pemič, A.: Ocenitev uporabe reke Save za odvajanje toplotne energije. Vodnogospodarski institut, Vodogradbeni laboratorij, Ljubljana 1989.
- [9] Vuković, V.: Nuklearna elektrana Krško. Energija 28(1979), št. 3/4, str. 85 do 95 in št. 7/8, str. 239 do 246.
- [10] Republiški sekretariat za varstvo okolja in urejanje prostora: Vodnogospodarsko dovoljenje za JE Krško, Ljubljana 1990.

Avtorjev naslov: prof. dr. Matija Tuma, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana