

## RAZISKAVE CEVI UPARJALNIKA TUBE INVESTIGATION OF STEAM GENERATOR

Jelena Vojvodič Tuma<sup>1</sup>, Darko Korošec<sup>2</sup>, Krešimir Gudek<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana

<sup>2</sup>Uprava za jedrsko varnost, Ljubljana

<sup>3</sup>Nuklearna elektrarna Krško

*Prejem rokopisa – received: 1998-11-10; sprejem za objavo – accepted for publications: 1999-02-26*

V prispevku so obravnavane raziskave cevi uparjalnika jedrske elektrarne Krško z metodo vrtničnih tokov. Po 121.000 ur obratovanja elektrarne se je površina za prenos toplote iz primarnega v sekundarni del elektrarne zmanjšala ustrezno 17,4% povprečni začepljenosti (z vstavljenimi tulci) in skoraj že dosegla vrednost dovoljene začepljenosti. Zadnje raziskave v letu 1998 so tako ponovno potrdile, da se doba obratovanja uparjalnikov izteka.

Ključne besede: jedrska elektrarna, uparjalnik, cevi uparjalnika, metoda vrtničnih tokov, preostanek dobe trajanja, jeklo inconel 600, medobratovalni pregledi

The eddy current testing of the steam generator of nuclear power plant Krško are discussed. After 121.000 hours of operation the surface of transport of heat from the primary to the secondary part of the plant is diminished consequently by 17,4% and it is near the limit for the licenced operation at full power. The last investigations in 1998 confirmed that the operation time of the steam generators is running out.

Key words: nuclear power plant, steam generator, tubes of steam generator, eddy current method, residual life time, steel inconel 600, in-service inspection

### 1 UVOD

Jedrska elektrarna Krško je v rednem obratovanju od leta 1982 naprej in je do konca leta 1998 obratovala 121.000 ur. Elektrarna ima tlačnovodni jedrski reaktor Westinghouse in dva uparjalnika istega proizvajalca. Izkazalo se je, da sta uparjalnika kritični napravi elektrarne glede degradacije cevi uparjalnikov. Le te so namreč med obratovanjem izpostavljene mehanskim, toplotnim in kemičnim vplivom, ki povzročajo počasno degradacijo materiala teh cevi. Degradacija se kaže predvsem v pospešenem tvorjenju razpok v cevni stenah ter v izgubi materiala s površine cevi na mestih cevni podpor. Končna posledica je netesnost cevi, torej vdor primarnega reaktorskega hladila v sekundarno stran elektrarne in posledično zaustavitev elektrarne pri prekoračitvi administrativno določene mejne vrednosti puščanja. Netesno cev je treba začepiti, s tem pa se zmanjšuje površina za prenos toplote. Najpogostejši popravni poseg je izločanje prekomerno poškodovanih cevi iz obratovanja, postopek se imenuje čepljenje cevi. Pri tem posegu je vstavljen čep na vstopni in izstopni strani cevi in je mehansko ekspanziran ali zavarjen. Posledica začepitve cevi v uparjalniku pa ni samo zmanjšanje površine za prehod toplote, ampak tudi zmanjšanje pretoka primarnega reaktorskega hladila. Možno pa je tudi popravilo cevi z vstavljanjem posebnih tulcev v poškodovano cev<sup>21</sup>, pri tem pa ostane cev še nadalje v uporabi. Tulci so zavarjeni ali pa hidravlično ekspanzirani v cev. V letu 1998 so bili v poškodovane cevi jedrske elektrarne Krško prvič vstavljeni tulci brez varjenja.

Pri zmanjšanju prenosne površine za 18% je treba zmanjševati električno moč elektrarne. Začepljenost obeh uparjalnikov je po remontu elektrarne 1998 v povprečju dosegla 17,4% in se s tem zelo približala dopustni vrednosti. Vse dosedanje meritve so pokazale, da se doba trajanja uparjalnikov izteka. Nova uparjalnika sta naročena in v zadnji fazi izdelave ter bosta vgrajena v letu 2000.

### 2 TEHNIČNI PODATKI ZA UPARJALNIKA

V uparjalniku 1 je snop 4568 cevi, v uparjalniku 2 pa 4575 cevi. Delovni tlak primarnega reaktorskega hladila, ki teče skozi cevi, je 155,6 bar pri povprečni temperaturi 305,9°C. Cevi imajo zunanji premer 19,05 mm in debelino 1,09 mm. Cevi so izdelane iz nikljeve zlitine s trgovskim imenom inconel 600. Ukrivljene so v obliki črke U ter na obeh koncih uvaljane in zavarjene v cevno steno. Ravni del cevi je dolg 7182 mm, cevni loki pa imajo polmer od 57 do 1353 mm. Skupna dolžina posamične cevi je od 14500 do 18600 mm. Na ravni delih cevi je nameščenih 11 podpornih plošč, cevni loki imajo pa posebna protivibracijska držala. Imenski pretok pare skozi uparjalnika je 510 kg/s pri tlaku 63,4 bar. Temperatura napajalne vode je 221°C, izstopna temperatura pare pa 279°C.

### 3 MEHANIZMI DEGRADACIJE CEVI UPARJALNIKA

Najpogostejši mehanizmi poškodb<sup>1,2</sup> pri obratovanju cevi uparjalnikov so:

- Medkristalna napetostna korozija (angl.: intergranular stress corrosion) nastane zaradi skupnega delovanja natezne napetosti v cevni stenah in kemične sestave delovne snovi-hladila. Posledica tega je nastajanje napetostno-korozijskih vzdolžnih in obodnih razpok na mestih cevi, kjer so zaostale notranje napetosti. Le te nastanejo predvsem v prehodnem področju pri uvaljanju cevi v cevno steno.
- Interkristalna korozija (angl.: intergranular corrosion) se pojavlja zaradi elektrokorozijskega učinka medija na material, v katerem imajo kristalne meje drugačno kemijsko sestavo, kot je notranjost kristalnih zrn. Poškodbe se kažejo kot razpoke v različnih smereh na zunanjih stenah cevi.
- Stiskanje cevi (angl.: denting) je plastična deformacija stene cevi navznoter pri podpornih ploščah, in sicer zaradi korozijskih produktov in drugih usedlin, ki jih vsebuje sekundarno hladilo in ki se nabirajo med cevjo in podporno ploščo. Povečevanje debeline korozijskih produktov plastično deformira cev uparjalnika.
- Stično-trenjska obraba (angl.: fretting) nastaja kot posledica medsebojnega relativnega premikanja cevi in podpornih plošč za cevne loke z majhno amplitudo in veliko frekvenco. Značilno je površinsko odnašanje materiala, ki je vzrok za stanjšanje stene cevi uparjalnika.
- Točkasto najedanje (angl.: pitting) je manj pomembno in nastaja na mestih, kjer se usedajo korozijski produkti in druge usedline.

Napetostno korozijske razpoke v prehodnem področju nad cevno steno so bile v glavnem vzrok za čepljenje cevi v uparjalnikih jedrske elektrarne Krško v obdobju 1987-1989. Od leta 1990 dalje pa se povečuje število ugotovljenih poškodb v bližini ali pod podpornimi ploščami.

#### 4 SPREMLJANJE DEGRADACIJE CEVI

V svetu je prišlo do puščanja cevi uparjalnikov med rednim obratovanjem v 10 jedrskih elektrarnah<sup>3</sup>. Največkrat je bila za porušitev cevi kriva interkristalna napetostna korozija in sočasno utrujanje cevi zaradi mehanskih vibracij. Zato je učinkovito spremljanje degradacije cevi uparjalnikov bistvena naloga vzdrževalne službe vsake elektrarne.

Največkrat se stanje cevi uparjalnikov spremlja z neporušnimi merilnimi preiskavami<sup>4</sup>, in sicer:

- z ultrazvočno metodo<sup>5</sup> (angl.: ultrasonic testing) in
- metodo vrtničnih tokov<sup>6,7</sup> (angl.: eddy current testing).

Metoda vrtničnih tokov je bila z razvojem uparjalnikov in pojavom tipičnih poškodb na ceveh uparjalnika razvita specifično glede preizkuševalnih sond, avtomatizirane opreme in metod evaluacije. Pregled cevi uparjalnikov s sekundarne strani ni možen, mogoč je s primarne strani, vendar ob določenih omejitvah. Zaradi radioaktivnih produktov, ki so v

primarnem reaktorskem hladilu, so notranjost cevi uparjalnikov ter vstopne in izstopne komore primarnega hladila kontaminirani. Čas zadrževanja osebja, ki namešča opremo za preizkušanje, je zaradi visokih doz omejen. Aktivnosti pregleda in izvajanje popravnih posegov se poizkušajo izvesti v čim krajšem času tudi zaradi ekonomskih učinkov. Med remontom elektrarne namreč ne obratuje, vsak dan neobratovanja jedrske elektrarne Krško pa stane več 100.000 eurov.

Druge preiskovalne metode se rabijo le kot pomoč. To so predvsem:

- vizualna metoda (pregled notranjosti cevi z boroskopom)
- pregled nekaterih mest sekundarne strani uparjalnika s kamero
- preizkus tesnosti s helijem
- hidrostatski test z vodo

Te metode omogočajo dodatni delni pregled stanja cevi in stanja sekundarne strani uparjalnika in ne omogočajo izmere velikosti poškodbe glede na kriterije sprejemljivosti (globina in dolžina razpoke).

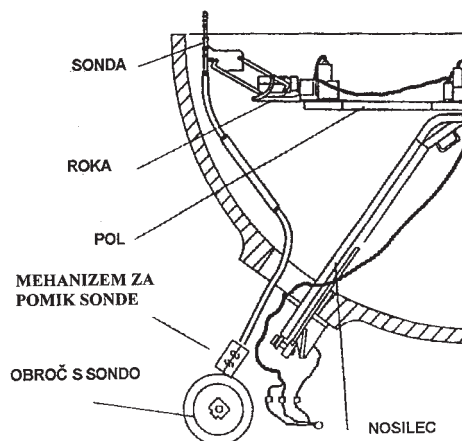
#### 5 METODA VRTINČNIH TOKOV

Metoda vrtničnih tokov je v jedrski elektrarni Krško osnovni način pregledovanja cevi<sup>8</sup>. Uporabljene so bile tudi dodatne metode pregledovanja, kot je pregled notranje površine s kamero in pregled mest privaritve tulca v cev z ultrazvokom.

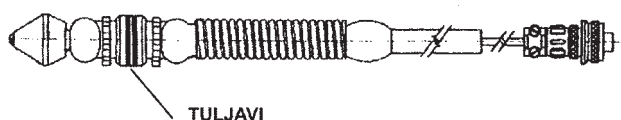
Glavni sestavni deli merilne naprave za preiskave z vrtničnimi tokovi so (slika 1):

- sonda, ki se pomika po preiskovani cevi
- mehanizem za pomik sonde
- krmilna-regulacijska naprava (manipulator)

Metoda vrtničnih tokov temelji na indukciji toka v preiskovani cevi. Poškodovana površina povzroča spremembo lokalne električne prevodnosti in permeabilnosti. Na podlagi sprememb, ki jih zazna preiskovalna sonda, je mogoče ugotoviti globino poškodbe. Sonda je



Slika 1: Avtomatična naprava za pomik sonde v komori uparjalnika  
Figure 1: ECT manipulator in steam generator chamber



Slika 2: Bobbin sonda  
Figure 2: Bobbin probe

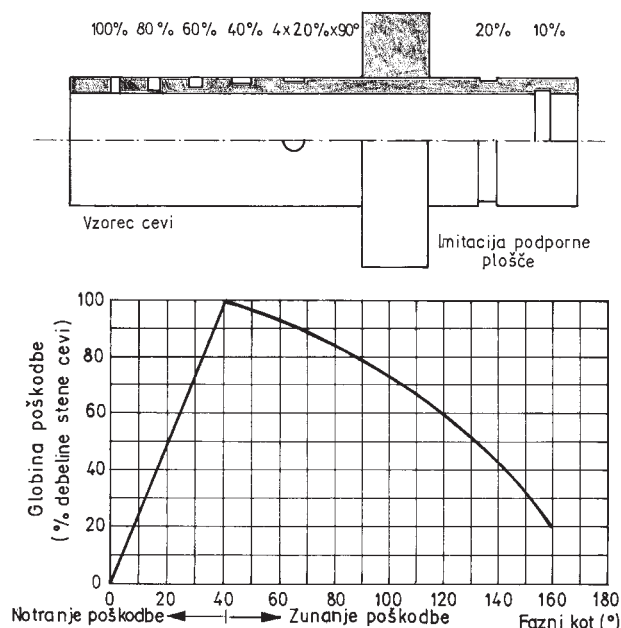
povezana s frekvenčnim generatorjem, ki v sondi vzbuja izmenični tok določene frekvence.

V zadnjih letih razvijajo še bolj občutljive sonde in pogonske mehanizme, ki lahko istočasno pomikajo tudi 8 sond. Tako je možno še skrajšati čas pregleda.

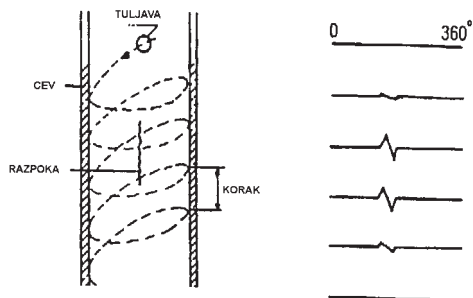
## 6 BOBBIN IN ROTIRAJOČA SONDA

Za pregled cevi uparjalnikov v jedrski elektrarni Krško uporabljamo bobbin-sondo<sup>9,10,11</sup> in rotirajočo sondo<sup>12,13</sup> (angl.: motorized rotating pancake coil). Pregled z bobbin-sondo spada med klasične načine preiskav cevi z vrtničnimi tokovi. Ta sonda ima tuljave navite po obodu cilindrične glave (slika 2). Usmerjenost teh tuljav glede na cev omogoča dobro detekcijo napak, ki so usmerjene aksialno.

Z bobbin-sondo je mogoče preiskovati celotno dolžino cevi. Značilno za njo je enostavnost in kratek čas preiskave, zadovoljiva občutljivost in zanesljivost pri odkrivanju napak. S to sondo je mogoče določiti globino napake, sposobna je razlikovati geometrijske nepravilnosti, korozijsko-erozijske procese in usedline na površini cevi. Bobbin-sonda pa ne more prepoznati večjega števila napak na ozkem področju, prav tako ne prepozna dobro smeri, oblike in dolžine teh napak.



Slika 3: Kalibracijski blok in kalibracijska krivulja  
Figure 3: Calibration block with applicable calibration curve

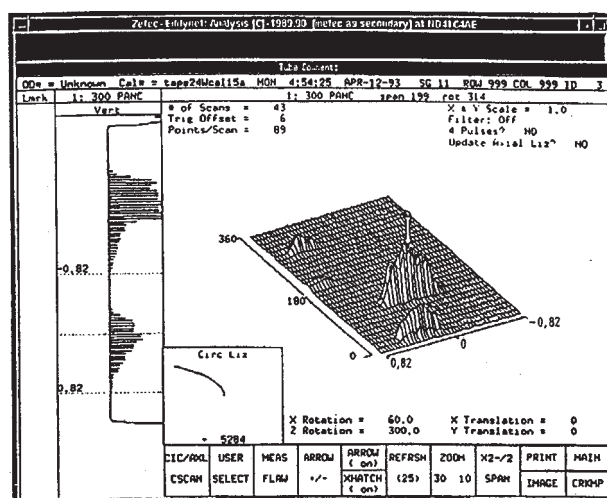


Slika 4: Rotirajoča MRPC sonda in signal razpoke  
Figure 4: MRPC probe and crack signal generation

Mere sonde je treba vedno izbrati tako, da je razlika med zunanjim premerom sonde in notranjim premerom cevi čim manjša, pri čemer pa mora sonda še vedno neovirano potovati skozi cev. Frekvence vzbujalne napetosti so izbrane glede na vrsto materiala in debelino stene cevi. S signalom bobbin-sonde je mogoče izmeriti globino napake. Le ta je funkcija faznega kota, volumen napake pa je funkcija inducirane električne napetosti. Za boljše izvedenotenje ugotovljenih napak je na razpolago primerjalni kalibracijski blok. Slika 3 prikazuje kalibracijski blok skupaj s pripadajočo merilno krivuljo za določeno frekvenco.

S primerjavo umetnih napak na kalibracijskem bloku in realnih na ceveh, dobimo dovolj dobro oceno velikosti in globine dejanskih napak.

Preiskave z rotirajočo sondo dopolnjujejo delo z bobbin-sondo. S tako sondo je mogoče pregledati napake v področjih, kjer so cevi uvaljane v cevno steno, kjer so cevi v tesnem stiku z opornimi ploščami in v področju cevni lokov, kjer je občutljivost bobbin-sonde bistveno zmanjšana. Obstajajo različne konstrukcije rotirajoče sonde, za vse pa je značilno, da so miniaturne tuljave postavljene na različnih mestih po obodu sonde tako, da sonda dobro razlikuje napake v smeri osi od tistih na obodu cevi. Posebna konstrukcija rotirajoče sonde



Slika 5: Prikaz signala rotirajoče MRPC sonde  
Figure 5: MRPC probe C-scan presentation

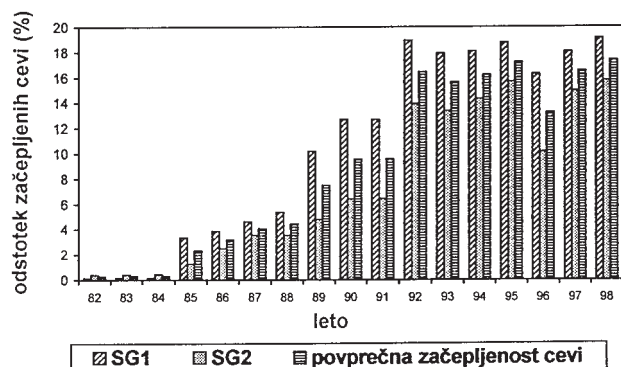
omogoča tudi pregled vgrajenih tulcev. Sonda rotira pri prehodu skozi cev s točno določenim korakom, kar omogoča glede na število rotacij tuljave točno merjenje dolžine poškodbe in njeno pozicijo glede na dolžino cevi (slika 4). Tridimenzionalni prikaz signala rotirajoče sonde pa omogoča določitev števila poškodb in njihovo smer (slika 5). Z rotirajočo sondo na vrhu cevne stene je mogoče meriti dolžino poškodb, kar je osnova za merilo sprejemljivosti kritičnih napak, ki so izračunane po mehaniki loma<sup>14-20</sup>. Za vsa druga področja na ceveh pa je odločujoča globina napake, ki je lahko največ 40% debeline stene cevi.

## 7 REZULTATI PREISKAV V LETU 1998

V letu 1998 so bile z bobbin-sondo pregledane vse cevi na obeh uparjalnikih. Z rotirajočo sondo so bili pregledani cevni loki v 1. in 2. vrsti cevi, prehodna področja in mesta, kjer so bile z bobbin-sondo odkrite večje poškodbe ter vgrajeni tulci<sup>21</sup>.

Pri pregledu vgrajenih tulcev ni bilo odkritih poškodb zvarov niti osnovnega materiala tulca, zaradi katerih bi bilo treba cevi čepiti. Ugotovljena je bila le precej hrapava površina zvarov, ki pa je bila na podlagi vizualnega in ultrazvočnega pregleda še sprejemljiva. Odkritih je bilo tudi nekaj že vgrajenih tulcev, ki so bili neprehodni za rotirajočo sondo. Te cevi so bile začepljene. Ponovno se je povečala degradacija cevi zaradi stiskanja na 10. in 11. podporni plošči na topli strani uparjalnika, in to predvsem na uparjalniku št. 2. Na njem je bilo ugotovljeno zožanje cevi na 123 mestih, na uparjalniku št. 1 pa le na 8 mestih. Največji prirastek amplitude signala bobbin-sonde je bil 25 V.

Na osnovi pregleda z metodo vrtničnih tokov je bilo na ceveh uparjalnikov št. 1 in št. 2 odkritih 109 poškodb, zaradi katerih je bilo treba cevi začepiti ali pa vstaviti tulce. Prvič je bila uporabljena nova tehnologija vstavljanja tulcev brez varjenja vse do vključno 10. podporne plošče. Dosedanja tehnologija vgradnje tulcev z varjenjem pa je dopuščala vgradnjo tulcev le do 5. podporne plošče. Obratovalno stanje uparjalnikov je razvidno iz **tabele 1**.



Slika 6: Čepjenje cevi v uparjalnikih

Figure 6: Plugged steam generators tubes

Meritve z vrtničnimi tokovi so bile izvedene s tremi kompleti opreme za zbiranje podatkov<sup>22,23</sup>. Obdelava podatkov, resolucija in analiza je bila izvedena računalniško. Vsi računalniki so bili povezani z mrežo, ki je omogočala hiter pretok informacij in takojšen vpogled v meritve in rezultate meritev. Med pregledom je bil spremljan prirast poškodb tako, da je bilo mogoče dokaj hitro določiti obseg in vrsto popravnih posegov na ceveh uparjalnika. Analizo izmerjenih podatkov<sup>24</sup> so olajšali ustrezni računalniški programi.

Tabela 1: Obratovalno stanje uparjalnikov po končanem remontu 1998

| Stanje cevi                    | Uparjalnik št. 1 | Uparjalnik št. 2 |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| Skupno štev. cevi v obratov.   | 3702             | 3864             |
| Štev. cevi s tulci v obratov.  | 338              | 357              |
| Štev. vseh začepljenih cevi    | 866              | 711              |
| Odstotek vseh začepljenih cevi | 19,0%            | 15,6%            |
| Štev. začepljenih cevi 1998    | 49               | 34               |
| Povprečna začepljenost         |                  |                  |

Povprečen delež začepljenih cevi v obeh uparjalnikih je 17,4%. Če bi v obeh uparjalnikih skupaj začepili še 50 cevi, bi dobili 18% povprečno začepljenost, ki je mejna vrednost za obratovanje elektrarne pri polni moči.

## 8 SKLEP

Za potrebe jedrske elektrarne Krško je bila v teku let razvita posebna tehnika pregledovanja cevi uparjalnikov, ki ima za osnovo merjenja z metodo vrtničnih tokov.

Začepljenost cevi se je povečala v letih 1989, 1990 in 1992 in le s sodobno tehniko je uspelo to začepljenost cevi zadržati v okviru dovoljenih vrednosti (slika 6).

Zadnje preiskave, ki so bile opravljene v letu 1998, so ponovno potrdile, da se doba obratovanja obeh uparjalnikov izteka.

V remontu 1998 so bile pregledane vse cevi v obeh uparjalnikih in vse netesne cevi začepljene. Povprečna začepljenost obeh uparjalnikov je 17,4%. S tem se je začepljenost močno približala dovoljeni mejni vrednosti 18%.

## 9 LITERATURA

- Y. S. Garud, T. L. Gerber: Intergranular Stress Corrosion Cracking of Ni-Cr-Fe Alloy 600 Tubes In PWR Primary Water -Review and Assesment for Model Development, 1983, EPRI-NP-3057
- Voltage-Based Repair Criteria for Westinghouse Steam Generator Tubes affected by Outside Diameter Stress Corrosion Cracking, 1995, NRC Generic Letter 95-05
- L. Fabjan, L. Cizelj, B. Mavko: Staranje uparjalnikov jedrskih elektrarn, Strojniški vestnik, 38 (1992) 10-12, 249-262
- R. S. Sharpe: Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. III., Academic Press, 1977, 430-479
- ASME B & PVC: Section V, Nondestructive Examination, 1986
- Data Analysis of Non-Ferromagnetic Tubing Eddy Current Inspection Results, Level II A, ZETEC, Issaquah

- <sup>7</sup> Eddy Current Inspection of Non-Ferromagnetic Tubing, Level - II, ZETEC, Issaquah
- <sup>8</sup> Nuklearna elektrarna Krško: General Procedure for Eddy Current Inspection of Steam Generator Tubes, ISI-4.301, Krško, 1998
- <sup>9</sup> ET Data Analysis Procedure for Vertical Steam Generators-Bobbin Probe, Procedure SGP-ET-02-E-Rev.2, 1994, Inetec Zagreb
- <sup>10</sup> Ispitivanje cijevi vertikalnih generatora pare pomoću ET metode-Postupak za prikupljanje podataka-Bobbin sonda, Postupak SGP-ET-19-C-Rev.0, 1994, Inetec Zagreb
- <sup>11</sup> Examination of Vertical Steam Generator Tubing by Using ET Method-Data Collection Procedure-Bobbin Probe, Procedure SGP-ET-19-E-Rev.0, 1994, Inetec Zagreb
- <sup>12</sup> Examination of Steam Generator Sleeved Tubes by Using Eddy Current Method-MRPC GPP Probe-Data Interpretation Procedure, Procedure SGP-ET-24-E-Rev.1, 1998, Inetec Zagreb
- <sup>13</sup> N. Jakšič, Analiza mogućnosti ispitivanja cijevi parogeneratora rotacionom sondom, Institut za elektroprivredu - Zagreb, izveštaj br. 647, 1988, 120 str.
- <sup>14</sup> ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section XI, Rules for Inservice Inspection of NPP Components, 1986
- <sup>15</sup> ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Section XI, IWB-2000, Examination and Inspection, 1986
- <sup>16</sup> B. Cochet, B. Flesch: Crack Stability Criteria in Steam Generator Tubes, Experience with Structures and Components in operating Reactors, Proc. of 9<sup>th</sup> International Conference on SMIRT, Laussane, Vol. D, 1987, 413-419
- <sup>17</sup> F. Erdogan: Ductile Fracture Theories for Pressurized Pipes and Containers, International Journal Pressure Vessels & Piping, 4 (1976)
- <sup>18</sup> P. E. MacDonald, V. N. Shah, L. W. Ward, P. G. Ellison: Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365, INEL-95/0383, 1996
- <sup>19</sup> P. E. MacDonald, V. N. Shah, L. W. Ward, P. G. Ellison: Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365, INEL-95/0383, 1996
- <sup>20</sup> A. K. Richardson, W. L. Server, W. G. Reuter, Adequacy of Estimates and Variability of Fracture- Related Properties for Reactor Pressure Vessel Materials, Int. J. Pressure Vessels and Piping, 19 (1985) 299-315
- <sup>21</sup> J. Vojvodič Tuma: Strokovna ocena remontnih del, posegov in preizkusov med zaustavitvijo Nuklearne elektrarne Krško zaradi menjave goriva ob koncu štirinajstega cikla, poročilo IMT štev. NCRI-85/98, Ljubljana, 1998
- <sup>22</sup> Program Plan for Tube Inspection of Steam Generators at Krško NPP-Slovenia, ISI 98, QAPP-SG-3/98-E, Rev. 0, Inetec-Institute for Nuclear Technology, Zagreb, 1998
- <sup>23</sup> Inspection Report on Eddy Current Testing of NPP Krško Steam Generator #1&#2-ISI -1998, Inetec, Zagreb
- <sup>24</sup> Examination of Steam Generator Sleeved Tubes by Using Eddy Current Method-MRPC GPP Probe-Data Collection Procedure, Procedure SGP-ET-13-E-Rev.1, Inetec Zagreb, 1998