

**SINTEZA TOPOLOŠKIH STRUKTURA UPARIVAČKO-  
KRISTALIZACIONIH POSTROJENJA UZ USLOV MAKSIMALNE  
REKUPERACIJE ENERGIJE**

**SYNTHESIS TOPOLOGICAL STRUCTURES EVAPORATION-  
CRISTALIZATION PLANTS WITH MAXIMAL RECUPERATION OF  
ENERGY**

**Mr. sci. Zehrudin Osmanović, dipl. ing. tehnolog,  
JU Univerzitet u Tuzli, Tehnološki fakultet  
Tuzla**

**Elvis Ahmetović, dipl. ing. tehnolog,  
JU Univerzitet u Tuzli, Tehnološki fakultet  
Tuzla**

**Ključne riječi:** uparavanje, kristalizacija, matematičko modeliranje, rekuperacija energije

**REZIME**

*U ovom radu je predstavljena sinteza topoloških struktura isparivačko-kristalizacionih postrojenja uz sva ograničenja koja je potrebno zadovoljiti. Uz funkciju cilja, minimalnu potrošnju ogrijevnog medija (vodena para) i maksimalnu rekuperaciju topline sekundarnih tokova (predgrijavanje pojnog toka, adijabatska ekspanzija kondenzata, termokompresija sekundarne pare, višestepeno uparavanje itd.), bit će prezentiran skup topologija koji zadovoljavaju ovaj uslov uz praćenje tehnološki parametara simulacijom matematskog modela. Na ovaj način, dobivene informacije o isparivačko-kristalizacionim postrojenjima predstavljaju dobru osnovu za moguću rekonstrukciju postrojenja u eksploataciji i upotrebu savremenih metoda optimizacije.*

**Key words:** evaporation, cristallization, mathematical modeling, recuperation of energy

**SUMMARY**

*This work presents synthesis of topological structures of evaporation-crystallization plants for all limits that are need satisfy. For objective function, minimal use of hot utility (steam) and maximal recuperation heat of secondary streams (pre-heat incoming stream, adiabatic condensate expansion, thermo compression secondary of steam, multi-level evaporation etc.) will be present set topologies which satisfy this condition with control technological of parameters simulation mathematical model. In this way, obtained informations about evaporation-crystallization plants presents the base for possible retrofit of plants in exploitation and use optimization methods.*

## 1. UVOD

Sinteza topoloških struktura isparivačkih procesa relativno je nova oblast u području sinteze hemijsko-tehnoloških procesa. Većina ranijih publikacija [1], problem uparivača je tretirala sa stanovišta jediničnih operacija ili je primarni cilj bila analiza procesa [2,3,4,5]. Tek u poslednje vrijeme [6,7] u fokusu interesovanja je sinteza topoloških struktura višestepenih uparivačkih postrojenja s posebnim naglasom na integraciji topline. Također, vrlo bitnim se pokazao i proračun minimalnih potreba pomoćnih materijala [8].

## 2. DETERMINIRANJE STRUKTURE UPARIVAČKOG SISTEMA POMOĆU TEMPERATURNE RAZLIKE

Neka se proces čiju strukturu čini  $n$ -uparivačkih stepeni, izvodi pri temperaturnoj razlici koja je jednaka razlici temperature ogrijevne pare na prvom stepenu i temperaturi sekundarne pare koja napušta poslednji stepen uparivačkog sistema. U slučaju kada se vrši sinteza procesnih alternativa onda, najčešće, varijabla,  $\Delta t$ , pripada grupi projektnih-optimizacijskih varijabli. Naime, vrijednost temperaturne razlike, kao projektne varijable, može se mijenjati na dva načina:

- promjenom temperature sekundarne pare
- promjenom parametara ogrijevne pare prvog stepena procesnog sistema

U slučajevima sinteze uparivačkih sistema koji se komponiraju u već postojeći kompleks temperaturna razlika nema elemente optimizacijske varijable i ona je najčešće utvrđena parametrima raspoloživih energenata u egzistirajućem procesu.

Koncentriranju se podvrgava elektrolitski sistem  $NaOH-NaCl-H_2O$ . Ako je zadatak definisan tako da za zadati interval promjene pritiska radne pare  $p_{op}$ ,  $p_{op} \in (p_{min.}, p_{max.})$ , onda je potrebno odrediti minimalan broj stepeni uparavanja  $n_{max.}$  uz uslov da je temperaturna razlika,  $\Delta t_p$ , na svakom uparivačkom stepenu,  $\Delta t_p > \Delta t_{max.}$ .

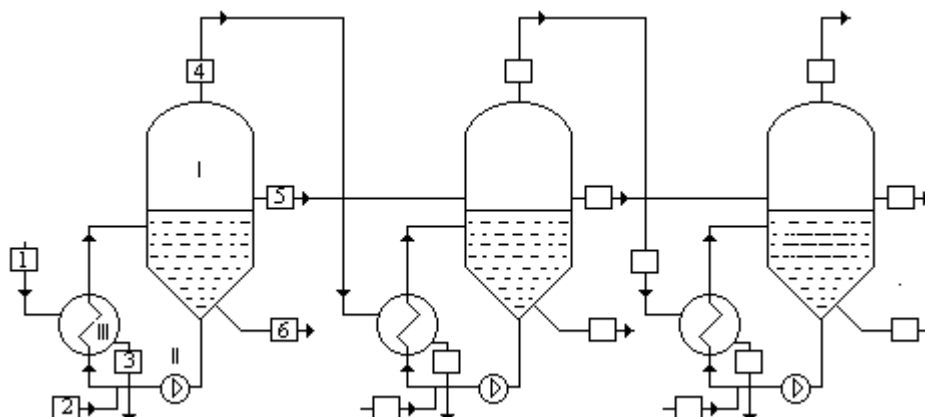
Za rješavanje ovakvog zadatka neophodno je formiranje baze podataka, sistema jednačina materijalnog, energetskog bilansa kao i jednačina funkcionalnih ovisnosti [9]. Model sadrži slijedeće opcije:

- primjenjuje se za  $n$ -stepene sisteme
- uključuje tretman sistema sa i bez kristalizacije neke od komponenata
- temperaturni režim u višestepenom sistemu se određuje uz uslov jednakih količina izdvojene vode iz uparivačkih sistema

## 3. REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju sinteze najpovoljnije strukture, prvi korak je sinteza topološke strukture klasičnog isparivačko-kristalizacionog postrojenja i analiza parametara procesnih tokova.

**Primjer 1.** Topološka struktura trostepenog uparivačkog-kristalizacionih procesa (Slika 1).



SLIKA 1. TOPOLOŠKA STRUKTURA TROSTEPENOG UPARIVAČKO KRISTALIZACIONOG POSTROJENJA.

1-tok ogrijevne pare, 2-tok elektrolitske otopine, 3-tok kondenzata, 4-tok sekundarne pare, 5-tok matične otopine,  
6-tok kristalnog produkta,  
I-isparivač, II-pumpa, III- izmjenjivač topline u sklopu izotermnog isparivača.

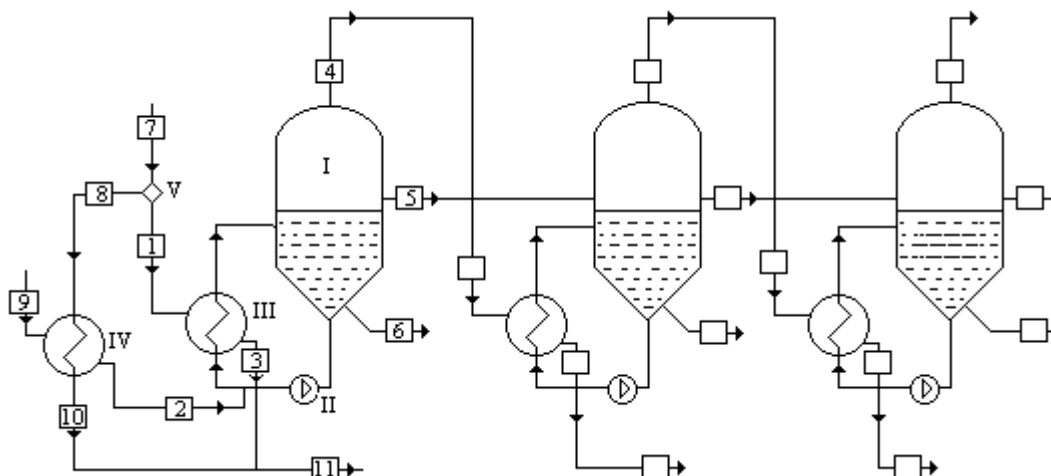
Rezultati analize procesnih parametara tokova na svakom od stepeni isparavanja dati su u Tabeli1.

TABELA 1. REZULTATI SIMULACIJE MATEMATSKOG MODELA.

|  | I stepen | II stepen | III stepen |
|--|----------|-----------|------------|
| Protok pojnog toka (kg)                    | 1200     | 943,25    | 628,86     |
| Tok matične otopine (kg)                   | 943,25   | 628,86    | 319,99     |
| Tok sekundarne pare (kg)                   | 256,74   | 256,74    | 256,74     |
| Tok kristalnog produkta (kg)               | 0        | 57,48     | 52,27      |
| Tok svježe ogrijevne pare (kg)             | 462      | 0         | 0          |
| Sadržaj NaOH u pojnom toku (mas.udio)      | 0,12     | 0,1526    | 0,22       |
| Sadržaj NaOH u matičnoj otopini(mas.udio)  | 0,152    | 0,22      | 0,45       |
| Sadržaj NaCl u pojnom toku (mas.udio)      | 0,10     | 0,127     | 0,0992     |
| Sadržaj NaCl u matičnoj otopini (mas.udio) | 0,127    | 0,0992    | 0,0655     |
| Aktivnost vode                             | 0,6766   | 0,60      | 0,328      |
| Tem isparavanja (°C)                       | 95       | 80        | 60         |
| Temp. sekundarne pare (°C)                 | 84,7     | 68,15     | 37,76      |

U cilju rekuperacije topline uvodi se predgrijavanje pojnog toka svježom ogrijevnom parom na prvom stepenu. Na ovaj način, izotermni isparivač nema ulogu i predgrijača elektrolitske otopine jer otopina ulazi u isparivač na temperaturi koja vlada u prvom stepenu uparavanja.

**Primjer 2.** Sintetizirana topološka struktura trostepenog uparivača-kristalizera sa predgrijavanjem pojnog toka elektrolitske otopine svježom ogrijevnom parom (Slika 1).



SLIKA 2. TOPOLOŠKA STRUKTURA TROSTEPENOG UPARIVAČKO KRISTALIZACIONOG POSTROJENJA. SA PREDGRIJAVANJEM POJNOG TOKA.

1-tok ogrijevne pare nakon razdvajaa, 2-tok elektrolitske otopine, 3-tok kondenzata, 4-tok sekundarne pare, 5-tok matične otopine, 6-tok kristalnog produkta, 7-tok svježe ogrijevne pare, 8-tok ogrijevne pare namijenjen za predgrijavanje elektrolitske otopine, 9-tok elektrolitske otopine ispred predgrijača, 10-tok kondenzata ogrijevne pare nakon predgrijavanja elektrolitske otopine, 11- tok ukupnog kondenzata nakon prvog stepena  
I-isparivač, II-pumpa, III-izmjenjivač toplote u sklopu izotermnog isparivača ,IV-predgrijač elektrolitske otopine, V-razdvajač ogrijevne pare

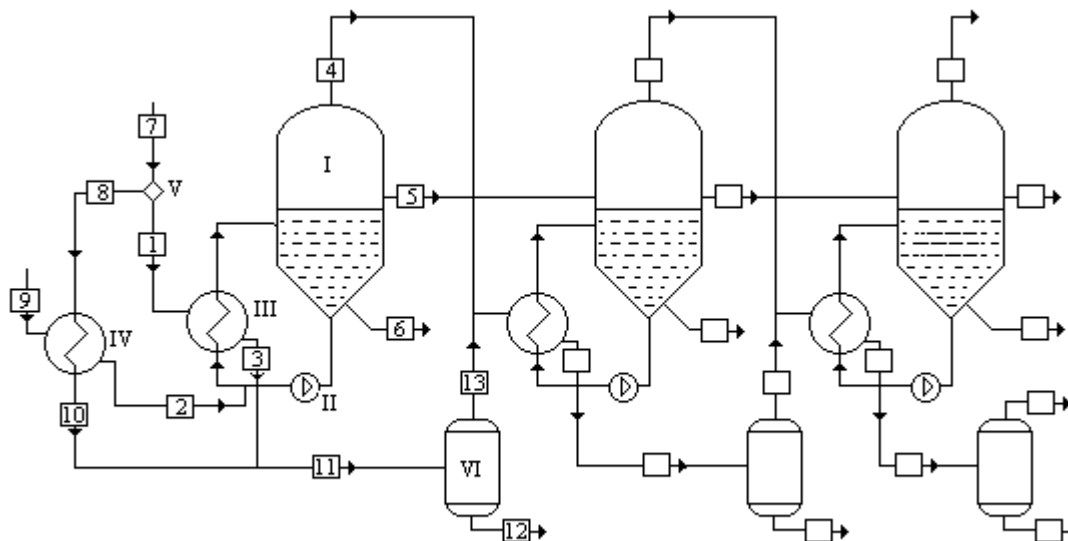
Rezultati analize procesnih parametara tokova na svakom od stepeni isparavanja dati su u Tabeli 2.

TABELA 2. REZULTATI SIMULACIJE MATEMATSKOG MODELA.

|  | I stepen | II stepen | III stepen |
|--|----------|-----------|------------|
| Protok pojnog toka (kg)                    | 1200     | 943,25    | 628,86     |
| Tok matične otopine (kg)                   | 943,25   | 628,86    | 319,99     |
| Tok sekundarne pare (kg)                   | 256,74   | 256,74    | 256,74     |
| Tok kristalnog produkta (kg)               | 0        | 57,48     | 52,27      |
| Tok svježe ogrijevne pare (kg)             | 343      | 0         | 0          |
| Tok miješane pare za predgri. (kg)         | 126      | 0         | 0          |
| Tok miješane pare za uparavanje            | 216      | 256,7     | 256,7      |
| Sadržaj NaOH u pojnom toku (mas.udio)      | 0,12     | 0,1526    | 0,22       |
| Sadržaj NaOH u matičnoj otopini (mas.udio) | 0,152    | 0,22      | 0,45       |
| Sadržaj NaCl u pojnom toku (mas.udio)      | 0,10     | 0,127     | 0,0992     |
| Sadržaj NaCl u matičnoj otopini (mas.udio) | 0,127    | 0,0992    | 0,0655     |
| Aktivnost vode                             | 0,6766   | 0,60      | 0,328      |
| Temp. isparavanja (°C)                     | 95       | 80        | 60         |
| Temp. sekundarne pare (°C)                 | 84,7     | 68,15     | 37,76      |

Uvođenjem ekspanzije kondenzata na svakom od stepeni uparavanja, uparivačko postrojenje napuštaju kondenzati sa znatno manjim energetske potencijalima a jedan dio pare se ponovo vraća u sistem.

**Primjer 3.** Sintetizirana topološka struktura trostepenog uparivačko-kristalizacionog postrojenja sa ekspanzijom kondenzata na svakom od stepeni



SLIKA 3. TOPOLOŠKA STRUKTURA TROSTEPENOG UPARIVAČKO KRISTALIZACIONOG POSTROJENJA. SA EKSPANZIJOM KONDENZATA NA SVAKOM OD STEPENI.

1-tok ogrijevne pare nakon razdvajaa, 2-tok elektrolitske otopine, 3-tok kondenzata, 4-tok sekundarne pare, 5-tok matične otopine, 6-tok kristalnog produkta, 7-tok svježe ogrijevne pare, 8-tok ogrijevne pare namijenjen za predgrijavanje elektrolitske otopine, 9-tok elektrolitske otopine ispred predgrijača, 10-tok kondenzata ogrijevne pare nakon predgrijavanja elektrolitske otopine, 11-tok ukupnog kondenzata nakon prvog stepena, 12-tok kondenzata nakon adijabatskog ekspandera, 13-tok pare nakon adijabatskog ekspandera  
I-isparivač, II-pumpa, III-izmjenjivač topline u sklopu izotermnog isparivača, IV-predgrijač elektrolitske otopine, V-razdvajač ogrijevne pare, VI-adijabatski ekspander

Rezultati analize procesnih parametara tokova na svakom od stepeni isparavanja dati su u Tabeli 3.

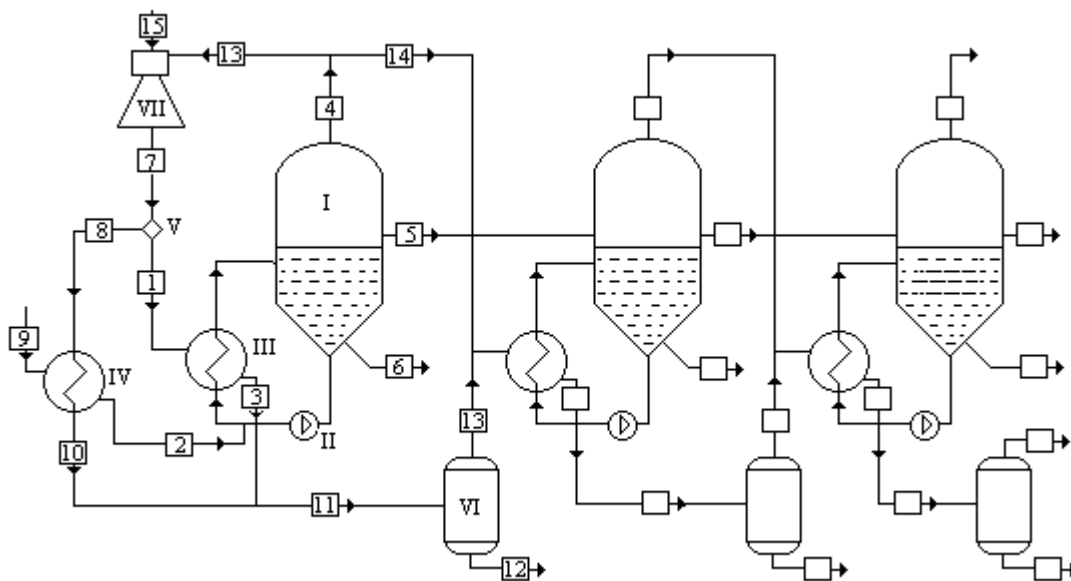
TABELA 3. REZULTATI SIMULACIJE MATEMATSKOG MODELA.

|  | I stepen | II stepen | III stepen |
|--|----------|-----------|------------|
| Protok pojnog toka (kg)                                      | 1200     | 943,25    | 628,86     |
| Tok matične otopine (kg)                                     | 943,25   | 628,86    | 319,99     |
| Tok sekundarne pare (kg)                                     | 256,74   | 256,74    | 256,74     |
| Tok kristalnog produkta (kg)                                 | 0        | 57,32     | 52,42      |
| Tok svježe ogrijevne pare (kg)                               | 343      | 0         | 0          |
| Tok na izlazu iz mješača kondenzata (kg)                     | 282      | 599       | 856        |
| Tok pare ekspandera (kg)                                     | 60,92    | 12,75     | 52,10      |
| Tok kondenzata ekspandera (kg)                               | 282      | 587       | 804,3      |
| Tok nakon miješanja sekund. para uparivača I ekspandera (kg) | 317      | 269,5     | 307        |
| Sadržaj NaOH u pojnom toku (mas.udio)                        | 0,12     | 0,152     | 0,22       |
| Sadržaj NaOH u matičnoj otopini (mas.udio)                   | 0,152    | 0,22      | 0,45       |
| Sadržaj NaCl u pojnom toku (mas.udio)                        | 0,10     | 0,127     | 0,099      |
| Sadržaj NaCl u matičnoj otopini                              | 0,127    | 0,099     | 0,065      |
| Aktivnost vode   | 0,676    | 0,61      | 0,328      |
| Tem isparavanja (°C)   | 95       | 80        | 60         |
| Temp. sekundarne pare (°C)                                   | 84,7     | 72,8      | 37,76      |

Jedan dio uparene vode, (Slika 4, tok 13), kompresijom se dovodi na razinu pritiska ogrijevne pare, tako da se se može koristiti kao ogrijevna para u istom aparatu. Termokompresija se može izvršiti na dva načina:

- mehaničkim kompresorima, prvenstveno kada se komprimuju veliki volumeni uparene vode.
- parnim mlaznim duhaljkama (injektorima).

**Primjer 4.** Sintetizirana topološka struktura trostepenog uparivačko-kristalizacionog postrojenja sa termokompresijom, predgrijavanjem elektrolitske lužine na prvom stepenu i ekspanzijom kondenzata na svakom od stepeni uparavanja



SLIKA 4. TOPOLOŠKA STRUKTURA TROSTEPENOG UPARIVAČKO-KRISTALIZACIONOG POSTROJENJA SA TERMOKOMPRESOROM I PREDGRIJAVANJEM ELEKTROLITSKE LUŽINE.

1-tok ogrijevne pare nakon razdvajaa, 2-tok kondenzata ogrijevne pare nakon predgrijavanja elektrolitske otopine, 3-tok kondenzata ogrijevne pare nakon razdvajaa, 4-tok sekundarne pare, 5-tok matične otopine, 6-tok kristalnog produkta, 7-tok miješane pare, 8-tok ogrijevne pare namijenjen za predgrijavanje elektrolitske otopine, 9-tok elektrolitske otopine ispred predgrijača, 11- tok ukupnog kondenzata nakon prvog stepena, 12- tok kondenzata nakon adijabatskog ekspandera, 13-tok pare nakon adijabatskog ekspandera, 14-tok sekundarne pare ka drugom stepenu, 15- tok sekundarne pare namijenjen za termokompresiju  
 I-isparivač, II-pumpa, III-izmjenjivač toplote u sklopu izotermnog isparivača, IV-predgrijač elektrolitske otopine, V-razdvajač ogrijevne pare, VI-adijabatski ekspander, VII-termokompresor

Rezultati analize procesnih parametara tokova na svakom od stepeni isparavanja dati su u Tabeli 4.

TABELA 4. REZULTATI SIMULACIJE MATEMATSKOG MODELA.

|  | I stepen | II stepen | III stepen |
|--|----------|-----------|------------|
| Protok pojnog toka (kg)                                      | 1200     | 943,25    | 628,86     |
| Tok matične otopine (kg)                                     | 943,25   | 628,86    | 319,99     |
| Tok sekundarne pare (kg)                                     | 256,74   | 256,74    | 256,74     |
| Tok kristalnog produkta (kg)                                 | 0        | 57,32     | 52,11      |
| Tok miješane pare na izlazu iz termokopresora (kg)           | 434      | 0         | 0          |
| Tok svježe ogrijevne pare (kg)                               | 397,9    | 0         | 0          |
| Tok ogrijevne miješane pare (kg)                             | 273,7    | 254,27    | 254,4      |
| Tok miješane pare za predgrijavanje (kg)                     | 160      | 0         | 0          |
| Tok na izlazu iz mješača kondezata (kg)                      | 434      | 653,6     | 910        |
| Tok sek. pare koja se uvodi u termokopresor (kg)             | 37,10    | 0         | 0          |
| Tok pare ekspandera (kg)                                     | 44,02    | 24,74     | 40,47      |
| Tok kondenzata ekspandera (kg)                               | 389      | 628,9     | 869,9      |
| Tok nakon miješanja sekund. para uparivača I ekspandera (kg) | 263      | 281,4     | 256        |
| Sadržaj NaOH u pojnom toku (mas.udio)                        | 0,12     | 0,152     | 0,22       |
| Sadržaj NaOH u matičnoj otopini(mas.udio)                    | 0,152    | 0,22      | 0,45       |
| Sadržaj NaCl u pojnom toku (mas.udio)                        | 0,10     | 0,127     | 0,099      |
| Sadržaj NaCl u matičnoj otopini(mas.udio)                    | 0,127    | 0,099     | 0,065      |
| Aktivnost vode   | 0,676    | 0,61      | 0,328      |
| Tem isparavanja (°C)   | 95       | 75        | 60         |
| Temp. sekundarne pare (°C)                                   | 84,7     | 63,42     | 37,76      |

### 3. ZAKLJUČAK

Sintezom topoloških struktura isparivačko-kristalizacionih postrojenja, koje u svojoj strukturi sadrže, pored standardnih elemenata, predgrijač polazne otopine, termokompresor sekundarne pare i adijabatski ekspander nastaju sistemi koji su znatno povoljniji sa stanovišta rekuperacije topline što je i pokazano analizom procesnih parametara sintetiziranih struktura.

U radu je analiziran samo jedan dio skupa alternativnih procesnih struktura, jer ako se uzme u obzir mogućnost izbora razmještaja pojedinih aparata, način izmjene topline između elektrolitske otopine i ogrijevne pare (istostrujni, protustrujni, kombinovani) onda proces sinteze procesnih struktura postaje kombinatorijalno "eksplozivan" [10].

Pri razmatranju procesnih alternativa nije uzetu obzir ekonomski aspekt (cijene aparata, energije, pomoćnih materijala i dr.) što bi sigurno dalo više informacija o sintetiziranim strukturama.

Ovako temeljno analizirani uparivačko-kristalizacioni procesi predstavljaju dobru «bazu» za upotrebu matematičkog programiranja i savremenih procesnih simulatora, u cilju određivanja minimalne upotrebe pogonskih sredstava, minimalnog broja izmjenjivača topline, kao i mogućnost strukturne optimizacije procesnih shema.

**Simboli:**

|            |  |
|------------|--|
| $\Delta t$ | -korisna temperaturna razlika između stepeni, (°C) |
| $n$        | -broj stepeni uparavanja                           |
| $p$        | -pritisak, (Pa)                                    |

**Eksponenti:**

|        |                        |
|--------|------------------------|
| $op$   | -ogrijevna para        |
| $min.$ | -minimalna vrijednost  |
| $max.$ | -maksimalna vrijednost |

**4. REFERENCE**

- [1] Standiford F.C.: Evaporation, Chemical Engineering 70, 1963,158-176.
- [2] Holland C.D.: Fundamentals and Modeling of Separation Processes. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- [3] Newel R.B., Fisher D.G. Model development, reduction and experimental evaluation for an evaporator. Ind. Engineering Chemical. Process Des. Dev. 11. 1972.
- [4] Stewart G. , Beveridge G.S.: Steady state cascade simulation in multiple effect evaporation. Comput.chem. Engineering, 1, 1977.
- [5] Newell R.B.: A comparative study of model and goal coordination in the multilevel optimization of a double-effects.
- [6] Hillenbrandt J. B., Westerberg A.W.: The synthesis of multiple-effect evaporation systems using minimum utility insights-I. A cascaded heat representation, Computers Chemical Engineering. Vol. 12, No7, 1988.
- [7] Hillenbrandt J. B., Westerberg A.W.: The synthesis of multiple-effect evaporation systems using minimum utility insights-II. Liquid flowpattern selection, Computers Chemical Engineering. Vol. 12, No7, 1988.
- [8] Hillenbrandt J. B., Westerberg A.W.: The synthesis of multiple-effect evaporation systems using minimum utility insights-III. Temperature selection and network design. Computers Chemical Engineering. Vol 12, No7, 1988.
- [9] Osmanović Z.:Modelirajući blok isparivača kristalizera za sintezu sistema koncentriranja elektrolitske lužine, Magistarski rad , Tuzla, 1999 godine.
- [10] Douglas J. M.: A Hierarchical Decision Procedure for Process Synthesis , AIChEJ, 1985, 31,353.