

# Model razvoja električnoga generatora velike snage

---

**Triplat, Ivan**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2021**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:237368>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-19**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Triplat

**MODEL RAZVOJA ELEKTRIČNOGA  
GENERATORA VELIKE SNAGE**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Ivan Triplat

# **MODEL RAZVOJA ELEKTRIČNOGA GENERATORA VELIKE SNAGE**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Dorian Marjanović, prof. emer.

Zagreb, 2021.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
AND NAVAL ARCHITECTURE

Ivan Triplat

# **MODEL OF HIGH POWER ELECTRIC GENERATOR DEVELOPMENT**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
Dorian Marjanović, prof. emerit.

Zagreb, 2021.

# Podaci za bibliografsku karticu

---

|  |  |
|--|--|
| UDK:                                     | 621.313.1  |
| Ključne riječi:                          | Razvoj modela, Veliki električni generator, DSM, DMM, MDM, Matrica proračuna, Matrica arhitekture, Matrica parametara, Praćenje utjecaja parametara<br><br>Development of model, Large electric generator, DSM, DMM, MDM, Matrix of calculations, Architecture matrix, Parameter matrix, Monitoring of parameter influence |
| Znanstveno područje:                     | TEHNIČKE ZNANOSTI  |
| Znanstveno polje:                        | STROJARSTVO  |
| Institucija u kojoj je rad izrađen:      | KONČAR GENERATORI I MOTORI   |
| Mentor rada:                             | dr. sc. Dorian Marjanović, prof. emer.   |
| Broj stranica:                           | 185  |
| Broj slika:                              | 92   |
| Broj tablica:                            | 2  |
| Broj korištenih bibliografskih jedinica: | 162  |
| Datum obrane:                            | 30.09.2021. godine   |
| Povjerenstvo:                            | dr. sc. Mario Štorga, red. prof.<br>dr. sc. Dorian Marjanović, prof. emer.<br>dr. sc. Željko Ivandić, red. prof.   |
| Institucija u kojoj je rad pohranjen:    | Sveučilišta u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje   |

# Zahvala

---

Posebno zahvaljujem svojem mentoru Dorianu Marjanoviću, prof, emer., koji je zaslužan tome da se ovaj rad uspio privesti kraju i koji je bio potpora od početka, pa do samoga kraja - mentoru i velikom čovjeku koji nije odbio studenta s postdiplomskog studija, već ga je dočekaao široko otvorenih vrata, spreman pomoći.

Zahvaljujem članovima povjerenstva, prof. dr. sc. Ivandiću i prof. dr. sc. Mariu Štorgi, što su našli vremena i volje čitati ovaj rad. Izdvojili su puno truda kako bi dali iscrpne komentare koji su doprinijeli boljem radu.

Zahvaljujem supruzi Kristini, djeci Kristijanu i Robertu i bratu Marku, koji su morali trpjeti brojne mjesece izrade rada.

Zahvaljujem ocu Josipu, koji je dočekaao kraj ovog rada, zahvaljujem majci Đurđi, koja nas je nažalost napustila prije samog završetka rada.

Puno zahvaljujem i prijateljima i kolegama iz Končara, koji su izdvojili svoje vrijeme i trud kako bi se ovaj rad mogao privesti kraju - bilo to sudjelovanjem u sastancima, komentiranjem rada ili ispunjavanjem matrice. Pogotovo sam zahvalan kolegama iz GIM-a Ivanu Vazdaru, Danijelu Dukiću i Mislavu Šuflaju te kolegi Lucijanu Stamaću s FSB-a, koji su izdvojili nedvojbeno najviše svojeg vremena i truda da bi pomogli u ovom radu.

Također, puno zahvaljujem i profesorici hrvatskog jezika Vesni Pudrlji, na uloženom trudu i vremenu izdvojenom za lektoriranje ovoga rada.

Još jednom, hvala vam svima.

# Sadržaj

---

|   |    |
|---|----|
| Sažetak .....   | 4  |
| Summary .....   | 5  |
| Popis slika .....   | 6  |
| Popis tablica .....   | 9  |
| 1. Uvod.....  | 10 |
| 1.1. Motivacija.....  | 10 |
| 1.2. Dosadašnje spoznaje .....  | 14 |
| 1.3. Hipoteza rada.....   | 21 |
| 1.4. Plan istraživanja i metodologija rada .....                                | 22 |
| 1.5. Očekivani znanstveni doprinos .....  | 24 |
| 1.6. Struktura rada .....   | 25 |
| 2. Značajke konstruiranja vertikalnih hidrogeneratora .....                     | 27 |
| 2.1. Projekt generatora .....   | 30 |
| 2.2. Konstrukcija generatora .....  | 31 |
| 2.3. Mehanički proračuni generatora.....  | 35 |
| 3. Primjena DSM-a u konstruiranju .....   | 38 |
| 3.1. Konstruiranje, mehanički proračuni i planiranje uz DSM .....               | 38 |
| 3.2. Identificiranje relacija i definiranje parametara analize generatora ..... | 45 |
| 3.3. Modeliranje .....  | 50 |
| 3.3.1. Modeliranje strukture .....  | 50 |
| 3.3.2. Prepoznavanje specifičnih značajki strukture .....                       | 50 |
| 3.4. DSM arhitekture proizvoda <i>Product Architecture DSM</i> .....            | 52 |
| 3.5. DSM organizacijske arhitekture <i>Organization Architecture DSM</i> .....  | 58 |
| 3.6. DSM arhitekture procesa <i>Process Architecture DSM</i> .....              | 60 |
| 3.7. DSM s više domena <i>Multi-Domain DSM</i> .....                            | 65 |
| 3.7.1. DSM s 1,5 domenom.....   | 66 |
| 3.7.2. DMM s dvije domene.....  | 67 |
| 3.7.3. MDM s dvije ili više domena .....  | 69 |
| 3.8. Analiziranje strukture i evaluacija.....                                   | 71 |
| 4. Analiza procesa po kriteriju vremena izvođenja .....                         | 72 |
| 5. Modeliranja generatora velike snage.....                                     | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. DSM proračuna vertikalnog električnog generatora .....                                     | 86  |
| 5.2. DSM konstrukcije vertikalnog električnog generatora .....                                  | 95  |
| 5.3. DSM parametara generatora.....   | 100 |
| 5.4. DMM parametara – proračuna i parametara – dokumentacije.....                               | 111 |
| 5.5. MDM parametara proračuna i nacrtu .....  | 119 |
| 6. Rasprava .....   | 128 |
| 7. Zaključak.....   | 138 |
| 8. Literatura .....   | 140 |
| 9. Životopis.....   | 152 |
| 10. Biography .....   | 153 |
| 11. Popis objavljenih radova .....  | 154 |
| 12. Dodatak .....   | 156 |
| I. Teorijske osnove, particioniranje .....  | 156 |
| I.I. Analiza povratnih petlji pretraživanjem matrice .....                                      | 158 |
| I.II. Analiza povratnih petlji opisom skupova ovisnosti .....                                   | 159 |
| I.III. Analiza povratnih petlji traženjem puta (eng. Path searching) .....                      | 160 |
| I.IV. Analiza povratnih petlji potenciranjem matrice (eng. Powers of the Adjacency Matrix)..... | 162 |
| I.V. Triangularizacija (eng. Triangularization) .....   | 165 |
| I.VI. Analiza korištenjem matrice dostupnosti (eng. Reachability Matrix Method).....            | 168 |
| II.I. Teorijske osnove, klasteriranje.....  | 172 |
| II.II. Teorijske osnove, analiza cijepanja .....  | 174 |
| II.III. Teorijske osnove, analiza ulančavanja .....   | 175 |
| III.I. Matlab kod za novi predloženi program .....  | 177 |



# Sažetak

---

Tvrtka Končar - Generatori i Motori d. d. ima dugogodišnje iskustvo u proizvodnji električnih rotacionih strojeva. Složeni uvjeti na svjetskom tržištu, prije svega pojačana konkurencija i stalni trend snižavanja cijene, uz povećanje zahtjeva, rezultiraju povećanom složenosti proizvoda i kraćim rokovima isporuke, čime uzrokuju dodatne zahtjeve na razvoj generatora. Električni generator je, i pored brojnih izvedbi, relativno poznat proizvod, s dugim životnim vijekom. Iako se proizvode dugi niz godina, nije poznato da je napravljen cjeloviti model razvoja i konstrukcije generatora. Iako doprinose boljem uvidu u ponašanje i svojstva proizvoda, nove metode proračuna konstrukcije i alati koji omogućuju simulacije fizikalnih stanja u proizvodu istovremeno čine razvojni proces složenijim i zahtjevnijim.

Sustavnim pristupom analizi razvojnog procesa generatora, može se prepoznati prostor za poboljšanje razvojnog procesa i same konstrukcije i time doprinijeti naporima koji za cilj imaju razvoj jeftinijeg proizvoda, uz zadržavanje kvalitativnih značajki proizvoda, kao što su - uz temeljne funkcionalne značajke - zadani vijek trajanja, vrijeme isporuke itd.

Cjeloviti pristup razvoju modela proizvoda i razvojnog procesa, posebno mehaničkih proračuna, omogućio bi uvid u relacije koje sada nisu vidljive u cijelosti, tj. omogućuje jednostavnije i bolje razumijevanje sustava. Boljim razumijevanjem relacija i interakcija unutar sustava, otvorit će se nove mogućnosti poboljšanja razvojnog procesa i generatora.

# Summary

---

Končar-Generators and Motors Inc. company has a long-term experience in production of electrical rotating machines. Tough conditions on the world's market, most of all increased competition and continuous trend in price reduction and increased demands, result in increased complexity of the product thus causing additional demands on the generator development. Electric generator is, despite of its various designs, relatively known product with a long-term life cycle. Although generators are being produced for a long period of time, it is not known whether a thorough developing model and generator design has been made. New calculation methods in the design, as well as new tools, enable simulations of physical conditions of the product and although contribute to better insight into the behaviour and characteristics of the product, at the same time they make developing process more complicated and more demanding.

With a systematic approach to the analysis of the generator developing process, additional space for improving the developing process and the design itself can be found, which contribute to the efforts aim, that is development of cheaper product, keeping qualitative characteristics of the product at the same time, such as (besides the basic functional characteristics) required life cycle, delivery time etc. Comprehensive approach to the development of product model and developing process, especially mechanical calculations, would enable insight into relations which are now not entirely visible, i.e., enables simpler and better understanding of the system. By better understanding of the relations and interactions within the system, new possibilities of improving the developing process and generator itself will appear.

# Popis slika

---

|   |    |
|---|----|
| Slika 1.1. Tijek informacija u poduzeću, prema [3].....   | 11 |
| Slika 1.2. DSM u upravljanju zračnim prometom prema [47].....   | 17 |
| Slika 1.3. Struktura disertacije .....  | 26 |
| Slika 2.1. Odabir tipa turbine prema [77].....  | 28 |
| Slika 2.2. Dijelovi hidroagregata prema [79].....   | 29 |
| Slika 2.3. Shema strukture statora komplet [79] .....   | 32 |
| Slika 2.4. Shema strukture konstrukcijske dokumentacije velikog generatora prema [79] .....                                 | 34 |
| Slika 2.5. Uobičajeni mehanički proračuni za veliki generator prema [79].....   | 37 |
| Slika 3.1. Pojednostavljeni postupak konstruiranja vratila .....  | 39 |
| Slika 3.2. DSM ( <i>design structure matrix</i> ) .....   | 41 |
| Slika 3.3. Veze između elemenata .....  | 41 |
| Slika 3.4. Podjela DSM matrica [22] .....   | 42 |
| Slika 3.5. Numerički DSM prema [25] .....   | 43 |
| Slika 3.6. Definiranje konstrukcijskih relacija pomoću intervjua .....  | 48 |
| Slika 3.7. Pregled sustava.....   | 50 |
| Slika 3.8. Limiti strukturnog prikaza u matričnom obliku.....   | 51 |
| Slika 3.9. Particioniranje matrice .....  | 52 |
| Slika 3.10. Pregled sustava preko grafa i moguća optimizacija micanjem jedne veze .....                                     | 52 |
| Slika 3.11. V dijagram prema [25] .....   | 53 |
| Slika 3.12. Kontrola klime u autu preuzeto iz [25] .....  | 55 |
| Slika 3.13. Particionirana DSM matrica kontrole klime u autu prema [25].....  | 57 |
| Slika 3.14. Razmjena informacija u organizacijskoj arhitekturi prema [25] .....   | 59 |
| Slika 3.15. Komunikacijska mreža s prikazom matrice, prema [25] .....   | 59 |
| Slika 3.16. DSM procesa UCAV vozila prije particioniranja .....   | 63 |
| Slika 3.17. DSM procesa UCAV vozila nakon particioniranja.....  | 63 |
| Slika 3.18. Domene u projektu.....  | 66 |
| Slika 3.19. DSM s 1,5 domene.....   | 67 |
| Slika 3.20. DMM s dvije domene .....  | 68 |
| Slika 3.21. Primjeri DMM-a s dvije domene .....   | 69 |
| Slika 3.22. Primjer područja primjene MDM-a .....   | 70 |
| Slika 4.1. Primjer DSM-a prije particioniranja (lijevo) i nakon particioniranja (desno)<br><i>Reachability</i> metodom..... | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 4.2. DSM prije particioniranja novim predloženim načinom računanja.....  | 73  |
| Slika 4.3. Rezultat nakon particioniranja s novim predloženim načinom računanja .....  | 74  |
| Slika 4.4. Broj permutacija u ovisnosti o veličini matrice .....   | 75  |
| Slika 4.5. Drugi primjer s novim predloženim načinom računanja vremena.....  | 76  |
| Slika 4.6. Zapis vremena za svaku permutaciju .....  | 77  |
| Slika 4.7. Moguća suboptimalna rješenja ako se ne upotrebljava paralelno računanje vremena .   | 77  |
| Slika 4.8. Analiza računanjem vremena izvođenja – razlike s postojećim programom.....  | 79  |
| Slika 4.9. Primjer početne matrice (lijevo) i dijagram „broj permutacije - zapis vremena“ za svaku permutaciju, uporabom smanjenja vremena izvođenja zbog paralelnog izvođenja zadataka..... | 80  |
| Slika 4.10. Analiza računanjem vremena izvođenja – optimalno rješenje uporabom smanjenja vremena zbog paralelnog izvođenja zadataka .....  | 80  |
| Slika 5.1. Skica pojašnjenja smjera sila (izvedba s Francis turbinom) .....  | 88  |
| Slika 5.2. Nепarticionirana matrica osnovnih proračuna .....   | 89  |
| Slika 5.3. Tablica proračuna i ovisnost proračuna o drugim proračunima .....   | 90  |
| Slika 5.4. Particionirana matrica osnovnih proračuna.....  | 91  |
| Slika 5.5. Proračuni analizirani metodom ulančavanja .....   | 93  |
| Slika 5.6. Dijelovi generatora prema [79] .....  | 96  |
| Slika 5.7. Nепarticionirana matrica komponenata generatora .....   | 97  |
| Slika 5.8. Tablica međuovisnosti komponenata.....  | 98  |
| Slika 5.9. Particionirana matrica komponenata generatora.....  | 99  |
| Slika 5.10. Tablica međuovisnosti parametara.....  | 108 |
| Slika 5.11. Početni DSM Parametara generatora .....  | 109 |
| Slika 5.12. Particionirani DSM Parametara generatora .....   | 110 |
| Slika 5.13. DMM Parametara i proračuna prije (iznad) i nakon optimiranja (ispod) .....   | 114 |
| Slika 5.14. DMM Parametara i dokumentacije, lijevo početna, desno nakon prve optimizacije  | 117 |
| Slika 5.15. DMM Parametara i dokumentacije, nakon optimiranja i dodatne dorade veza.....   | 118 |
| Slika 5.16. Primjer praćenja utjecaja odabranog parametra na ostale parametre, dokumentaciju i proračune.....  | 120 |
| Slika 5.17. Primjer optimiranja slijeda izrade proračuna na temelju dostupnosti parametara ....  | 121 |
| Slika 5.18. Primjer optimiranja slijeda izrade dokumentacije na temelju dostupnosti parametara .....   | 122 |
| Slika 5.19. MDM parametara, proračuna i dokumentacije .....  | 124 |
| Slika 5.20. MDM s optimiranim slijedom izrade dokumentacije i proračuna .....  | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 5.21. Konačni MDM s optimiranim slijedom izrade dokumentacije i proračuna.....             | 126 |
| Slika 5.22. MDM utjecaj određenog parametra na ostale parametre, proračune i dokumentaciju ..... | 127 |
| Slika I.II 1. korak topološkog particioniranja .....   | 156 |
| Slika I.II 2. korak topološkog particioniranja .....   | 157 |
| Slika I.III. 3. korak topološkog particioniranja .....   | 157 |
| Slika I.IV. 4. korak topološkog particioniranja.....   | 157 |
| Slika I.V. 2. korak particioniranja analizom traženja puta.....                                  | 160 |
| Slika I.VI. 3. korak particioniranja analizom traženja puta .....                                | 160 |
| Slika I.VII. 4. korak particioniranja analizom traženja puta .....                               | 161 |
| Slika I.VIII. 7. korak particioniranja analizom traženja puta.....                               | 161 |
| Slika I.IX. Pretvaranje matrice u binarnu.....   | 162 |
| Slika I.X. Analiza potenciranjem - dizanje potencije DSM matrici.....                            | 162 |
| Slika I.XI. Analiza potenciranjem, 1. korak.....   | 163 |
| Slika I.XII. Analiza potenciranjem, 2. korak .....   | 163 |
| Slika I.XIII. Analiza potenciranjem, 3. korak .....  | 163 |
| Slika I.XIV. Analiza potenciranjem, 4. korak.....  | 164 |
| Slika I.XV. Identifikacija petlji .....  | 164 |
| Slika I.XVI. Triangularizacija početni DSM .....   | 165 |
| Slika I.XVII. Triangularizacija 1. korak .....   | 165 |
| Slika I.XVIII. Triangularizacija, 3. korak .....   | 166 |
| Slika I.XIX. Triangularizacija, 5. korak.....  | 167 |
| Slika I.XX. Triangularizacija, rezultat .....  | 167 |
| Slika I.XXI. Triangularizacija, mogućnost prikaza veza i elemenata u petlji.....                 | 168 |
| Slika I.XXII. Lijevo je slika početne DSM matrice, desno je tablični ispis .....                 | 169 |
| Slika I.XXIII. Lijevo je slika prve iteracije, desno je slika druge iteracije .....              | 170 |
| Slika I.XXIV. Lijevo je slika treće iteracije, desno je slika četvrte iteracije .....            | 171 |
| Slika I.XXV. Lijevo je slika pete iteracije, desno je slika šeste iteracije.....                 | 171 |
| Slika I.XXVI. Sedma iteracija.....   | 171 |
| Slika I.XXVII. Particionirana matrica.....   | 172 |
| Slika II.I. Klasteriranje .....  | 173 |
| Slika II.II. Analiza cijepanja prema [25].....   | 174 |
| Slika II.III. Analiza ulančavanja prema [25].....  | 176 |

## Popis tablica

---

|   |     |
|---|-----|
| Tablica 5.1. Lijevo su proračuni korišteni u DMM matrici prije optimiranja, desno nakon .....     | 113 |
| Tablica 5.2. Lijevo je dokumentacija korišteni u DMM matrici prije optimiranja, desno nakon ..... | 116 |

# 1.Uvod

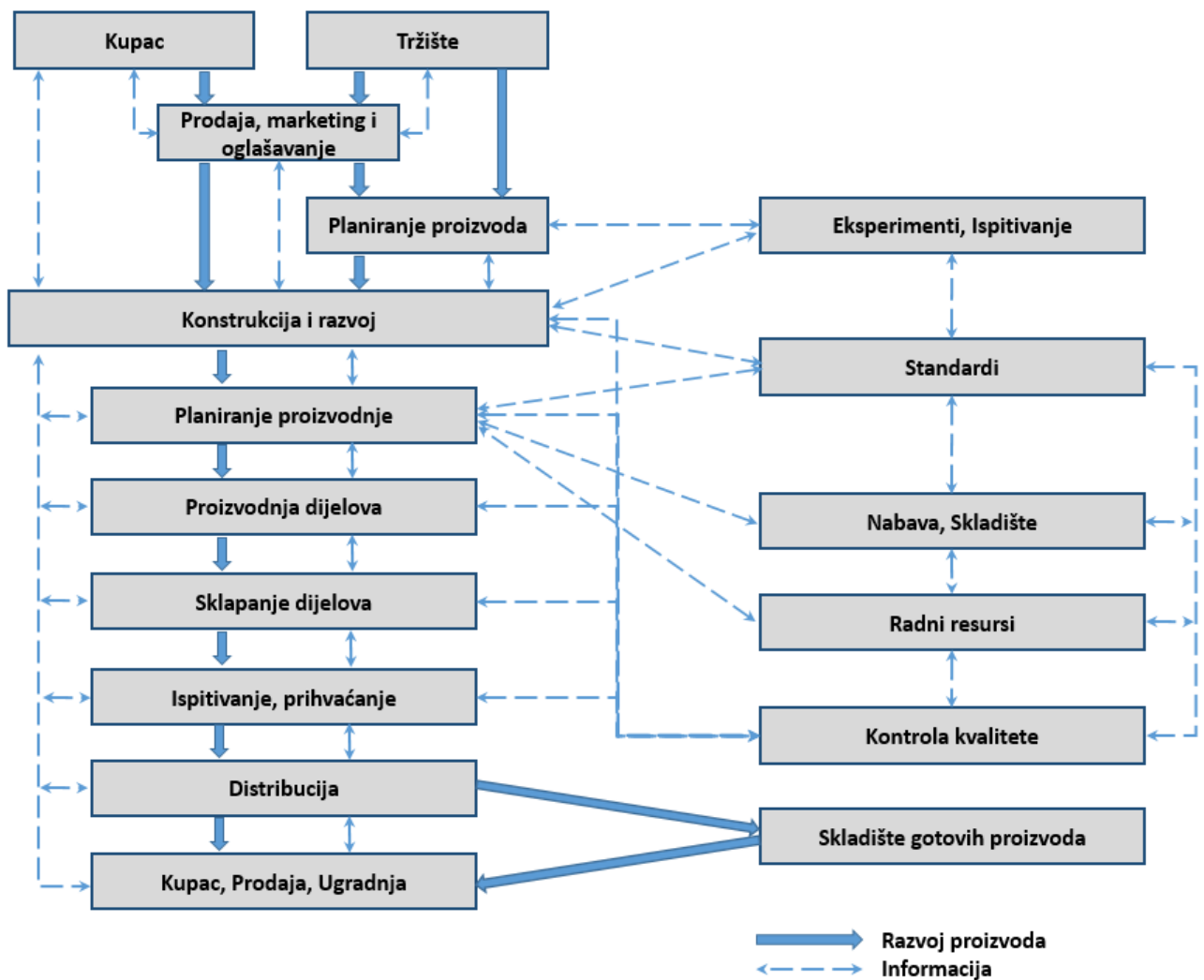
---

## 1.1. Motivacija

Razvoj vertikalnog električnog generatora velike snage dugotrajan je i skup. Tvrtka tijekom razvoja upotrebljava raspoložive resurse, kapacitete i znanje, u cilju stvaranja novog, ili rekonstrukcije postojećeg generatora. Uvjeti na tržištu sve su složeniji, te se zahtijeva veća fleksibilnost proizvoda, uz povećanje kvalitete i pouzdanosti. Prema [1] i [2] - razlike između uspješnijih i manje uspješnih poduzeća na tržištu, nastaju zbog razlike u kvaliteti analiza provedenih tijekom planiranja razvoja proizvoda.

Električni generator je i pored brojnih izvedbi relativno poznat proizvod, sa stabilnom arhitekturom i dugim životnim vijekom. Unatoč stalnom usavršavanju razvojnog procesa generatora, pod pritiskom svakodnevnih obveza, prvenstveno prema naručiteljima, u tvrtki Končar - Generatori i motori d. d. ne postoji sustavna analiza razvojnog procesa i alata kojima se koriste tijekom razvoja generatora. Konstruktori i projektanti određuju svojstva svakog projekta - u smislu proizvodnje, ergonomije, sigurnosti, transporta, rada, održavanja, recikliranja i zbrinjavanja [3]. U budućnosti bi rutinske poslove trebao preuzeti kompjuter i tako djelomično osloboditi konstruktore da se koncentriraju na nove konstrukcije i specifične zahtjeve kupaca [3]. Trenutno je konstrukcija, može se reći: u „centru“ poduzeća, pa je puno odjela vezano na konstrukciju (a i tijekom informacija većinom ide preko konstrukcije, što je vidljivo na slici u nastavku), što već sada stvara puno pritiska na konstruktore, a to će se u budućnosti još povećavati [3]. Iz tog razloga budući konstruktori, osim tradicionalne znanosti i osnova struke (fizika, matematika, kemija, mehanika, termodinamika, mehanika fluida, elektrotehnika, materijali, strojni elementi itd.), moraju razumjeti i specifična znanja (proizvodna tehnologija, upravljanje, itd.). Kako bi se konstruktorima malo olakšalo, potrebno je imati definirane procedure konstruiranja, koje vode do dobrog rješenja. Te procedure moraju biti fleksibilne i mora ih podupirati organizacija [3].

Složeni uvjeti na svjetskom tržištu, prije svega pojačana konkurencija i stalni trend snižavanja cijene uz povećanje zahtjeva, rezultiraju povećanom složenosti proizvoda i kraćim rokovima isporuke, te se povećava potreba za sve veće oslanjanje na inženjersko znanje [3]. Neke inovativne tvrtke uspjele su ostvarivati 75 % prihoda na temelju prodaje i usluga, koje pet godina prije nisu imale u proizvodnom programu [4]. Stoga, cilj je poticati inovativnost u poduzeću na razne načine [5]. Za razvoj proizvoda tvrtka treba inovativne ljude i timove koji stvaraju nove ideje [6].



**Slika 1.1.** Tijek informacija u poduzeću, prema [3]

Novo metode proračuna konstrukcije, kao i alati koji omogućuju simulacije fizikalnih stanja u proizvodu, iako doprinose boljem uvidu u ponašanje i svojstva proizvoda, istovremeno čine razvojni proces složenijim i zahtjevnijim. Sustavnim pristupom analizi procesa razvoja generatora, može se prepoznati prostor za poboljšanje razvojnog procesa i same konstrukcije i tako doprinijeti ciljevima razvoja jeftinijih proizvoda, uz zadržavanje kvalitativnih značajki proizvoda - kao što su, uz temeljne funkcionalne značajke - zadani vijek trajanja, vrijeme isporuke, itd. Modeli su primjenjivi za objašnjenje i predviđanje ponašanja sličnih projekata [3,7]. Pahl i Beitz napravili su jedan od najdetaljnijih i najraširenijih radova na modelu – „Sistemska pristup“ (eng. *Systematic Approach*). Taj model baziran je na iskustvu autora i profesionalnim konstruktorima, a prezentiran je procedurom u četiri faze, cilj ovog pristupa je držati iteracije minimalnima, s ciljem da se dobije učinkovit i efikasan dizajn [3]. Jednom kada se napravi inicijalni model, on je baza za daljnje dorade i usavršavanje [8].



Modeli koji su fokusirani na prezentiranje aktivnosti procesa na razini aktivnosti, ustvari su mrežni modeli. Mrežni modeli poput DSM-a (eng. *Design Structure Matrix*), rješavaju nedostatke generičkih modela [8]. Trenutni modeli procesa koji se upotrebljavaju u industriji, uključuju vrlo malo informacija o ovisnostima na nižim razinama [8]. Neki od generičkih modela su CPM (eng. *Critical Path Method*), te njegove izvedenice [9], Petri mreže (eng. *Petri nets*) [10], dijagrami toka [11], integrirani DEFinition jezik 0 (IDEF0) [12,13].

Konvencionalne metode CPM i PERT imaju nedostatak mogućnosti prikaza iteracija u projektima, jer dozvoljavaju samo jednosmjerno završavanje sekvenci. Browning je 1998. objasnio da je prvi korak za smanjivanje ukupnog vremena ciklusa minimiziranje nenamjerne iteracije [14]. Uspjeh formalnih modela koji su korišteni za proces modeliranja u AEC (eng. *Architecture, Engineering, Construction*) industriji varira, ali uočen je nedostatak u tome što dizajn sadrži iteracije, a mnogi modeli ne mogu prikazati iterativne procese, a oni koji i mogu, ne mogu njima upravljati [8]. Neočekivane iteracije mogu nastati i zbog nove informacije koja dolazi kasno u procesu, očekivane iteracije otkrivaju aktivnosti koje je potrebno ponoviti [8]. Cjeloviti pristup razvoju modela proizvoda i razvojnog procesa s najniže razine (tj. parametara) i mehaničkih proračuna, omogućio bi uvid u relacije koje sada nisu vidljive u cijelosti, tj. bolje razumijevanje sustava, i osigurao značajne uvide u strukturu [8]. Razumijevanje interakcija unutar sustava pomoću DSM-a preduvjet je dobivanja optimalnih sekvenci u procesu [8]. Glavna prednost DSM-a je traženje i označavanje iteracija (tj. petlji) koje su problematične u procesima [15]. Kako bi se smanjilo ukupno vrijeme, potrebno je imati brže iteracije i manji broj istih. Brže iteracije mogu biti postignute poboljšanom koordinacijom, recimo pomoću CAD sustava, koji ubrzavaju rad osoba. Često se misli da se, recimo, u istovremenom inženjerstvu nalazi rješenje smanjenja vremena izrade, bez uzimanja u obzir njihovih ovisnosti, što može dovesti do znatnog povećanja vremena izrade [8]. Manje iteracija rezultira poboljšanjem strukture procesa [8]. Preporuča se korištenje parametara DSM-a, kao model najniže razine [8]. Parametar, prema [16], odlučuje ili ograničuje način na koji nešto može biti napravljeno. Raniji su geometrijski modeli bili argumentirani parametarskim modelima [17,18]. Rouibah i Caskey [19] spojili su parametre i istovremeno inženjerstvo (eng. *parameter-based concurrent engineering*), gdje su parametri baza procesa. Garza i Alcantara su 1997. [20] upotrebljavali parametre za opisivanje dizajna u građevinarstvu. Par godina kasnije su [21] predložili parametarski model konstrukcijskog procesa, te su demonstrirali primjenu na lopatici helikoptera.

U nastavku rada upotrebljava se izraz proračuni, koji može obuhvaćati više vrsta proračuna, mogu to biti elektromagnetni proračun, ventilacijski proračun, toplinski proračun, proračun ležaja ili mehanički proračuni u koje pripadaju proračuni čvrstoće, vibracija i zamora materijala.

Motiv istraživanja prikazanih u ovoj disertaciji je poboljšanje procesa razvoja električnog generatora, s naglaskom na fazu razvoja, koja uključuje procese od ugovaranja do konstrukcijske razrade, a što uključuje projektiranje, konstruiranje i oblikovanje generatora. Proces razvoja električnog generatora intelektualno je vlasništvo proizvođača generatora, stoga, ne računajući osnove iz udžbenika, nije opisan u literaturi. Istraživanjem ćemo povezati: prikaz konstrukcije generatora, tj. strukturu i komponente generatora, pozicije, potsklopove i sklopove - ključne konstrukcijske parametre koji definiraju pojedine elemente strukture generatora, dokumentaciju, te proračune koji definiraju parametre konstrukcije. Treba naglasiti moguću višestruku korist ovog rada, najprije korist može imati tvrtka, zbog toga što je model razvijen baš za njezin slučaj, no osim firme, velika korist je za struku i znanstvenu zajednicu, zbog razvoja modela parametra, koji je najniža i predložena razina za uspješno upravljanje procesima [8].

Krajnji rezultat istraživanja treba najprije pomoći već preopterećenoj konstrukciji, a osim toga omogućiti tvrtki Končar kraći, efikasniji razvojni proces vertikalnog hidrogeneratora. Predloženi model razvoja generatora velike snage, omogućit će bolje razumijevanje sustava [22] i dati uvid u složene relacije hidrogeneratora, što je posebno značajno za menadžere i inženjere, a pogotovo za mlade inženjere, koji se prvi put susreću s razvojem tako složenog proizvoda.

## 1.2. Dosadašnje spoznaje

Proizvodi, procesi i organizacije su neki oblik kompleksnih sustava [22]. Električni generator je složen, ako ne i kompleksan tehnički sustav, za čiji je razvoj potreban koordinirani napor većeg broja stručnjaka različitih disciplina. Bez obzira na to radi li se o razvoju, rekonstrukciji ili održavanju generatora, modeli koji omogućuju bolje razumijevanje odnosa i interakcija unutar složenih sustava, [22,23,24] neophodni su za rješavanje tehničkih zadataka. Da bi se dosegli izazovi brzih tehnoloških promjena i povećavanja opsega i kompleksnosti konstrukcijskih zadataka, potiče se razvoj novih pristupa i teorija za analizu sustava [24,25,26].

Samo će koordinirane aktivnosti svih sudionika dovesti do zadovoljavajućeg rezultata. Kako bi se to postiglo, organizacija za svaku osobu mora specificirati odgovornosti i zadatke [3].

Prema [3], proces konstruiranja i razvoja učinkovitiji je ako se:

- smanje unutarnje iteracije istih aktivnosti unutar istog radnog koraka
- smanje vanjske iteracije, poput vraćanja na radni korak koji je završen
- izostave „nepotrebni“ radni koraci
- radni koraci izvode paralelno.

Zadnja radnja može značajno skratiti i vrijeme izrade projekta. Da bi se to postiglo, prema [3] mora biti ispunjeno sljedeće:

- Proizvod mora biti strukturiran na način da svojstva sustava, podsustava i elemenata mogu biti precizno modelirana.
- Veze između koraka moraju biti definirane jednoznačno i precizno.
- Koraci u procesu moraju biti nezavisni.

Razvoj složenih sustava obuhvaća obradu brojnih vrsta podataka i informacija koje se generiraju i upotrebljava ih se u različitim kontekstima i fazama životnog vijeka proizvoda. Razvoj i konstrukcija proizvoda temeljni je proces koji tvrtkama omogućuje pozicioniranje novih proizvoda na tržištu. Tehnološki napredak i tržišno natjecanje primoravaju tvrtke da razvijaju proizvode koji značajkama prate ili nadmašuju konkurenciju. To je posebno zahtjevno kod kompleksnih proizvoda s dugim životnim vijekom i relativno stabilnom funkcionalnom strukturom [27,28,29]. U prošlosti su se problemi generalno rješavali reducirajućim pristupom, koji podrazumijeva velike sustave koji se rastavljaju na manje probleme [30]. DSM je nova paradigma koja radi na strukturi informacijskog toka promatranog problema [31,32]. DSM je nereducirajući pristup koji se bazira

na tijeku informacija, a uključuje pretpostavke i iteracije [30]. Tehničari najbolje razumiju tijekom informacija u problemu [30].

Tradicionalni procesi razvoja proizvoda dominirali su industrijom u posljednja tri desetljeća prošlog stoljeća. Modeli procesa razvoja proizvoda (PRP) prikazani u novijoj literaturi vrlo su različiti. Iako dijele zajedničke značajke, razvoj i primjena lepeze modela PRP, motivirani su zahtjevima tradicionalnog *stage-gate* procesa razvoja, posebno obzirom na brzinu i troškove razvoja [24].

Razvoj novih modela PRP omogućio je tvrtkama izbor i prilagodbu odabranog PRP modela vlastitim potrebama, kao i snižavanje troškova [26,33]. Erat i Kavadaias usporedili su tradicionalne PRP-e [23] i zaključili da ne odgovaraju razvoju modernih proizvoda temeljenih na složenim arhitekturama. Ho i Lin su predložili novi model PRP-a utemeljen na principima istodobnog inženjersva, raspodjelom funkcija proizvoda [34]. Ibusuki i Kaminski sugeriraju prioritizaciju razvojnih procesa temeljem vrijednosnog inženjeringa. Najveće promjene u odnosu na klasične PRP-e, posljedica su raznih varijanti spiralnog PRP-a, koje su preuzete iz softverske industrije [33]. U takvim je okolnostima izbor modela PRP-a i prilagodba vlastitom okruženju, zadanom tehnološkom i organizacijskom razinom i proizvodnim programom - nesumnjivo složen zadatak.

Impirijska istraživanja pokazala su da veze i interakcije između arhitekture sustava, njihovog razvojnog projekta i uključenog organizacijskog tima, trebaju biti usklađene, kako bi kompanija postala uspješna [35]. Sharon, de Weck i Dori [36] su 2011. godine napravili usporedbu sedam metoda za bespilotnu letjelicu, te navode da su za Menadžment Sustava (SEM – *System Engineering Management*), od poznatih metoda PERT (*Program Evaluation and Reviewing Technique*), CPM (*Critical Path Method*) i Gantt - korisnije metode Dinamika sustava (*System Dynamics*), DSM (*Design Structure Matrix*), *Earned Value Method* i *Object Process Methodology* (OPM). Autori preferiraju holističku OPM metodu za upravljanje projektom i proizvodom [36]. OPM metoda poznata je po jednostavnosti i pristupačnosti, međutim, ona ne uspijeva u potpunosti detektirati neke interakcije na razini sustava i može imati pomanjkanje kompletnosti.

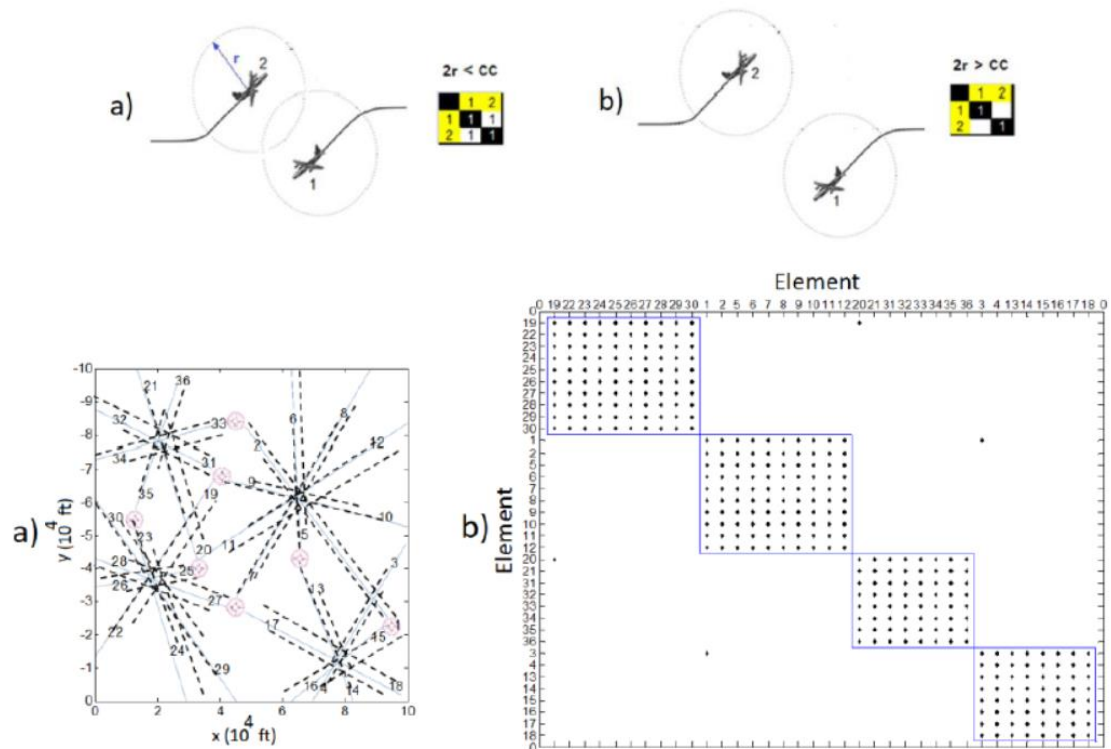
DSM (*Design structure matrix*) s druge strane, bolje upravlja ciklusima i iteracijama, a neke od prednosti DSM-a u odnosu na grafove su: kompaktnost, čitljivost kod povećanja veličine, jednostavno označavanje važnih karakteristika (poput iteracija) [15]. Izvori DSM-a vezani su za rane radove profesora Dona Stewarda iz 1970. godine, koji se koristio kvadratnim matricama za prikaz relacija u proizvodnji [25,28,37]. Iako je Steward rano pokazao mogućnosti DSM metode primjenjujući kvadratnu matricu za prikaz mreže konstrukcijskih varijabli, praktična, industrijska

primjena počela je znatno kasnije, u NASI, Boeingu, General Motorsu i Intelu ranih 1990-ih. Danas je DSM rasprostranjen u velikom rasponu industrijskih grana, te je, prema [15], do sada identificirano oko 1.300 radova, dok su [27,28,29,38] samo neki od njih. DSM je alat za mrežno modeliranje strukture i ponašanja složenih sustava i interakcija, stvara sliku o sustavu i povećava konstruktorovo razumijevanje uzročno-posljedičnog odnosa koji se pojavljuje u sustavima, te pomaže u organizaciji tog znanja [28,29].

U literaturi postoje brojni primjeri kojima je DSM verificiran u realnim primjerima. U nastavku ćemo navesti neke odabrane primjere:

- Konstantinidis je s koautorima upotrebljavao DSM za modeliranje vjetroelektrane i modeliranje rizika otkazivanja sustava [39].
- Talić je u radu [40] opisala modeliranje parametara zračnog tunela pomoću DSM-a.
- Tilstra i Seepersad predložili su proširenje DSM-a i nazvali metodu visoko-definirani DSM (eng. *high-definition design structure matrix*) [41], te pokazali primjenu pri modeliranju električnog odvijajača.
- Farooq i koautori su u radu [42] pokazali DSM u obliku „Nesukladne Matrice“, nazvane NCM (eng. *Non Conformity Matrix*), koja opisuje sve nesukladnosti za proizvod duž proizvodne linije. Cilj njihovog rada bio je smanjiti kompleksnost problema i pokazati kritične proizvodne točke te poboljšati konačnu kvalitetu proizvoda. Autori nisu dali zadnju matricu, no napominju da je napravljena pomoću *brainstorminga*, uz pomoć tima sastavljenog od inženjera sustava i razvoja [42].
- Isti autori su u radu [43], problem analizirali drugim programom (*Cambridge Advanced Modeler* [44]), te su dobili povoljnije rješenje, sa znatno manje iteracija.
- Oloufa i ostali upotrebljavali su DSM u kombinaciji s CPM-om. DSM uključuje aktivnosti koje vode do odabira opreme, potrebne za novi pogon u tvornici [45]. DSM je služio za minimiziranje iteracija, dok elementi na dijagonali, po autorima, predstavljaju kritični put.
- U [46] je upotrijebljen DSM za procjenu vremena završetka proizvoda. Nedostatak modela je nemogućnost učenja (*learning effect*), tj. skraćivanje vremena izvođenja istog zadatka pri ponovnom izvođenju, a osim toga, nema mogućnost upravljanja razvojnim procesom. Ovaj model je također ograničen na mali broj zadataka, odnosno povećanje broja zadataka limitirano je mogućnostima računala [46].

- Primjena DSM-a u upravljanju zračnim prometom [47]. Autori su se za elemente koristili avionima, dok veze u DSM matrici predstavljaju mogućnost sudara dva aviona. Jedan kontrolor leta mora pratiti sve avione koji se mogu sudariti, iz matrice se vidi da postoje avioni koji su van klastera, te ako je nemoguće da i njima upravlja jedan kontrolor, te je avione potrebno preusmjeriti [47].



**Slika 1.2.** DSM u upravljanju zračnim prometom prema [47].

- Primjena DSM-a u tvrtki Intel, na razvoju mikroprocesora [25]. Cilj rada bio je bolje razumijevanje kompleksnog procesa, smanjenje vremena razvoja proizvoda i smanjenje nepredvidljivosti u vremenu razvoja proizvoda [25].
- Primjena DSM-a u tvrtki Boeing, radi povećanja razumijevanja iteracija i s ciljem simuliranja utjecaja arhitekture procesa na cijenu, vrijeme trajanja i rizike projekta [25].

Iz navedenih primjera može se uočiti da je polazna točka prikazanih projekata DSM [48] model, koji se daljnjim razvojem i analizom upotrebljavao za različite ciljeve, koji, pored ranije istaknutih primjera, obuhvaćaju prilagodbu proizvoda potrebama tržišta, modeliranje familije proizvoda i određivanje temeljnih modula familije, procjenu rizika itd. Pretpostavke su rizici [30], DSM se može upotrebljavati na način da stalno prati koje su pretpostavke ostvarene, a koje nisu, te

provjeravati koliko je pretpostavki ostalo otvoreno kao mjera preostalog rizika [30]. DSM model je kvadratna matrica, u kojoj su točno označene veze ili interakcije između elemenata unutar jedne domene (ukoliko se radi o proizvodu, utoliko su dijelovi proizvoda elementi u matrici). DSM se može upotrebljavati za modeliranje arhitekture proizvoda, modeliranje organizacije timova, aktivnosti tijekom razvojnih ili proizvodnih procesa. Steward D., u novom radu [30] najavljuje novu paradigmu, koju naziva „*Explainer*“, za koju navodi da je kompliciranija za shvaćanje od DSM-a, ali da je znatno važnija. *Explainer* će se koristiti Booleanovim funkcijama i logičkim operacijama AND, OR i NOT [30].

Proširenje DSM-a na više domena je DMM (*Domain Mapping Matrix*), koja povezuje više domena i ne mora biti kvadratna [49]. Sve su DMM matrice svrstane u pet područja: za projekt, proizvod, proces, organizaciju, alate i ciljeve [46]. Više istraživača koristilo se DMM modelom za istraživanje odnosa funkcije i komponente [50,51,52,53,54,55]. DMM matrica funkcija-komponente se jednostavno pretvori u matricu funkcije ili matricu komponenata, množenjem DMM matrice s transponiranom DMM matricom [53]. Neki autori su povezali ciljeve s konstrukcijskim parametrima, zatim su iz DMM matrice odredili matricu parametara [56,57], drugi su pak povezali komponente i ciljeve [58,59,60], ili aktivnosti procesa i ciljeve [61]. Očekuje se daljnje istraživanje i standardiziranje, kako bi se takvim modelima omogućilo bolje odgovarati na istraživačka pitanja [15]. Također, mnogo je radova i s drugim domenama, pa je zaključak [15] da je ostalo dosta mjesta za daljnje proučavanje proizvoda, procesa, organizacije i njihovih međusobnih spregova [15]. Osim DSM-a i DMM-a, za kompleksnije probleme s više domena upotrebljava se MDM matrica (*Multi-Domain Matrix*). MDM model sastoji se od dva ili više DSM modela i DMM modela, koji su istovremeno povezani [25]. MDM model povezuje više domena preko više matrica, a MDM modeli mogu se upotrebljavati za provjeru DSM i DMM modela koji predviđaju ponašanje sustava, za praćenje promjena i za analizu konstrukcije [62]. Analiza MDM modela može rezultirati boljim odlukama o konstrukciji, boljim proizvodom i boljim organizacijskim poretom [15]. Korištenjem MDM modela, menadžeri su u mogućnosti predvidjeti potencijalne interakcije između ljudi i konstrukcije, te mogu predvidjeti konflikte između promjene procesa i radnika [62]. Osim toga, MDM model inženjerima i menadžerima omogućuje analizirati velike količine povezanih podataka, omogućuje donošenje zaključaka, pomaže u donošenju odluka [63]. Maurer je preuzeo ovaj pristup modelirajući sustave s više domena u automobilske industriji [27,64].

U literaturi postoje brojni primjeri u kojima je MDM upotrebljavan u realnim primjerima, neki od njih su u nastavku.

- Kherbachi i ostali primjenjuju MDM-model na primjeru globalnog razvoja proizvoda (*GDP Global Product Development*). MDM omogućuje sustavnu identifikaciju veza, otkriva proces komunikacije. MDM autorima služi za poboljšanje komunikacijskih tokova, za smanjenje pretpostavki i neodređenosti u razvoju proizvoda [65].
- Manojkummar i ostali MDM-model primjenjuju za opisivanje PLC-a (*Product Life Cycle*). Cilj MDM-modela je poboljšanje preglednosti u određivanju karakteristika modela, te istraživanje mreže DFX (*Design for X*, X su razni atributi - poput cijene, mjesta korištenja, materijala) prema [66].
- Wilschut i ostali upotrebljavaju MDM za opisivanje funkcija, komponenata i parametara, iz tekstualno specificiranih funkcija [67]. Autori prezentiraju način automatske izrade MDM matrice, pomoću tri koraka.
- Eppinger i Browning u tvrtki *Digital Research Labs* upotrebljavaju MDM koji predstavlja mikrokontroler i proces konstruiranja [25]. MDM matrica upotrijebljena je za promatranje utjecaja promjena. Zaključeno je da bi se model mogao dalje razvijati u smjeru uključivanja drugih faktora, a jedan od bitnijih faktora koje bi trebalo uključiti je dostupnost resursa za izvođenje promjena [25].

U usporedbi s drugim metodama za modeliranje kompleksnosti složenih sustava, DSM je u velikoj prednosti zbog grafičkog prikaza i fleksibilnosti primjene [40,49].

DSM i DMM (*Domain Mapping Matrix*) su odlični alati za modeliranje strukture, procesa i interakcija domena, ali nedostatak im je nemogućnost modeliranja sustava tijekom vremena [62]. Nedostatak MDM-a je nemogućnost prikaza životnog ciklusa proizvoda preko domena. Kako bi riješio ograničenja DSM-a i MDM-a, Bartolomei i ostali su postavili temelje za ES-MDM (*Engineering Systems Multiple-Domain Matrix*) [68].

Moderni alati za modeliranje složenih sustava u današnje vrijeme postaju napredniji i pri konstruiranju obuhvaćaju sve veći broj parametara. Primjena takvih alata u razvoju proizvoda motivirana je smanjenjem troškova razvoja, kraćim vremenom izrade, pravovremeno prepoznatim rizicima razvoja, povećanim razumijevanjem i fleksibilnošću sustava, a time i povećanom konkurentnosti proizvoda. Analiza sustava, sama po sebi daje niz korisnih informacija o sustavu i doprinosi razumijevanju sustava, boljem menadžmentu sustava i poboljšanju istog.



Trenutno se u Končaru ne upotrebljavaju matrične metode za analizu konstrukcija i ne postoje zapisi u matricama koji bi novim generacijama olakšali prijenos znanja, a koji bi ujedno mogli pomoći pri izradi novih i revitaliziranih generatora.

U skladu s iznesenom motivacijom istraživanja, mogućnostima i potrebama tvrtke Končar, dostupnih relevantnih znanstvenih rezultata, te provedenih preliminarnih istraživanja [69,70], istraživanje provedeno u ovom radu temelji se na primjeni DSM metode.

### 1.3. Hipoteza rada

Cilj i svrha istraživanja je stjecanje uvida u relacije i interakcije tijekom razvoja proizvoda, te u konačnici, poboljšanje procesa razvoja električnog generatora. Sustavnim pristupom analizi razvojnog procesa, proračuna i dokumentacije generatora, razvit će se model koji će omogućiti uvid u relacije i interakcije koje do sada nisu prepoznate. Pretpostavka je istraživanja da će se razvojem predloženog modela moći uočiti prostor za poboljšanje razvojnog procesa i konstrukcije i time doprinijeti naporima koji streme razvoju jeftinijih proizvoda, uz zadržavanje kvalitativnih značajki proizvoda kao što su, uz temeljne funkcionalne značajke, zadani vijek trajanja, vrijeme isporuke itd.

Logično je očekivati da se unutar sustava, boljim razumijevanjem relacija i interakcija, mogu otvoriti nove mogućnosti za poboljšanje razvojnog procesa generatora i reduciranje pogrešaka koje se događaju tijekom konstruiranja.

Analiza utjecaja ograničenja i uvjeta koji proizlaze iz zahtjeva naručitelja ili konstrukcijskih parametara, te predviđanje ponašanja sustava, netrivialni su problemi, složenost koja raste s kompleksnošću sustava. Temeljem dosadašnjih razmatranja proizlazi formulacija hipoteze istraživanja:

**Moguće je razviti model koji obuhvaća konstrukcijski proces, parametre konstrukcije i proračune koji će doprinijeti razvoju novih i revitaliziranih električnih generatora velike snage.**

Konstrukcijski proces u navedenoj hipotezi obuhvaća konstrukcijsku dokumentaciju, koja se radi tijekom razvoja generatora, dok su u proračune uključeni svi proračuni, od elektromagnetnog proračuna, proračuna ležaja, pa do mehaničkih proračuna. Istraživanjem i razradom hipoteze, očekuju se odgovori na pitanja koja se postavljaju prilikom razvoja modela kompleksnog sustava.

1. Može li se razvojem predloženog modela steći bolji uvid u relacije unutar sustava?
2. Mogu li se analizom modela razviti preporuke za rekonstrukciju generatora, obzirom na međusobne utjecaje konstrukcijskih parametara unutar sustava?

## 1.4. Plan istraživanja i metodologija rada

Istraživanje razvoja tehničkih sustava obuhvaća formulaciju modela i teoriju o fenomenima unutar tog okruženja, stvaranje i validaciju znanja, metoda i alata koji se temelje na tim modelima i teorijama, s ciljem unaprjeđenja procesa i ishoda razvoja tehničkih sustava. Postojeći trend istraživanja potvrđenih u praktičnom okruženju, u istraživačkoj praksi rezultirao je potrebom za kombiniranim pristupom, koji obuhvaća brojne kvalitativne i kvantitativne metode istraživanja. Pragmatizam, kao suvremena istraživačka paradigma, omogućuje povezivanje takvih različitih pristupa, što je s obzirom na prirodu predloženog istraživanja neophodno.

Tijek istraživanja će se provesti prema [71], kroz pet koraka. Prvi korak je preliminarna studija, koja je napravljena u sklopu motivacije i dosadašnjih spoznaja. Drugi korak je formiranje hipoteze koja je dana u prethodnom poglavlju, a određena je na temelju modela. Treći korak sastoji se od testiranja hipoteze, što je provedeno kroz raspravu. Četvrti korak obuhvaća procjenu hipoteze, a zadnji korak, prihvaćanje ili odbijanje hipoteze, što je također provedeno kroz raspravu. Istraživanje je u skladu s postavljenom hipotezom rada i slijedom odgovora na - s gledišta proizvođača generatora - pragmatična pitanja koja, međutim, postavljaju i verifikacijski okvir istraživanja:

1. Je li moguće i kako smanjiti broj iteracija tijekom konstruiranja i projektiranja generatora?
2. Koje su mogućnosti daljnjeg poboljšavanja razvoja generatora?
3. Mogu li se na temelju razvijenog modela konstrukcije generatora uočiti potencijalna poboljšanja konstrukcije?

Početak istraživanja određen je pregledom postojeće stručne i znanstvene literature unutar područja istraživanja. Na temelju pregleda područja, uspostaviti će se inicijalni opis postojeće situacije, kao i opis željenih rezultata, s ciljem definiranja osnovnih smjernica za provedbu istraživanja. Za potrebe detaljnog opisivanja postojeće situacije i smjernica daljnjeg istraživanja, provest će se i empirijsko istraživanje u vidu opservacija i analize postojećih procesa razvoja generatora. Istraživanje će se, sukladno potrebama u proizvodnji, fokusirati na razvoj novih proizvoda. S obzirom na brojne mogućnosti i varijante proizvoda, odredit će se opseg istraživanja u okviru realnih očekivanja i mogućnosti. Treba istaći i pragmatični pristup istraživanju, kojemu

je cilj minimiziranje vremena razvoja proizvoda - od potpisivanja ugovora do puštanja u pogon, stoga će se u radu ukazati na mogućnosti razvoja i unaprjeđenja, proizvoda i procesa razvoja.

Prikupljanje podataka obuhvaća detaljnu analizu strukture i razvojnog procesa generatora. Analiza će obuhvatiti specifičnosti pojedinih konstrukcijskih rješenja i izvedbi generatora, kao i specifičnosti njihovih razvojnih procedura. Ovaj korak provest će se anketiranjem sudionika razvojnog procesa. S posebnom pažnjom prikupljat će se podaci unutar konstrukcijskog ureda tvrtke, pregledom dostupne konstrukcijske i proračunske dokumentacije, propisanih razvojnih procedura te znanja i iskustava projektanata i konstruktora tvrtke.

Analiza prikupljenih podataka obuhvatit će:

1. Dekompoziciju – proizvoda i aktivnosti tijekom konstrukcijskog procesa.
2. Identifikaciju – prepoznavanje i registraciju svih poznatih odnosa među komponentama i dokumentima.
3. Modeliranje – temeljem prepoznatih odnosa i razumijevanja postojećeg znanja o problemu, razvit će se model koji će omogućiti bolje razumijevanje sustava. Particioniranje i ulančavanje DSM matrica omogućit će identifikaciju novih relacija u sustavu.

Tijekom sinteze, istraživanje će se koncentrirati na ukazivanje i interpretaciju relevantnih relacija unutar sustava. Tijekom verifikacije, razvijeni matrični model inkrementalno će se doradivati, sukladno uvidima i razumijevanju cjelokupnog sustava.

U raspravi će se prikazati postignuti rezultati istraživanja. Raspravit će se postignuti rezultati istraživanja u teorijskom i praktičnom smislu, obzirom na postavljena istraživačka pitanja, te će se vrednovati ciljani teorijski i praktični znanstveni doprinos. Komparacijom postignutih rezultata s postavljenim ciljevima istraživanja, pokazat će se prednosti i nedostaci predloženog modela. Rasprava podrazumijeva prijedloge potrebnih unaprjeđenja, kao i smjernice za implementaciju u realne procese razvoja generatora. Temeljem zaključaka i saznanja iz završne faze istraživanja, mogu se istaći smjernice budućih istraživanja.

Iako je opisana metodologija izložena sekvencijalno, postoje brojne povratne veze između pojedinih koraka istraživanja. Tako će se omogućiti primjena različitih metoda i pristupa prilikom izvršavanja pojedinih faza, temeljem novostečenog znanja i iskustva, ali i naknadna preformulacija ciljeva i ishoda pojedinih koraka istraživanja.

Tvrtka Končar Generatori i motori d. d. se trenutno u procesu razvoja generatora ne koristi nijednom od predloženih metoda za analizu složenih sustava, stoga postoji prostor za testnu

implementaciju istog alata, tj. metode, u proizvodni proces. Implementacija i analiza iz ovog znanstvenog istraživanja će obuhvaćati teorijski i praktični dio, s naglaskom na primjenjivost rezultata. Rasprava i zaključak će biti kritički, s osvrtom na sve relevantne podatke i informacije. Teorijske implikacije na PRP će se prezentirati zajedno s prezentacijom svih rezultata dobivenih iz provedenih analiza i istraživanja. Doprinosi znanju, kao i doprinosi gospodarstvu, bit će posebno istaknuti i dat će se uvid u mogućnosti daljnjih radova i istraživanja.

## **1.5. Očekivani znanstveni doprinos**

Znanstveni doprinos ovog istraživanja je razvoj modela razvoja električnog generatora i dat će uvid u proces konstruiranja električnih generatora, a u konačnici bi trebao omogućiti smanjenje vremena razvoja generatora - od ugovaranja, pa do izrade kompletne konstrukcijske dokumentacije. Istraživanjem će se obuhvatiti ključne faze razvoja generatora: projektiranje i konstruiranje. Razlučit ćemo dva aspekta doprinosa, teorijski i pragmatični:

1. Teorijski doprinos, kao prijedlog modela koji obuhvaća konstrukcijski proces, parametre konstrukcije i proračune.
2. Implementacija predloženog modela će konstruktorima, projektantima i voditeljima razvoja omogućiti učinkovitije upravljanje razvojem novih i revitaliziranih generatora, što je praktični doprinos istraživanja.

## 1.6. Struktura rada

Ova je disertacija podijeljena na više cjelina.

U prvom poglavlju počinje se motivacijom, kojom je sve započelo, nakon toga su pokazane dosadašnje spoznaje na području PRP-a (procesu razvoja proizvoda) te na području primjene DSM-a. Dana je hipoteza rada i istraživačka pitanja na koja će se kasnije odgovoriti. Izložena je metodologija rada i opisan je znanstveni doprinos ovog rada.

Drugo poglavlje daje uvid i opis tri važna dijela u PRP-u velikog generatora.

Treće poglavlje predstavlja teorijske osnove užeg područja istraživanja, daje pregled osnova matričnih metoda, podjele matričnih metoda i načina rješavanja. Najviše pažnje predano je DSM-u, obzirom na to da se DSM kasnije s predloženim novim načinom rješavanja primjenjuje na sustav velikih vertikalnih hidrogeneratora.

Četvrto se poglavlje bavi opisom predloženog novog načina rješavanja particioniranja DSM matrica, korištenjem kriterija vremena izvođenja. Nakon izrade i opisa predložene procedure, napravljena je usporedba nove procedure s postojećim programom napravljenim na MIT-u. Na kraju četvrtog poglavlja je također dan i program koji se može upotrebljavati na slučajevima velikih generatora, a isto tako – i u drugim sličnim situacijama. Ovaj će program dati smjernice kako smanjiti količinu ponavljanja (iteracija), s ciljem smanjenja vremena rada na određenom projektu.

U petom poglavlju pokazane su razvijene matrice konstrukcije generatora, matrica proračuna i matrica parametara generatora.

Šesto poglavlje bavi se raspravom koja bi trebala dati odgovore na pitanja, koji su rezultati istraživanja proizašli iz rada, koliko su oni primjenjivi i postoji li plan daljnjih mogućnosti.

U sedmom poglavlju dan je zaključak rada i bit će dan kritički osvrt na dobivene rezultate i na sam predloženi novi način rješavanja particioniranja.

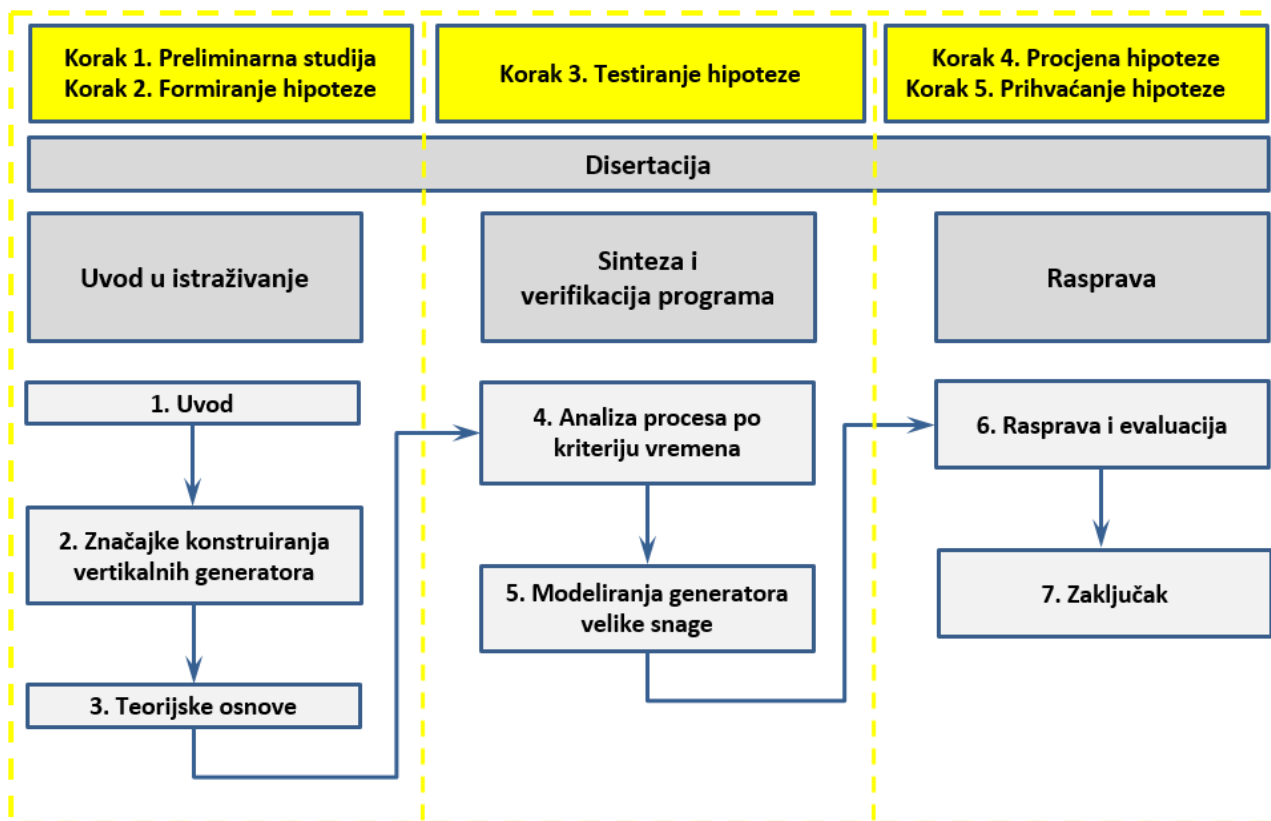
U osmom poglavlju dan je pregled korištene literature.

Deveto i deseto poglavlje je životopis autora.

U jedanaestom su poglavlju navedeni svi radovi autora.

Dvanaesto poglavlje je dodatak, a u istom je prikazan kod originalnog programa na temelju algoritma u MATLAB-u, razvijenog u radu prikazanog istraživanja, te odabrana poglavlja DSM teorije, koja su se također upotrebljavala u nekom dijelu rada.

Schema strukture glavnog dijela disertacije i metodologije istraživanja prikazana je na slici 1.3.



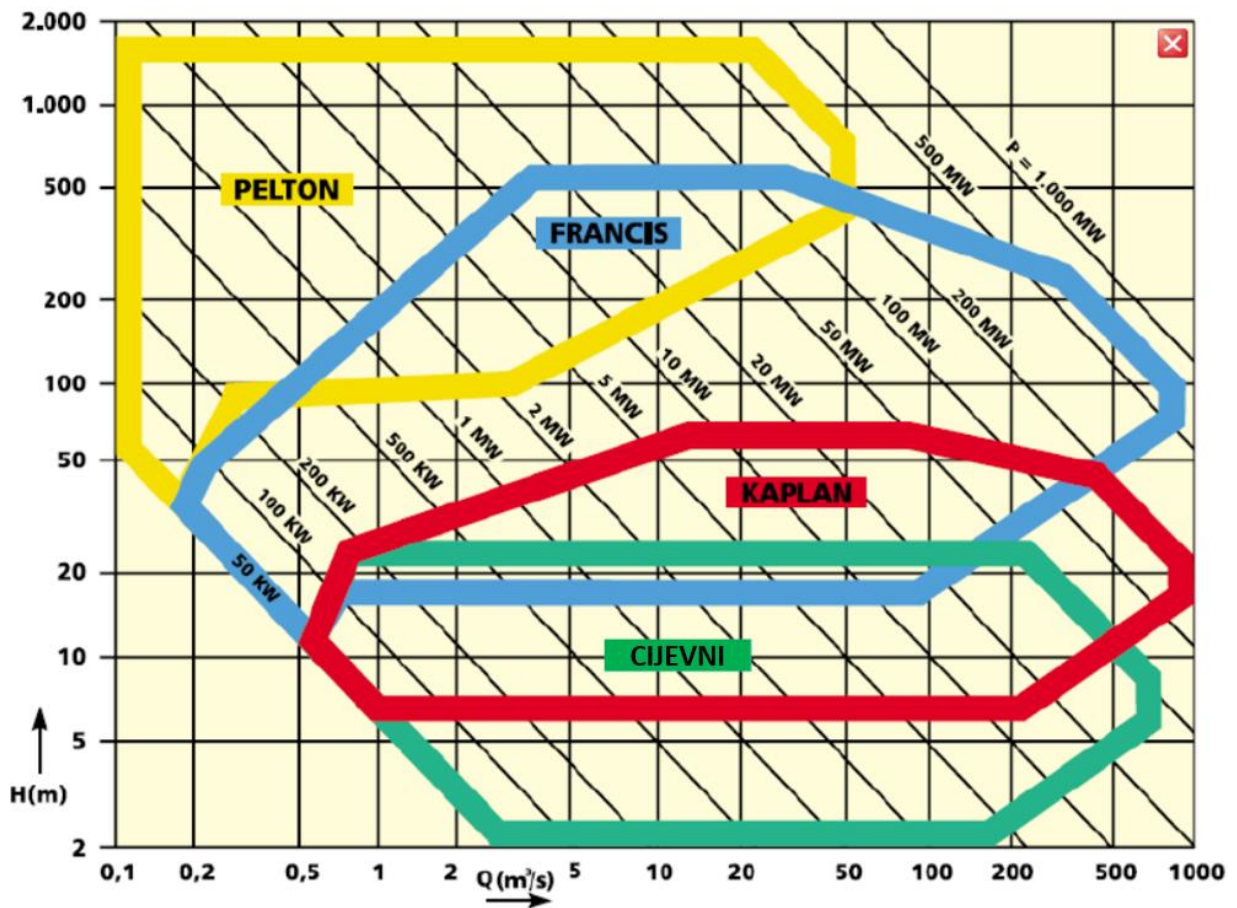
Slika 1.3. Struktura disertacije

## 2. Značajke konstruiranja vertikalnih hidrogeneratora

---

Energija iz vode najveći je svjetski izvor struje, trenutno je 15 % globalne struje dobiveno iz hidroenergije [72]. Proizvodnja električne energije iz vode nije samo ekološki prihvatljiva, već ima i relativno visoke hidrauličke korisnosti, iznad 90 %, dok je učinkovitost najbolje elektrane na fosilna goriva oko 50 % [73]. Zbog eskaliranja cijene nafte i utjecaja termoelektrana na okoliš, zadnjih se godina interes za razvoj hidroelektrana povećao [74]. Cijena električne energije nastale pretvorbom energije vode je relativno niska [73,75], što ovakav izvor energije i danas čini kompetitivnim u odnosu na druge obnovljive izvore energije. Trenutno najveća hidroelektrana, naziva *Three Gorges Project*, nalazi se u Kini na rijeci Changjiang, s kapacitetom od 18.200 MW [75]. Neke od prednosti hidroenergije su: fleksibilnost (brzo se mogu uključiti ili isključiti iz mreže, ovisno o potrebi mreže), niska cijena u odnosu na veliku snagu, prikladnost za industrijske primjene, smanjena emisija ugljik-dioksida (CO<sub>2</sub>), dobivanje energije iz obnovljivih izvora i mogućnost korištenja jezera za druge namjene. No da se ne bi spominjale samo pozitivne strane hidroenergije, postoje i one negativne, koje su: oštećenje ekosustava i smanjenje raspoloživog prostora, zamuljivanje i smanjenje protoka, emisija metana, potreba za raseljavanjem ljudi na mjestu jezera te rizik od kvara i havarija, pogotovo velikih brana [73]. Plinovi se mogu stvarati iz više razloga, neki od njih su posljedica kavitacije tj. naglog smanjenja tlaka kod turbinskih lopatica, osim toga, plinovi se stvaraju od zagrijavanja vode (pušta se hladna voda iz gornjeg jezera, te se ona zagrijava) [72] i od parcijalnih izbijanja gdje nastaje Ozon O<sub>3</sub> [76]. Prema [72], 99,5 % otopljenog metana (CH<sub>4</sub>) u vodi, odlazi u atmosferu nakon prolaska turbine. Ovisno o hidrauličkom potencijalu, tj. visini i protoku vode [77,78], odabire se prikladna turbina, prema dijagramu na slici 2.1. S mehaničke strane, svaki tip turbine ima svoje prednosti i nedostatke.





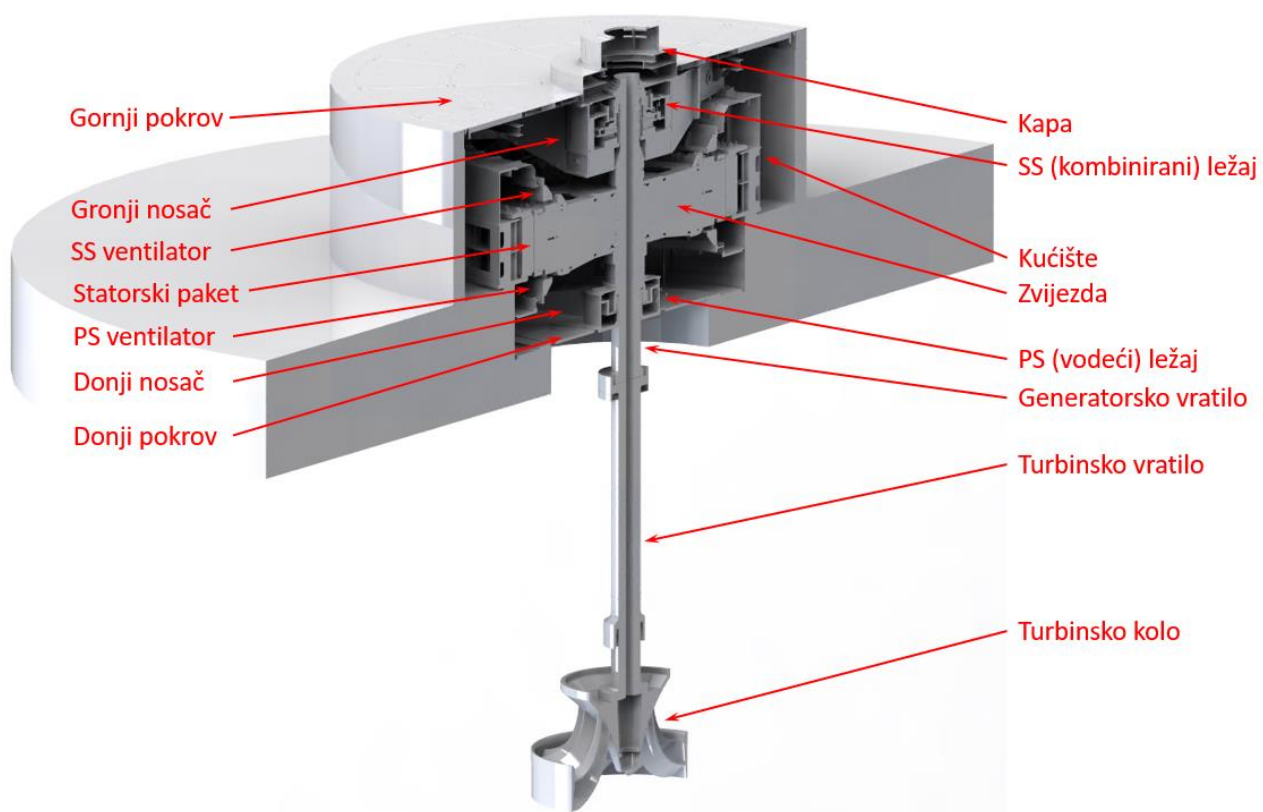
Slika 2.1. Odabir tipa turbine prema [77]

U nastavku ćemo se ograničiti samo na vertikalne hidrogeneratore velike snage u izvedbi IM8425 (prema IEC 60034-7). Te generatore ćemo ugrubo podijeliti na sljedeće veće cjeline, koje su također pokazane i na slici u nastavku [79,80]:

- uljna glava
- kapa
- SS (kombinirani) ležaj
- gornji nosač
- kućište
- donji nosač
- PS vodeći ležaj
- generatorsko vratilo
- zvijezda/polni kotač
- polovi
- PS Ventilator (na pogonskoj strani)
- SS Ventilator (na stražnjoj strani)
- kočnice.

Glavni dijelovi turbinskog dijela bitni za generator su:

- turbinsko vratilo
- turbinski vodeći ležaj
- turbinsko radno kolo, itd.



**Slika 2.2.** Dijelovi hidroagregata prema [79]

## 2.1. Projekt generatora

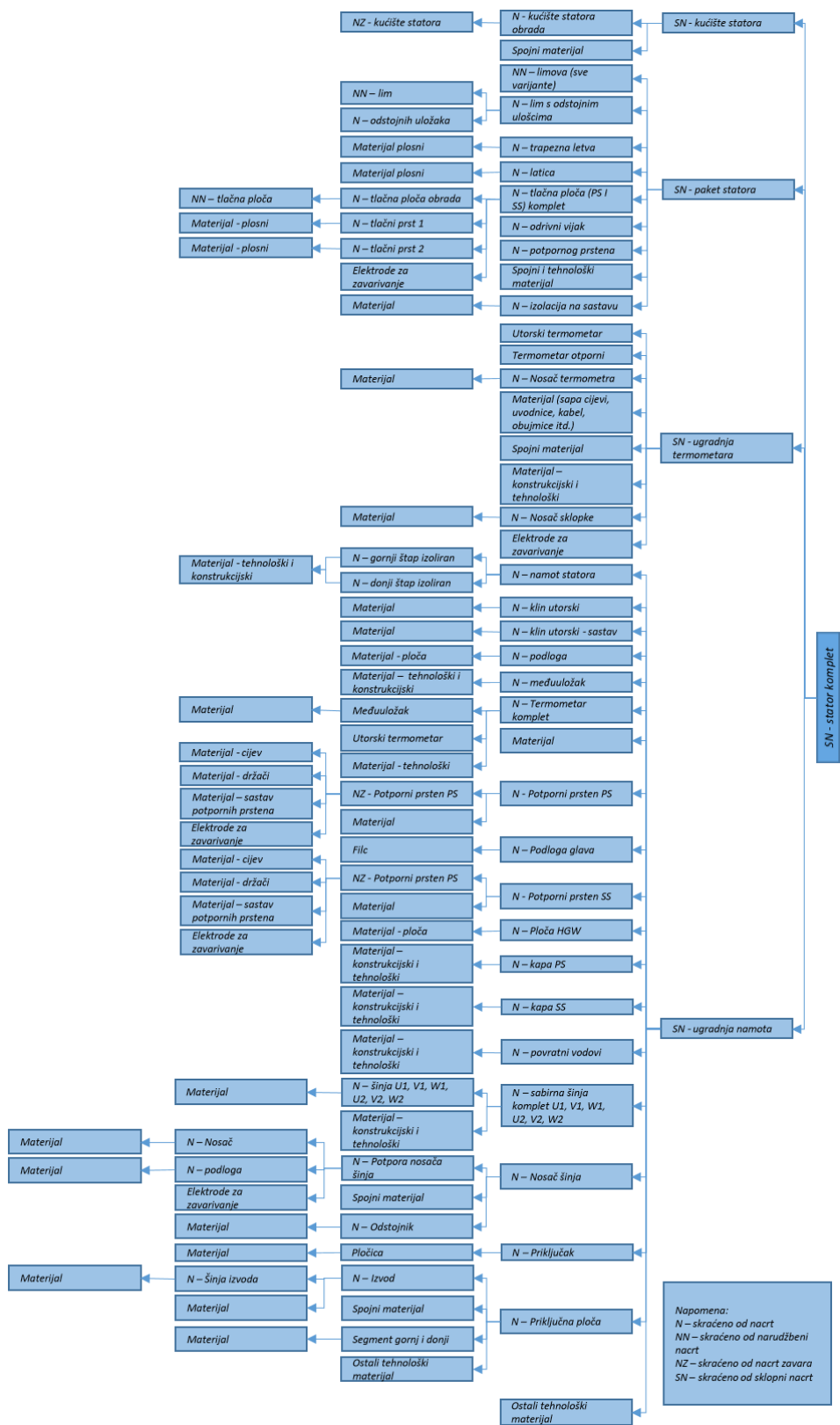
Projektни ured je prvi odjel tvrtke koji ima doticaj s novim projektom. U fazi ponude, projekt definira gabarite aktivnog dijela stroja, te se na temelju osnovnih podataka o aktivnom dijelu stroja, radi mjerna skica i određuje cijena za ponudu. U slučaju da kupac odluči kupiti ponuđeni stroj, potpisuje se ugovor između kupca i proizvođača. Projektни odjel tada radi detaljan elektromagnetni proračun za aktivni dio generatora. Elektromagnetni proračun radi se na temelju interno (unutar koncerna Končar) razvijenih programskih alata, prema [80], te na temelju dugogodišnje stečenog znanja i iskustva *know-how*. Prilikom izrade proračuna upotrebljavaju se i programski alati za analizu konačnim elementima, a proračuni se rade u skladu s međunarodnim normama, neke od njih su IEC (npr. IEC 60034-1), ISO, IEEE (npr. Std C50.12) [79].

Definiranje aktivnog dijela generatora u ovoj fazi obuhvaća rotorski dio generatora; poput broja polova, promjera rotora, dimenzije polova, broja svitaka na polu, broja prigušnih vodiča, smještaja na polu, potrebne dimenzije i aktivnog dijela koji se nalazi na statoru. Aktivni dio statora obuhvaća unutarnji i vanjski promjer statorskog paketa, aksijalna visina paketa, broj statorskih utora, kao i njegove dimenzije, dimenzije istaka glava namota, broj zračnih kanala za hlađenje generatora, materijali. Osim toga, projekt definira aktivni dio uzбудnika (rotor i stator), a ponekad i PMG (eng. *permanent magnet generator*), ovisno o zahtjevu kupca. Osim ovih navedenih, projekt također definira i sve druge bitne parametre za daljnje projektiranje generatora, poput momenata kratkih spojeva, magnetne sile privlačenja za 10 % ekscentriteta, sile privlačenja jednog pola, sile privlačenja za 50% kratko spojenih polova, minimalne potrebne zamašne mase generatora, mase bakra, materijala limova, kao i ostale kupcu bitne električne veličine, poput reaktancija, faktora snage, gubitaka, omjera kratkog spoja itd.

Glavni, tj. aktivni dio generatora je definiran u projektu, te kao što će se kasnije i vidjeti, greške u toj fazi iziskuju puno promjena. Promjena nekog parametra definiranog u projektu može značiti potpuno novu dokumentaciju, a ukoliko se greška dogodi na gotovom, tj. proizvedenom generatoru, utoliko posljedice mogu biti znatno veće.

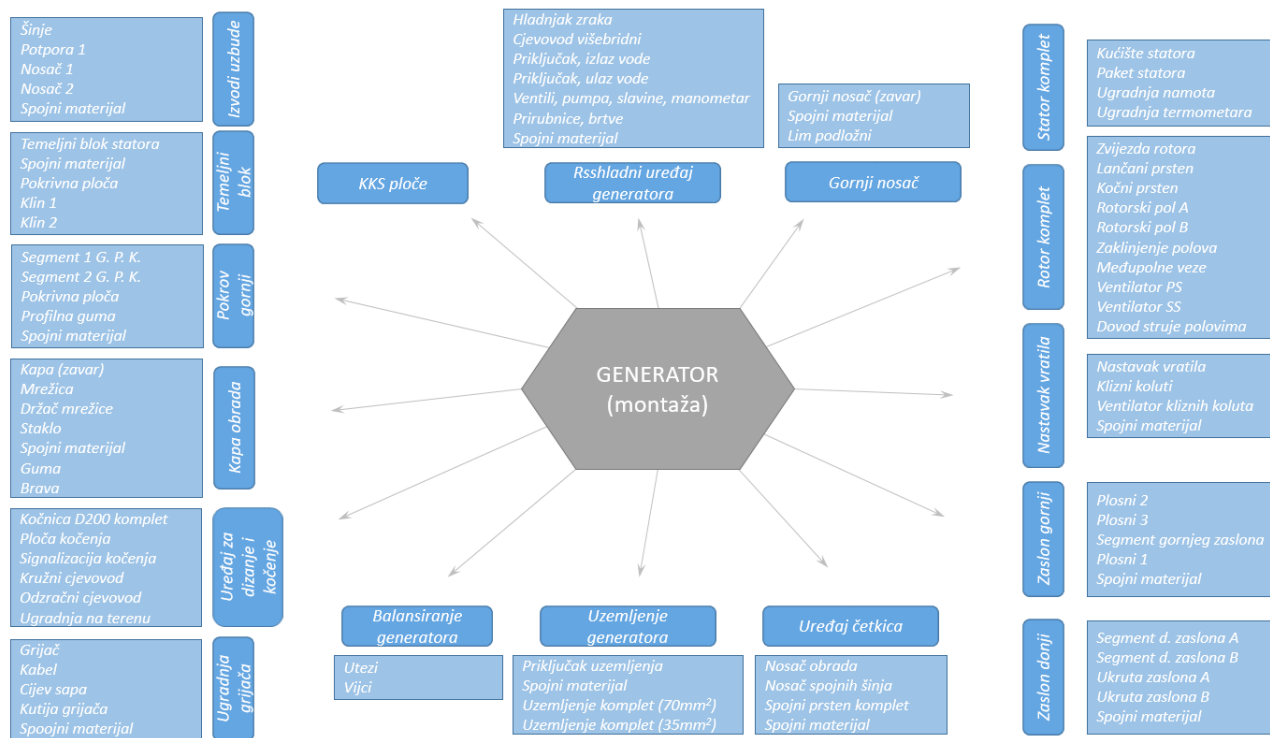
## 2.2. Konstrukcija generatora

U konstrukcijskom odjelu rade većinom strojarski inženjeri, koji moraju dobivene podatke od projekta obraditi, nacrtati, razraditi, proračunati i pratiti do same izrade [79,80,81,82,83] (što uključuje praćenje izmjena i ispravljanje eventualnih pogrešaka), sve dok generator ne bude kompletiran na terenu, instaliran i pušten u pogon [81]. Veliki generator je složena cjelina, koju čini više od 2.000 dijelova [79]. U praksi se generator prikazuje uobičajenom, hijerarhijskom strukturom dokumentacije, koju na najvišoj razini predstavlja sklopni nacrt montaže. U drugoj je razini prvi red podsklopova: „gornji nosač“, „stator komplet“, „rotor komplet“, „nastavak osovine“, „zaslon gornji“, „zaslon donji“, „uređaj četkica“, „uzemljene generatora“, itd. (cijela podjela glavnih sklopova i podsklopova dana je na slici 2.3. [79] te u [81]). Na toj se razini nalaze i informacije značajne za tehnološki proces izrade, kao što su narudžbeni nacrti, nacrti zavara i nacrti obrade. Dokumentacija daljnjih podsklopova, ima tradicionalnu strukturu, nastalu tijekom dugogodišnje prakse izgradnje generatora, tako se „stator komplet“ dijeli na „kućište statora“, „paket statora“, „ugradnju namota“, „ugradnju termometara“, prema [79]. Detaljna struktura kompleta statora od jednog izvedenog objekta, može se vidjeti u nastavku. U svrhu jednostavnijeg prikaza strukture, uvedena su minimalna pojednostavljenja. Struktura je iz [79]. Pojednostavljenja su provedena na mjestima gdje postoji više nacrti sa sličnim nazivom, recimo za povratne vodove - gdje je u stvarnosti pet različitih nacrti povratnih vodova, a u ovoj je strukturi pokazan samo jedan nacrt. Isto je provedeno i za nacрте sabirnih šinja; u stvarnoj strukturi nalazi se šest različitih nacrti, ovdje je prikazan samo jedan nacrt. Osim toga, nisu prikazani svi detaljni materijali kojima se koristi, već je navedeno da se u strukturi nalaze tehnološki materijali, a to mogu biti krpe, smola, kofil, uzice, razrjeđivač, polu-vodljivi lak, sredstvo za odmašćivanje, lem, vuna, brusno platno, kit, trake od Calmicaglasa, stakleno platno itd. Uz navedena pojednostavljenja za stator-komplet, prema dostupnim podacima iz [79] proizlazi struktura prema slici 2.3. Struktura prikazana na slici 2.3., sadržana je u jednom segmentu ukupne strukture (podsklopu) prikazane na slici 2.4., s glavnim montažnim nacrtom i njegovim podsklopovima. Ovdje se neće pokazivati detaljna struktura ostatka dokumentacije, jer to nije ni cilj ovog rada, no struktura je sličnog oblika za sve glavne sklopove koji su pokazani na slici 2.4 i u skladu sa [79].



Slika 2.3. Shema strukture statora komplet [79]

Obzirom na veliki broj dijelova i opsežnost dokumentacije, ovo istraživanje obuhvatilo je dio procesa od izrade projekta do izrade kompletne konstrukcijske dokumentacije. Više autora navodi da je određivanje veza između komponenata intenzivan i vremenski zahtjevan posao, [84] navodi da je za DSM matricu 64 x 64 utrošeno 5 mjeseci, osim toga, napomenuto je da nikad nije završena provjera, uvijek se nastoji dublje razumjeti sustav [84]. Drugi autori također ističu vrijeme kao ključni faktor sličnih projekata, tako se u [25] navodi da je utrošeno 4 mjeseca timskog rada za izradu DSM modela mlaznog motora veličine 54 x 54, dok je za izradu DSM matrice arhitekture sustava digitalnog ispisa utrošeno nekoliko mjeseci, uz značajno smanjenje broja komponenata jer bi matrica bila 2.000 x 2.000, a smanjena je na 84 x 84 [25]. DSM parametra generatora upotrebljava parametre vezane za veći dio nacрта, koji su prikazani na slici 2.4., no uglavnom samo za glavne dijelove, jer zbog trenutnih mogućnosti programa, a i zbog problema s identifikacijom veza u velikim matricama, nije bilo moguće koristiti se svim parametrima. Prema strukturi na slici 2.4., parametri koji se upotrebljavaju u DSM-u, nemaju doticaja s ugradnjom termometara, zaklinjenjem polova, međupolnim vezama, dovodom struje polovima, nastavkom osovine, kliznim kolutima, ventilatorom kliznih koluta, zaslonima, uređajem četkica, uzemljenjem generatora, balansiranjem generatora, ugradnjom grijača, izvodima uzbude, KKS pločama, niti s dijelom rashladnog uređaja generatora. Svi parametri koji će se upotrebljavati, nisu dovoljni da bi obuhvatili svu dokumentaciju, jer bi matrica trebala biti veličine 2.000 x 2.000 ako ne i veća. U ovom radu se fokusiralo na glavne dijelove generatora i njihove parametre koji se mogu naći i na mjernoj skici, a odnose se na kućište statora, paket statora, namot, osovinu, zvijezdu, lančani prsten, kočni prsten, polove, ventilatore, uređaj za dizanje i kočenje, dijelom na kapu, dijelom na gornji pokrov, temeljni blok, gornji nosač te dijelom rashladni uređaj.



**Slika 2.4.** Shema strukture konstrukcijske dokumentacije velikog generatora prema [79]

## 2.3. Mehanički proračuni generatora

Mehanički proračuni generatora su važna, a može se reći, u današnje vrijeme i neizostavna aktivnost u procesu konstruiranja generatora. Mehanički proračuni rade se tako da budu u skladu s propisanim normama, poput normi za proračun konstrukcija i zamora materijala (Eurokod), proračuna vijčanih spojeva (VDI norme), dozvoljenih vibracija (ISO norme) itd. Ako norma ne postoji, proračuni se provode u skladu s internim standardima [79] na način da su u skladu s normalnom inženjerskom praksom. Cjelovit pristup proračunu, osim što osigurava integritet konstrukcije u svim radnim režimima, pomaže poboljšanju razumijevanja konstrukcije. Iz dosadašnjeg radnog iskustva autora, mehanički proračuni daju uvid u ponašanje konstrukcije, a time i omogućuju optimiranje konstrukcije generatora te potiču inovativnost, što s vremenom stvara konkurentniji, ali ne nužno i kvalitetniji proizvod. Povećanjem znanja i razumijevanja o generatoru, uz dostupnost naprednih programskih aplikacija poput SolidWorksa, Pro/ENGINEERa, Rotlata, Algora, Inventora itd., konstruktoru se omogućuje uvid u ponašanje složenih dijelova. Osim povećanja znanja, bitno je naglasiti da su svakim danom i programski paketi sve napredniji i svakim danom imaju sve veće mogućnosti, ali da bi ih se moglo uspješno upotrebljavati, zahtijevaju temeljnu razinu znanja i razumijevanje pozadine programa. Da bi se što točnije moglo opisivati realno ponašanje konstrukcije, proračune je potrebno s vremenom utočnjavati dostupnim ispitivanjima i unaprjeđivati, ali ono nezamjenjivo i vrlo vrijedno što se dobiva proračunom, jest povećanje znanja i razumijevanja ponašanja konstrukcije. Proračunima se obuhvaćaju svi bitniji dijelovi generatora koji su opterećeni i potrebno ih je provjeriti ili definirati. Kod nekih „standardnih rješenja“ koja su dugo bila predimenzionirana i nisko opterećena, optimiranjem i smanjenjem mase dijelovi su postali znatno opterećeni, a u nekim slučajevima su pretanki, pa se mogu pojaviti problemi s izvijanjem, vibracijama, a posljedično i bukom u radu. Kako bi se takvi problemi mogli izbjeći, takve je slučajeve u fazi projektiranja i konstruiranja potrebno detaljno provjeravati.

Trenutni tijek parametara i proračuna je da se nakon elektromagnetnog proračuna generatora dobivaju ulazni podaci za izradu osnutka, te se tada pristupa mehaničkom proračunu kritičnih brzina, a poslije proračuna, sila na temelju i proračunu statorskog paketa. Nakon toga dolaze ostali mehanički proračuni - poput proračuna kućišta i gornjeg nosača, proračuna pola, proračuna lančanog prstena / polnog kotača, proračuna zvijezde, proračuna vratila, proračuna kočnja, proračuna ventilatora,



proračuna naprava za nošenje, proračuna naprava za transport, i u najnovije vrijeme, proračuna glava namota, itd.

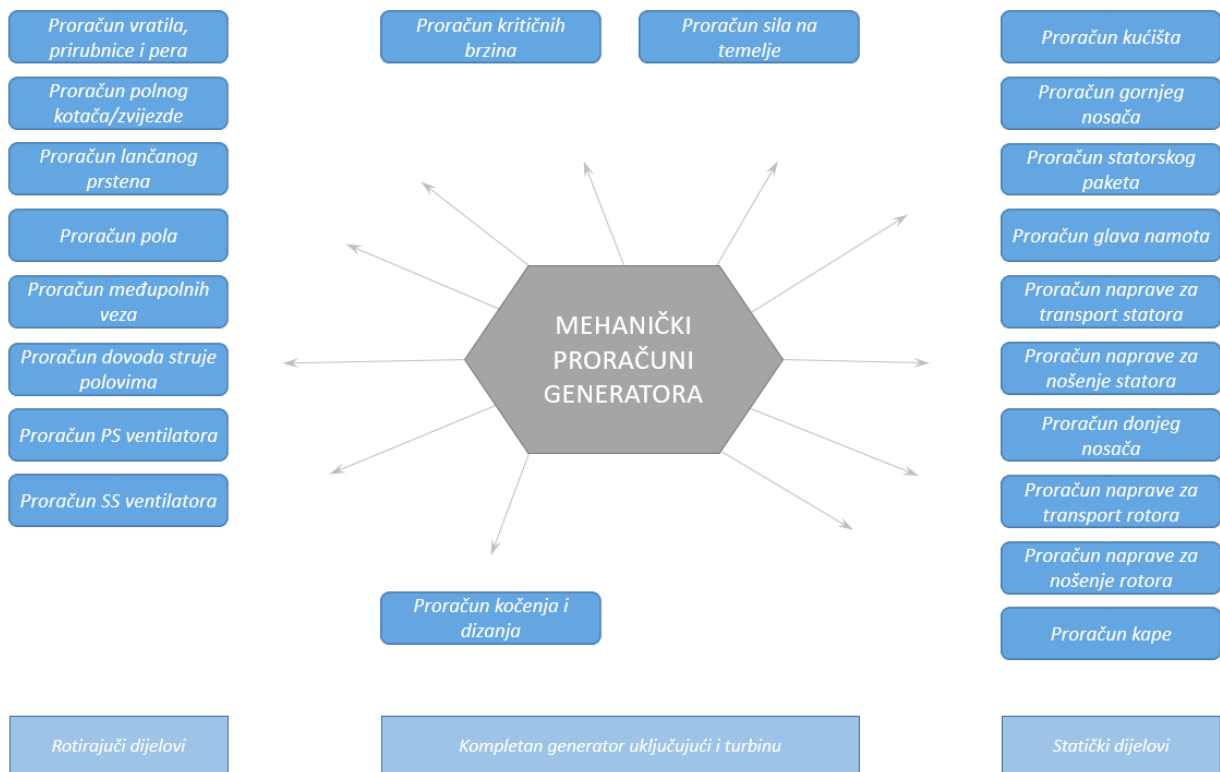
Bitno je naglasiti da brzina izrade proračuna ovisi o složenosti i vrsti proračuna, je li on analitički ili numerički, te o iskustvu osobe koja ga radi. Evidentno je da inženjer nakon desetak ili više ponavljanja istog tipa proračuna znatno smanji vrijeme potrebno za izradu istog. Objekti su obično velikim dijelom slični, a moguće se i jednostavno prilagoditi promjenama, ako se radi o objektu drugog proizvođača kod revitalizacija.

U nastavku su istaknuti mehanički proračuni, koji pri izradi iziskuju više vremena. Više vremena zahtijevaju zbog potrebe pripreme 3D modela, te proračuna konačnih elemenata, na kraju i zbog potrebe za izradom opsežnih izvještaja, koje u konačnici pregledava i odobrava kupac ili konzultant.

Zahtjevniji mehanički proračuni su:

- proračun polnog kotača
- proračun pola
- proračun vratila (zamor)
- proračun gornjeg nosača
- proračun kućišta
- proračun donjeg nosača
- proračun naprave za nošenje rotora
- proračun naprave za transport rotora
- proračun naprave za nošenje kućišta
- proračun naprave za transport kućišta
- proračun kritičnih brzina
- proračun ventilatora na PS (pogonskoj) strani
- proračun ventilatora na SS (stražnjoj) strani
- proračun glava namota (najsloženiji proračun koji iziskuje najviše vremena).

Za potrebe ovog istraživanja, prema [79] napravljena je strukturna organizacija mehaničkih proračuna prikazana na slici 2.5 u nastavku. Osnovu te strukture čine proračuni rotirajućih dijelova, proračuni statičkih dijelova i proračuni koji obuhvaćaju cijelu rotorsku liniju agregata (rotor generatora i turbine) zajedno sa statorom generatora.



**Slika 2.5.** Uobičajeni mehanički proračuni za veliki generator prema [79]

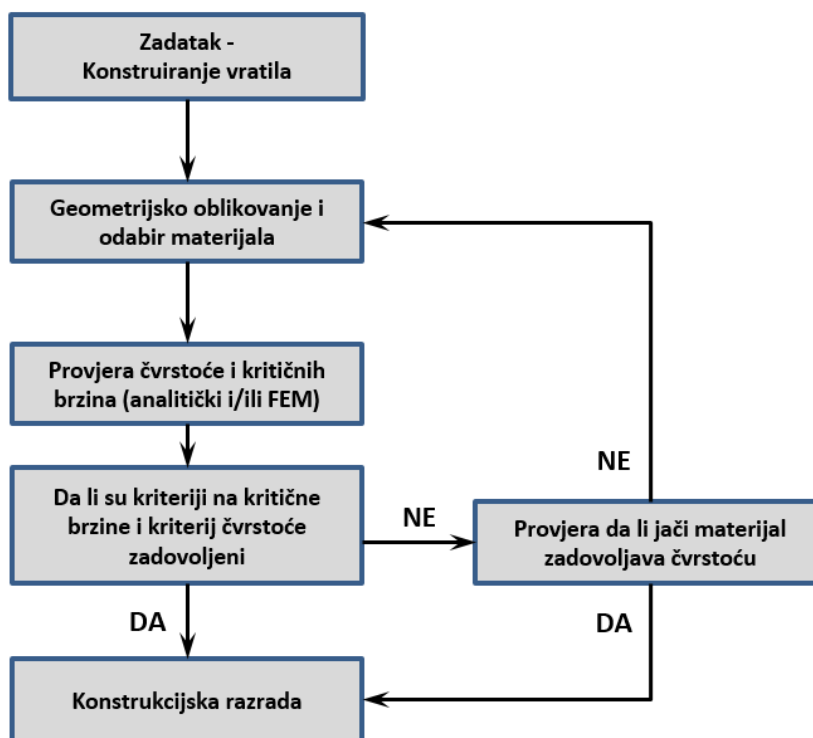
## 3. Primjena DSM-a u konstruiranju

---

Tijek generiranja funkcionalnih, konstrukcijskih i tehnoloških parametara u razvojnom procesu generatora iznimno je složen i iterativan. Također je u praksi poznato da se puno vremena i rada može izgubiti promjenom nekih parametara, ali nije poznato da postoji zapis međusobnih utjecaja parametara. Stoga mladi inženjeri tek s višegodišnjim iskustvom stječu znanja potrebna za razumijevanje relacija i međuutjecaja parametara koji se određuju tijekom razvojnog procesa. Modelom razvoja mogli bi dobiti osjećaj i vizualnu sliku tijeka određivanja parametara. Model koji bi omogućio prikaz i razumijevanje tijeka razvoja parametara, pored vizualnog prikaza međusobnih utjecaja, može omogućiti i poboljšanje razvojnog procesa, s ciljem smanjivanja broja iterativnih ciklusa, a time i vremena razvoja proizvoda.

### 3.1. Konstruiranje, mehanički proračuni i planiranje uz DSM

Konstruiranje uključuje karakterizaciju brojnih varijabli, koje na kraju čine proizvod [31]. Može se reći da je za dobro konstruiranje potrebno iskustvo, inženjerski intuitivni osjećaj za ponašanje konačnog proizvoda i znanje o proračunima, statici, dinamici i materijalima. Za unikatni tip proizvoda, koji se radi po zahtjevima kupca, iako su funkcija proizvoda i svi elementi dobro poznati, svi se parametri trebaju provjeriti prilikom procesa razvoja proizvoda, uz predugovorni dizajn i detaljni dizajn nakon ugovora. Prilikom konstruiranja nekog dijela poput vratila, prolazi se kroz iterativni postupak, kao na slici 3.1. - najprije je potrebno definirati početnu geometriju i materijal, slijedi provjera čvrstoće i kritičnih brzina te provjera jesu li svi kriteriji zadovoljeni. Provjeravaju se kriteriji za dozvoljena naprezanja, kriterij na dozvoljeni progib i kriterij za kritične brzine. Ako su kriteriji zadovoljeni, slijedi konstrukcijska razrada, no ako uvjeti nisu zadovoljeni, provjerava se ne bi li možda čvršći materijal zadovoljio postavljene kriterije čvrstoće, a ako ne, vraća se na geometrijsko oblikovanje i ponovno se radi proračun - sve dok se ne zadovolje postavljene zahtjevi za naprezanja, deformacije, zamor i kritične brzine.



**Slika 3.1.** Pojednostavljeni postupak konstruiranja vratila

Proces prikazan na slici 3.1., iziskuje puno vremena i ima velik utjecaj na kvalitetu budućeg proizvoda. Analiza konstrukcije je osnova za otkrivanje potencijala konstrukcije [28] i može istaknuti važne elemente, čija modifikacija može voditi do značajnog poboljšanja nekih varijabli konstrukcije. Istraživanje prikazano u ovom radu obuhvatilo je analizu konstrukcije i procesa razvoja generatora. Proračuni su neophodni za definiranje budućeg proizvoda i, u pojedinim slučajevima, mogu poprilično uštedjeti na određenim objektima, što kasnije znači i bolju buduću konkurentnost na tržištu.

Mehanički proračuni osiguravaju mehaničku stabilnost i integritet hidrogeneratora u svim radnim i tranzijentnim režimima tijekom njegove eksploatacije, a osim toga, omogućuju donošenje odluka o ostavljanju/zamjeni postojećih dijelova kod revitalizacije postojećih objekata - što često znači i veću konkurentnost. Proračuni imaju velik utjecaj na učinkovitost dizajna i optimizaciju, zbog činjenice da definiraju osnovne materijale i oblike komponenti generatora, u novije vrijeme može se reći i - optimalne oblike komponenti generatora.

Najčešće se radi 20 do 30-ak proračuna po najčešćim tipovima velikih hidrogeneratora. Kao što je prethodno pokazano, obzirom na to da većina elemenata sadrži iteracije koje dovode do konačnog oblika, mehanički proračuni mogu biti veliki potrošač vremena na određenom projektu,

pogotovo zato što su komponente u konačnoj konstrukciji vezane, a i proračuni su međusobno povezani, pa to često dovodi do dodatnih iteracija.

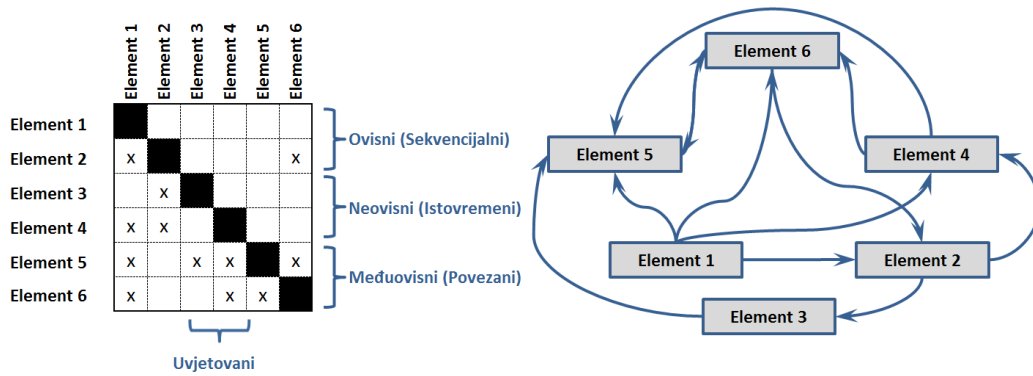
Jedna od metoda za analizu arhitekture proizvoda, arhitekturu organizacije ili procesa je DSM (*design structure matrix ili matrica konstrukcije*) prikazan slikom 3.2. Osnivač, ili začetnik DSM-a, bio je Don Steward 1962., s matricom koju je nazvao *precedence matrix* [85], a već 1965., napravio je rad s procedurom particioniranja i analizu cijepanja [86], kasnije je rad s DSM-om proširen na više industrijskih grana, u devedesetima je primijenjen u NASA-i, Boeingu, General Motorsu, Intelu (25). Matrica konstrukcije, ili matrica strukturne ovisnosti, je kvadratna matrica  $N \times N$  s jednostavnim kompaktnim i vizualnim prikazom sustava [22], projekta ili bilo kojih međusobno povezanih podataka ili događaja.

Postoje dva načina označavanja veza među elementima u matrici, te će se u ovoj disertaciji upotrebljavati redovi za ulazne podatke (tj. element 2 treba ulazne podatke od elemenata 1 i 6, element 3 treba ulazne podatke od elementa 2 itd.). U kolonama su izlazni podaci, tj. element 2 daje podatke za elemente 3 i 4, element 4 daje izlazne podatke za elemente 5 i 6 itd.

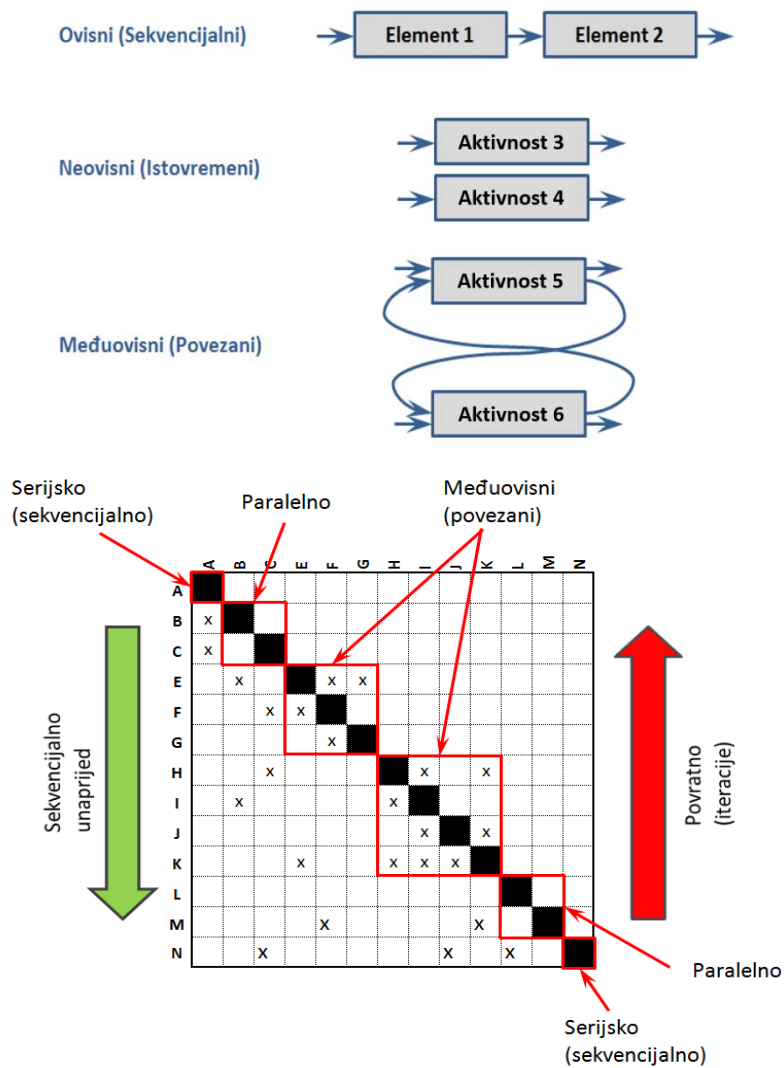
DSM se koristi van-dijagonalnim poljima za označavanje ovisnosti elemenata, Steward je upotrebljavao  $x$ , kao oznaku veze između dva elementa/aktivnosti. Svaka veza koja se nalazi iznad dijagonale znači povratnu vezu tj. iteraciju. Kako bi se smanjila količina iteracija, cilj je smanjiti broj veza koje se nalaze iznad dijagonale, ili minimizirati udaljenost povratnih veza elemenata od dijagonale. U slučaju kada bi sve veze bile ispod dijagonale (donje trokutasta matrica), to bi bio idealni slučaj s jednosmjernim slijedom bez iteracija (*downstream activities*) [87].

Elementi mogu biti međusobno ovisni (sekvencijalni) pa se izvode serijski, jedan iza drugoga u slijedu, poput elemenata 1 i 2, neovisni kao elementi 3 i 4, koji se mogu izvoditi paralelno - nazivaju ih i aktivnosti koje se preklapaju [88]. Cho i Eppinger [89] modelirali su dvije aktivnosti koje se preklapaju, tj. koje su paralelne s ograničenjem da kasnija aktivnost ne završi prije. No ovaj model nije se pokazao primjenjivim za više aktivnosti s više iteracija. Zadnji tip veza je međuovisan (povezan), elementi 5 i 6 sadrže iteracije koje mogu imati više oblika u prikazu DSM-a.

Isti zapis veza između elemenata može se prikazati i pomoću modela *diagrapha*. Isti problem koji je pokazan donjom DSM matricom, na desnoj je strani pokazan u obliku *diagrapha* i u konačnici ima isto značenje. Ganttov i PERT-ov dijagram nisu adekvatni za planiranje razvoja kompleksnih proizvoda, jer nemaju mogućnost analizirati međuovisne zadatke koji stvaraju iteracije [90,91].



Slika 3.2. DSM (design structure matrix)



Slika 3.3. Veze između elemenata

Eppinger i Salminen [35] prezentirali su druge mogućnosti korištenja nekvadratnih matrica za različite aspekte poput komponenata, ljudi i aktivnosti. Osim toga pojavljuju se i DMM-i (*Domain Mapping Matrices*) koji povezuju više domena.

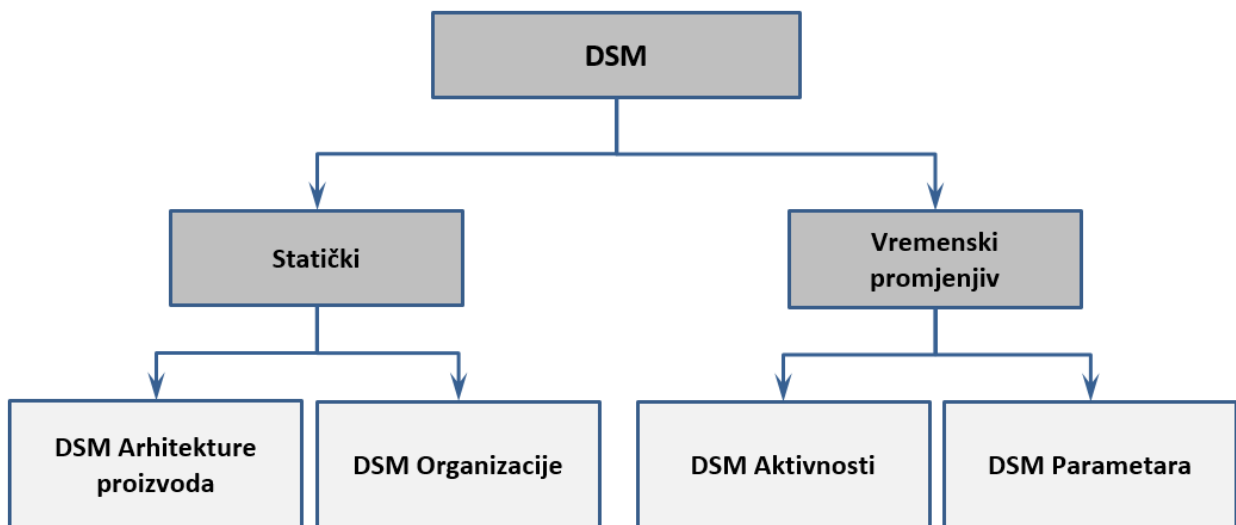
Postoje MDM (*Multi Domain Matrix*) matrice, koje povezuju više domena i samo su proširenje osnovnih DSM matrica, jer se sastoje od više DSM i DMM matrica [92].

DSM matrica povezuje elemente iz samo jedne domene, a može se upotrebljavati za različite slučajeve:

- statičke slučajeve (koji se ne mijenjaju u vremenu) u koje spada:

1. Arhitektura proizvoda, elementi ove matrice su komponente za opisivanje fizičkog dodira, toka materije, energije ili signala.
2. DSM Organizacije, upotrebljava se za opisivanje organizacijske strukture tvrtke, grupa, ljudi i njihovih interakcija.

- vremenski promjenjive slučajeve (nestacionarne), u koje spadaju procesi, poput programskih procesa i parametarskih modela koji se sastoje od parametara, te modeli bazirani na aktivnostima, poput računalnih programa ili proračuna (kao u ovom radu).

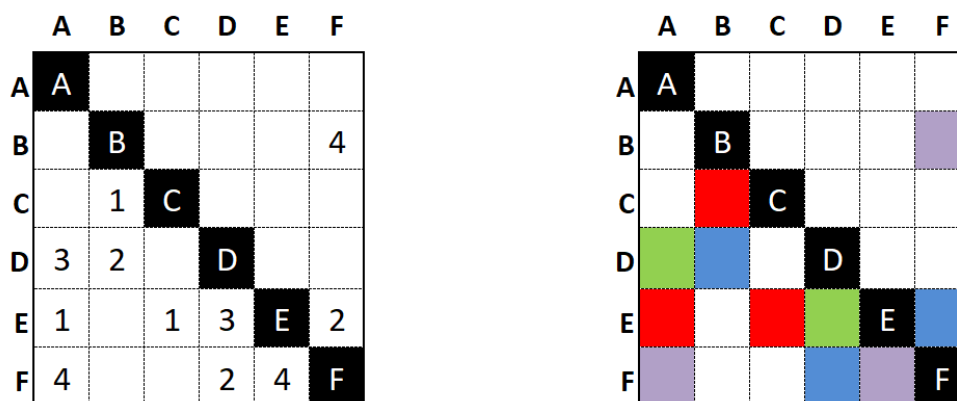


**Slika 3.4.** Podjela DSM matrica [22]

Označavanje DSM-a je prošireno na numerički DSM, koji umjesto veze x ima označavanje veze s brojevima, na taj način moguće je gradirati vezu po njezinoj jačini. Abdelsalam i Bao [93] upotrebljavali su numeričke vrijednosti za označavanje broja iteracija.

| <i>Vrijednosti utjecaja parametra</i> | <i>Vrijednost</i> |
|---------------------------------------|-------------------|
| <i>Nema utjecaja</i>                  | <i>0</i>          |
| <i>Slabi utjecaj</i>                  | <i>1</i>          |
| <i>Srednji utjecaj</i>                | <i>3</i>          |
| <i>Veliki utjecaj</i>                 | <i>9</i>          |

Osim toga Smith i Eppinger [94] napravili su matricu vjerojatnosti, u kojoj su brojevi u rasponu od 0 do 1 i predstavljaju vjerojatnost izvođenja aktivnosti. Kasnije se također matrica upotrebljavala i u svrhu procjene rizika promjene [95]. Na slici u nastavku prikazan je primjer binarne matrice, koja van dijagonale sadrži brojeve. Prikazom binarne matrice se može jednostavno koristiti s različitim namjenama, poput prikaza jačine, važnosti, utjecaja; a može se prikazati numerički ili bojom, kao što je prikazano u nastavku.



**Slika 3.5.** Numerički DSM prema [25]

Podaci o proizvodu prikupljaju se iz plana procesa. Razina detalja nije pred-definirana i ovisi o dostupnom znanju o proizvodu i o procjeni osobe koji definira matricu. Skupljanje podataka kroz proces zahtjeva alat, prikladan alat može biti PLM, koji može upravljati vezama (roditelj-dijete). Drugi način prikupljanja podataka je izrada ankete, na način da se ona podijeli stručnjacima za promatrani problem (recimo konstrukciji) te se dobiveni podaci stave u matricu, ili na način da se radi intervju s par stručnjaka, pa se na temelju njega radi matrica. U slučaju matrica koje sadrže određeno znanje iz glava ljudi, ne postoji druga mogućnost osim zadnje dvije. Osim toga, može se upotrebljavati i hibridni pristup, da se napravi osnovna matrica iz postojeće dokumentacije o promatranom problemu, pa se kasnije, dodatnim intervjuima sa stručnjacima nadopunjava/mijenja.



Nakon definiranja svih veza u DSM matrici, potrebno je napraviti dodatnu provjeru podataka te se nakon toga može pristupiti analizi. DSM modeli se mogu particionirati ili preslagivati služeći se s mnogo analitičkih metoda, najčešće su klasteriranje i sekvenciranje. Klasteriranje se primjenjuje na sustave mreža koji se upotrebljavaju u arhitekturi, gdje su veze većinom simetrične u odnosu na dijagonalu. Sekvenciranje se primjenjuje na usmjerene ili vremenski promjenjive mreže. Izrada DSM matrica u ovom radu slijedi proceduru iz literature, koja se sastoji od pet koraka. Ti koraci nisu garancija da će se kompletno razumjeti kompleksni sustav, no ako se sa zadnjeg koraka povratno vrati na prvi korak, to će znatno povećati znanje o sustavu i poboljšati točnost istog [64].

### ***Razvoj DSM matrice prema [25] obuhvaća slijedećih pet koraka:***

#### ***1) Rastavljanje***

- rastavljanje kompleksnog sustava na konstituente
- kreiranje kvadratne DSM matrice s nazivima zadataka.

#### ***2) Identificiranje***

- identificiranje i zapisivanje relacija između elemenata (neki alat PLM-a, ankete ili intervju).

#### ***3) Analizu [45]***

- Particioniranje - proces manipuliranja redcima i kolonama, s ciljem smanjenja ili eliminiranja povratnih petlji (donje trokutasti oblik), te nastojanje da povratne petlje budu što bliže dijagonali.
- Klasteriranje (traženje elemenata koji su međusobno povezani da bi činili module ili klastere).
- Ulančavanje (*banding*), vizualni prikaz bojanjem redaka, u svrhu lakšeg raspoznavanja paralelnih aktivnosti ili zadataka.
- Cijepanje (proces odabira povratnih petlji, čije će uklanjanje rezultirati donje trokutastom matricom).
- Skupljanje (agregacija) (skupljanje ili spajanje dva elementa u jedan).
- Dekompozicija, upravljanje iteracijama na način da se oznake X primiču što je bliže moguće prema dijagonali ili ispod dijagonale.

#### ***4) Prikaz rezultata***

- Kreiranje vizualnog prikaza matrice s važnim i interesantnim obojanim mjestima.

#### ***5) Poboljšanje***

- Izrada promjena s ciljem optimizacije sekvence izvođenja.

Kao što će kasnije, u poglavlju 4 i u dodatku biti pokazano, moguće je manipulirati matricama na način da se preslaguju redci i kolone, bilo automatski programom ili ručno, sa svrhom smanjenja povratnih veza tj. iteracija. Takvo preslagivanje naziva se particioniranje. Za samo particioniranje postoji puno raznih algoritama, ali svi se svode na slično, na preslagivanje redaka i kolona i na rješavanje ostatka matrice pomoću nekog od dostupnih algoritama za petlje, poput metoda *Path Search*, *Power of the Adjacency Matrix*, *The Reachability Matrix* te *Triangularization* algoritma. Detalji o samom particioniranju i načinima rješavanja dani su u poglavlju I. dodatka. Nakon završetka analize s odabranim ili dostupnim algoritmom, slijedi analiza rezultata sa svim važnijim naznačenim značajkama. Prikaz rezultata u DSM-u je intuitivno čitljiv, a osim toga sam DSM povećava arhitektonsko razumijevanje, identificira module, predviđa interakcije sustava, smanjuje trajanje procesa, smanjuje količinu iteracija (ponavljanja), poboljšava organizacijske sposobnosti itd.

Pridavanje vjerojatnosti je potrebno za simulacije [96]. U nekim člancima sa simulacijama, korisnici su pretpostavili vjerojatnosti kao poznate [89,95,97], ili su neke vrijednosti pretpostavljene kako bi se vidio utjecaj tih vrijednosti [94,98]. Neki pristupi s procjenama su upotrebljavali utjecajne vrijednosti. Sered i Reich [99] skalirali su vrijednosti tako da je maksimalna suma vrijednosti u koloni jednaka 0,95. Yassine [91] je otkrio da je vrijednost  $P = 0,52$  prikladna za stvarne projektne podatke. [87] upotrebljavali su  $P = 0,5$  kao utjecajni faktor. Za potvrdu tog podatka potrebna su daljnja istraživanja. Yassine [91] je pretvorio DSM u *Probability DSM*, na način da je maksimalna numerička vrijednost 6 jednaka maksimalnoj vjerojatnosti 0,5. Postoje programski paketi koji omogućuju prikaz jednostavnijih mreža, s manje elemenata.

### **3.2. Identificiranje relacija i definiranje parametara analize generatora**

Konstrukcija generatora u tvrtki Končar Generatori i motori d. d., kao što je rečeno, ima dugu tradiciju. Znanje o konstrukciji i razvoju generatora stečeno tijekom desetljeća, nije dokumentirano na način da bi bilo lako vidljivo i dostupno svima. S druge strane, pri rekonstrukciji generatora događa se da ne postoji sva dokumentacija postojećeg stanja, a često postojeći nacrti ne odgovaraju stvarno izvedenom stanju, ili postoje odstupanja u dimenzijama. Kako se često rade rekonstrukcije generatora drugih proizvođača, događa se da se prvo mora razumjeti postojeća konstrukcija, te je često potrebno napraviti proračune čvrstoće ili zamora tih starih dijelova, kako bi se vidjelo što od njih može ostati raditi daljnjih 40-50 godina. Kada bi postojala razvijena

arhitektura proizvoda koja je povezana s proračunima, mogla bi pomoći u jednostavnijem i točnijem računanju vremena trajanja i cijeni rekonstrukcije.

Ovim istraživanjem pokušalo se sistematski prikupiti i integrirati znanje o razvoju i konstrukciji generatora, tradicionalno segmentirano po funkcionalnim cjelinama koje odgovaraju razvojnom procesu generatora i tehnologije. Pod terminom znanje o razvoju i konstrukciji generatora ovdje podrazumijevamo zapisana i nezapisana pravila, procedure, podatke i metodu razvoja generatora. Konstrukcijska rješenja i odlučivanje pri projektiranju i konstruiranju generatora, pored činjeničnog, odnosno dokumentiranog znanja, temelje se na iskustvu, odnosno implicitnom, stručnom „prešutnom“ znanju (eng: *tacit knowledge*). Stručnjaci obično nisu svjesni posjedovanja takvog posebnog znanja, teško ga mogu verbalizirati i stoga ga je teško prenijeti unutar organizacije. Takvo znanje stručnjaci stječu uspješnim rješavanjem složenih zadataka tijekom rada u tvrtki. Uobičajeno, iskustvena znanja stručnjaci u praksi međusobno prenose u direktnom kontaktu [100] tijekom rada. To je i najčešća metoda kojom stariji inženjeri predaju znanje mlađim kolegama.

Generatori su proizvodi s dugim vijekom eksploatacije, tijekom koje, pored redovitog održavanja i servisa dolazi i do kvarova, ali i nadogradnji kojima se značajno povećavaju performanse stroja. Održavanje i rekonstrukcije generatora instaliranih pred nekoliko desetljeća su zato izuzetno zahtjevni projekti. Tijekom životnog vijeka jednog stroja, u tvrtki se promijenilo nekoliko generacija inženjera, što svakako ne olakšava prikupljanje znanja koje nije zapisano u tehničkoj dokumentaciji [101]. No i pored tih teškoća s formuliranjem, to znanje dio je znanja tvrtke [101] i od vitalnog je značenja da se takvo znanje prikupi i učini dostupnim.

Prikupljanje znanja o proizvodu i konstruiranju zahtjevno je [102] iz više razloga. Samo će neki, relevantni za ovo istraživanje biti istaknuti u nastavku. Znanje o proizvodu i konstruiranju zahtijeva sud stručnjaka, poglavito pri utvrđivanju relacija između parametara konstrukcije, a pogotovo kod analize dobivenih rezultata, jer je znatno teže vidjeti je li dobiveni rezultat analize prihvatljiv ili ne - i zbog čega. U literaturi nisu opisane formalne metode za particioniranje znanja, niti jasni kriterij za prosudbu kvalitete ekspliciranog znanja [103], a često uključuju i neslaganja stručnjaka. Jedan od glavnih ciljeva istraživanja znanja o konstruiranju je proučavanje principa, prakse i postupaka tijekom konstruiranja [104].

Istraživanja koja proučavaju znanje o konstruiranju pristupaju problemu na različite načine. Jedan od pristupa temelji se na teoriji konstruiranja, odnosno formalnom skupu ideje o raznim aspektima fenomena konstruiranja. Za pretpostaviti je da bi postojanje jedinstvenog formalnog pristupa olakšalo istraživanje prikazano u ovom radu, no četiri su glavna problema [105] s kojima se

suočava područje teorije konstruiranja: nedostatak jedinstva područja, stalna mijena paradigme konstruiranja, postojanje mnogih fragmentiranih škola mišljenja i nemogućnost pozivanja na jedinstveni teorijski model prilikom izvođenja empirijskih studija konstruiranja.

Pristupi definiranju jedinstvene teorije konstruiranja prisutni su niz godina. Među novijima je okvir teorije konstruiranja Prof. Hatchuela [106], koji se temelji na ontologiji konstruiranja zasnovanoj na konceptima generativnosti, neovisnosti struktura znanja i društvenim aspektima konstruiranja.

Za prikupljanje znanja o generatoru modificirana je metoda razgovora u trojnim intervjuima [107] i grupne diskusije u kojima su sudjelovali eksperti za pojedine segmente razvoja generatora. Tijekom istraživanja pokazalo se da je razgovore potrebno organizirati u iterativnim ciklusima. Trojni intervjui upotrebljavaju se za prijenos stručnog iskustvenog znanja unutar tvrtke [107], najčešće između iskusnih stručnjaka i mlađih suradnika.

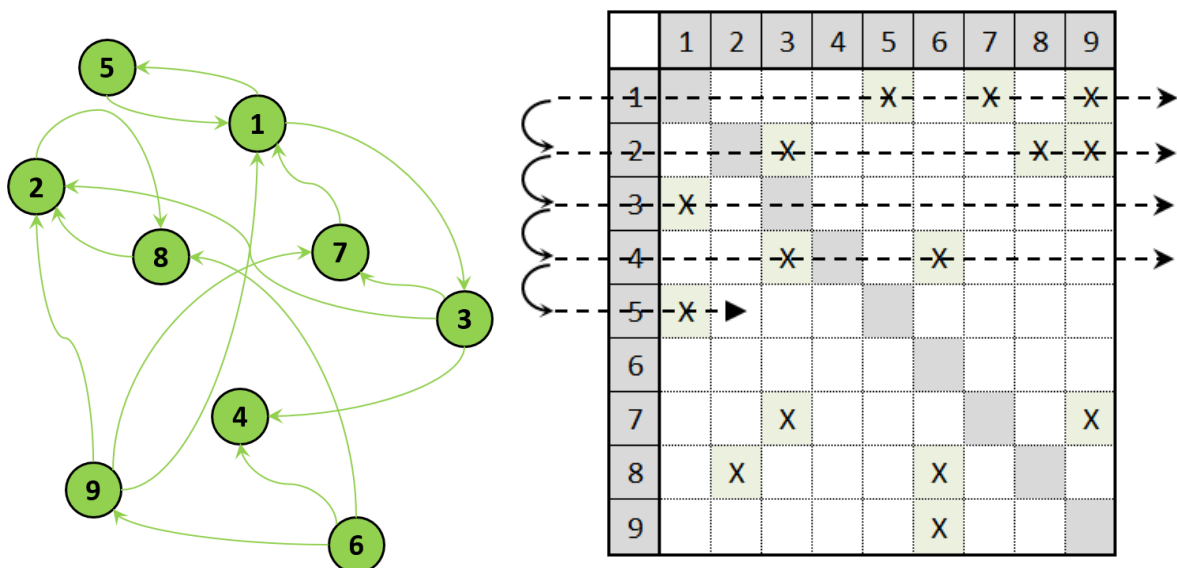
Značajke su takvih intervjua; vremenska određenost, unaprijed određena tema razgovora i sudjelovanje tri sudionika, da bi se izbjegle individualne preferencije. Sudionici imaju određene uloge: jedna osoba daje usko specijalizirano znanje o temi razgovora, druga stječe i formulira znanje, a treća osoba ima ulogu moderatora i korektora.

Organizacija takvih razgovora zahtijeva pažljivu pripremu za svaku temu razgovora, prikupljanje odgovarajućih podloga, odnosno relevantne tehničke dokumentacije. Da bi razgovor bio koristan, važno je da su svi sudionici unaprijed upoznati s ciljem i svrhom razgovora. Međusobno povjerenje sudionika također je ključan preduvjet [101].

Analiza tehničke dokumentacije prvi je korak u prepoznavanju ključnih parametara i relacija unutar konstrukcije generatora. Međutim, bez detaljnog poznavanja tematike, iz tehničke dokumentacije nije moguće prikupiti sve podatke. Iz tog razloga, u ovom se istraživanju prikupljaju podataka pristupilo hibridnom metodom [92], na način da se najprije napravi matrica na temelju dokumentacije, zatim se kroz niz sastanaka s ekspertima iz pojedinih odjela tvrtke identificiraju sve veze između parametara. Sastanci sa stručnjacima za pojedino područje vodili su se u formi nestrukturiranih intervjua. Prije sastanka, stručnjaci su upoznati sa svrhom, ciljem istraživanja i sastanka. Sastanci su održavani u iterativnim ciklusima, kako bi se raščistile nejasnoće i postigla suglasnost svih uključenih o prikupljenim informacijama. Nakon prvih sastanaka, uočeno je da eksperti, iako nesumnjivo poznaju svoje područje, kao i konstrukcijske parametre generatora i njihove ovisnosti, imaju poteškoće u opisivanju istih. Stoga je iterativno prikupljanje znanja bilo logično rješenje. Također je uočeno da više eksperata za jednu problematiku ima više različitih mišljenja, koja se nužno ne moraju usuglasiti, jer su u praksi oba

mišljenja primjenjiva i utemeljena. Tijekom razgovora s ekspertima, uočeno je da postoji tendencija opisivanja direktnih uzročno-posljedičnih veza, dok se veliki broj indirektnih veza koje nisu očite, često zanemario, unatoč njihovoj važnosti.

Upravo zato, postepenim prikupljanjem informacija kroz razgovore organizirane u ciklusima, omogućila se sistematična nadogradnja prikupljenih podataka. Analizom samo tehničke dokumentacije, pored strukturnih, ne bi mogli prepoznati relacije bitne za analizu konstrukcije generatora. Prikupljanje strukturnih informacija iz tehničke dokumentacije samo je po sebi zahtjevan zadatak, obzirom na kompleksnost konstrukcije generatora, pogotovo kada je potrebno uzeti u obzir sve veze. U nastavku je, na slici 3.6, prikazan jedan pristup definiranju veza u konstrukciji koji je korišten prilikom izrade rada. Primjer je preuzet iz Maurerova rada [92], prikazano je devet elemenata pomoću matrice i grafa, obje slike pokazuju isto - iz matrice je vidljivo da postoji 72 mogućnosti veza, dok je to teško vidljivo iz lijeve slike. Osim toga, popunjavanje veza, promatrajući lijevu sliku, bilo bi znatno otežano, dok se u matrici sistematično popunjava red po red, svaki element u retku sadrži osam veza od drugih elemenata i tu se prilikom popunjavanja odgovara na pitanje; „Koji element utječe na promatrani element!“. Osim toga, moguća je i varijanta popunjavanja veza po kolonama, gdje bi se prilikom popunjavanja odgovaralo na pitanje; „Na što utječe promatrani element?“. Bitno je napomenuti da na kompliciranijim primjerima, poput kasnije pokazanog u ovom radu, nije dovoljno prilikom stavljanja veze reći DA, utječe i staviti vezu, potrebno je svaku vezu i prirodu veze dobro prodiskutirati s ekspertima i s njima se usuglasiti da je to tako.



**Slika 3.6.** Definiranje konstrukcijskih relacija pomoću intervjua

To je jednostavno na malim primjerima, poput ovog prethodnog, gdje postoje 72 mogućnosti stavljanja veza, no za parametre generatora potrebna je znatno veća matrica, s minimalno 200 elemenata. To rezultira s 39.800 mogućnosti, stoga je zahtjevno definirati podatke za svaki redak koji predstavlja potencijalne utjecaje svih parametara koji se razmatraju na promatrani parametar. Temeljem ovog primjera, možemo zaključiti da generiranje relacija pomoću grafa (na lijevom dijelu slike 3.6.) postaje beskorisno za praktičnu primjenu, jer se od broja elemenata i „šume“ veza ne bi ništa korisno vidjelo.

Prilikom određivanja veza, predviđeno je da se za svaku odluku o vezi iskoristi 20-ak sekundi, [92] što znači da bi okvirno vrijeme popunjavanja matrice s 9 elemenata značilo okvirno vrijeme od 24 minute. No na matrici s 200 elemenata, okvirno vrijeme bi bilo 796.000 sekundi ili 9,2 dana, ova vremena ne uzimaju u obzir iteracijske korake niti stanke.

Dodatno, ponavljanjem intervjua, koje je neophodno iz već ranije iznesenih razloga i zbog verifikacije matrice, dolazi do razilaženja u mišljenjima eksperata. Redukcija problema, odnosno smanjivanje matrice kako bi se postigla suglasnost na manjem broju razmatranih elemenata nije rješenje, jer ne omogućuje potrebnu razinu razmatranja. Ako se, naprimjer, kompleksni sustav prikaže s matricom od par elemenata, ta matrica će biti popunjena s među-vezama, što ne znači da to neće biti točno, no ne daje uvid u problematiku.

Korisna početna točka kod određivanja broja elemenata, može biti katalog proizvoda ili mjerna skica, dok se dalje problematika razrađuje intervjui i *brainstormingom* [92]. Preporučeno je određivati vrijednosti matrice red po red ili kolonu po kolonu sekvencijalno. Moguće je dodavanje jačine veze, čime se može bolje opisati sustav, zato što su neke veze u stvarnosti možda nepotrebne ili manje utjecajne na sustav, no u sustavu gdje bilježimo ima li veze ili ne, sve veze imaju isti utjecaj. Takve, manje utjecajne mogu dati krivu sliku o sustavu, u slučaju da ne postoji podjela jačine veze. Podjela jačine veze upotrebljava se samo na specifičnim slučajevima i pri tome je potrebno broj jačina veze držati minimalnim, poput: niska, srednja, jaka.

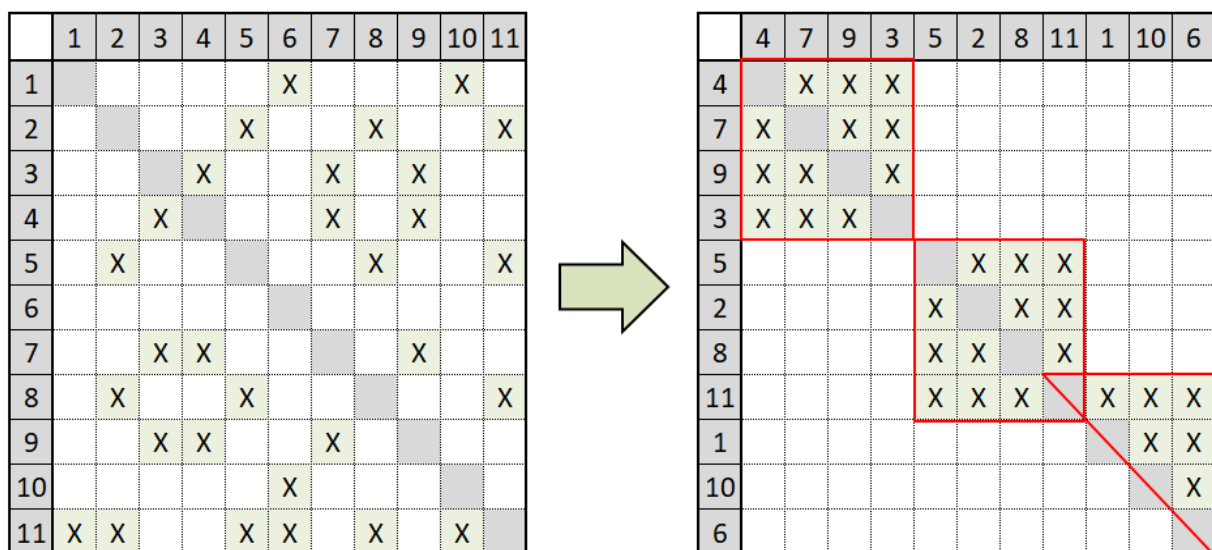
Još je vrijedno spomenuti da se za prikupljanje podataka primjenjuju programi (Excel ili neki specijalizirani program) ili u papirnatom obliku. Poželjno je upotrebljavati programske aplikacije, jer se mogu dodati objašnjenja zašto neku vezu staviti ili ne, s obzirom na to da se u puno slučajeva događa da više stručnjaka nema isto mišljenje o istoj stvari.

### 3.3. Modeliranje

Nakon što se u matrici identificiraju sve veze, postavljaju se ciljevi i zahtjevi. Iza modeliranja ostaje analiza i optimiranje, o kojima se govori kasnije.

#### 3.3.1. Modeliranje strukture

Već i kod sustava s nekoliko elemenata, korisniku je teško shvatiti strukturu sustava, to se najbolje može vidjeti ako se pogleda slika 3.7. Prikazana matrica sadrži jedanaest elemenata te ako se pogleda lijeva slika, može se zaključiti da je gotovo nemoguće vidjeti stvarnu strukturu tog sustava, jedino je vidljivo da su veze gotovo simetrične u odnosu na dijagonalu. Ako pogledamo desnu sliku, koja sadrži iste veze - ali je presložena, vidimo da se struktura sastoji od dva kompletna klastera u kojima su elementi međusobno povezani. Ovaj primjer pokazuje da se samo s prikladnim preslagivanjem matrice može dobiti pravi uvid u pozadinsku strukturnu karakteristiku sustava [92]. Za preslagivanje postoje brojni algoritmi [22], a postoji i mogućnost ručnog preslagivanja matrice, koje povećavanjem broja elemenata postaje preteško i dugotrajno.

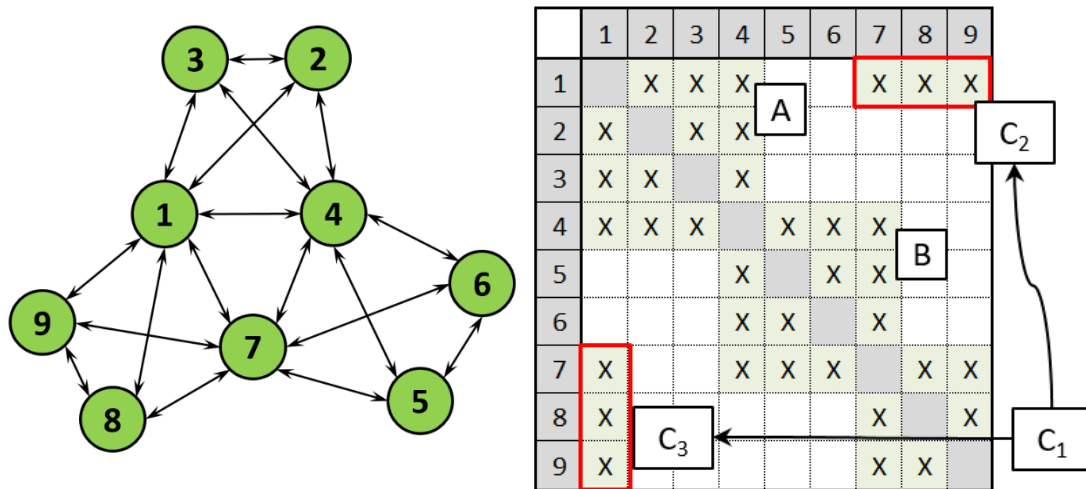


Slika 3.7. Pregled sustava

#### 3.3.2. Prepoznavanje specifičnih značajki strukture

Primjer u nastavku vizualno prikazuje granice matricnog prikaza. Prikazani sustav sastoji se od devet elemenata s tri klastera, dva su klastera označena s A i B te je treći označen s C<sub>1</sub>. U

matrici, osim tih klastera, postoje veze klastera C1 s C2 i C3. Ako se isto prikaže grafom, na donjoj lijevoj slici jasno se vidi da su to tri međusobno povezana klastera s četiri elementa (prvi klaster bi bio 1, 2, 3, 4; drugi 1, 7, 8, 9; a treći 4, 5, 6, 7). To govori da se treći klaster C podijelio na tri dijela, stoga je jasno da ovakav tip veza prelazi mogućnosti matičnog prikaza. Ovu su problematiku prvi pokazali Sherman & Yassine [108]. To pokazuje da postoje strukture s više povezanih elemenata, koje možda zahtijevaju druge načine prikaza.

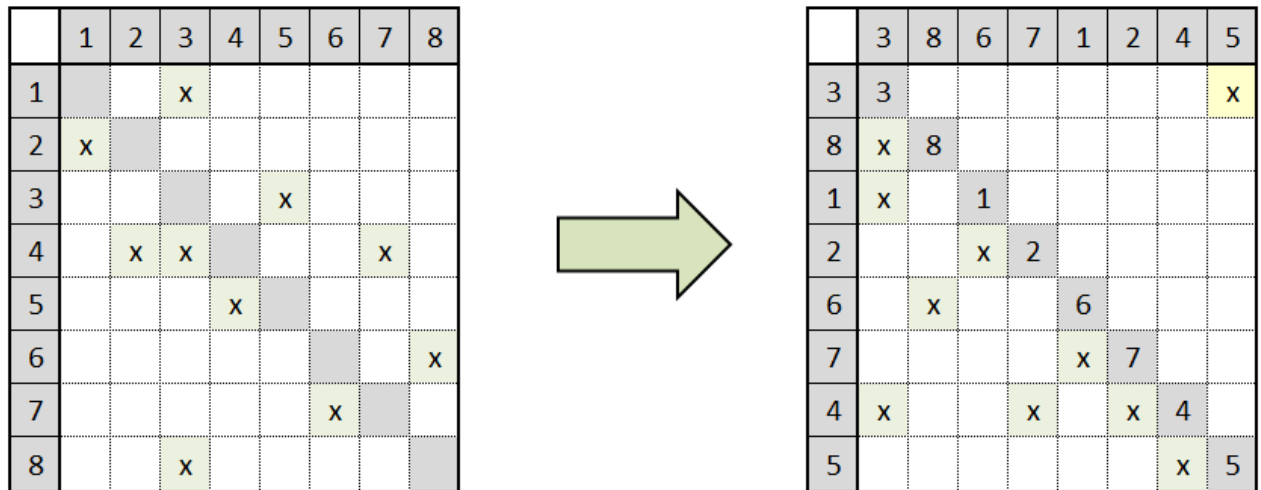


Slika 3.8. Limiti strukturalnog prikaza u matičnom obliku

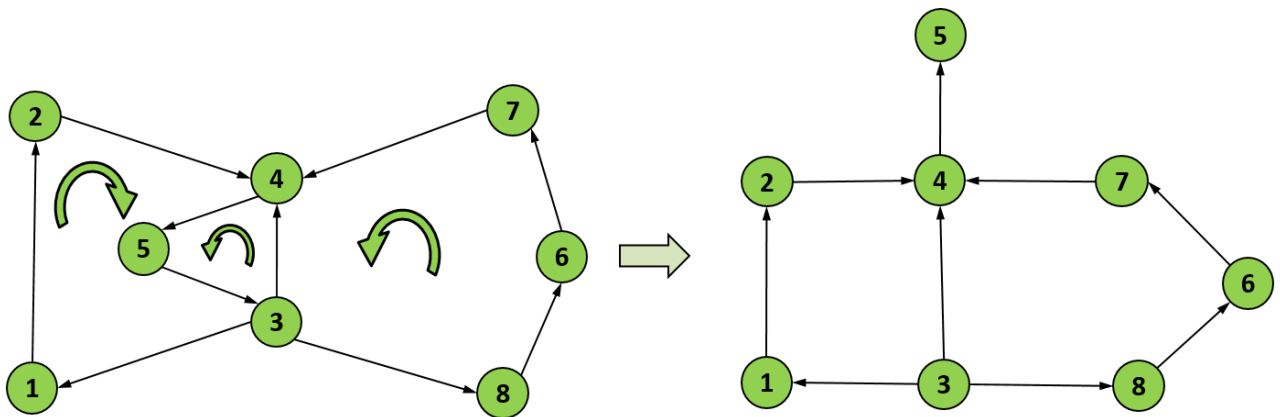
Recimo da struktura na slici 3.9. predstavlja tijek komunikacije između ljudi u procesu razvoja proizvoda. Znači postoji 8 ljudi, dok su veze tok dokumenata između njih. Primjena ovog primjera je prvenstveno za menadžment, koji promatra stagniranje u procesu razvoja proizvoda, zato što neki čekaju dokumente od drugih. Analizom strukture, može se vidjeti ima li prostora za moguće poboljšanje strukture. Nakon particioniranja matrice, na desnoj strani slike 3.9., dobije se samo jedna veza izvan dijagonale, koja pokazuje da postoji povratna petlja. Tek nakon što svi sudionici odrade svoje zadatke, te kada se dođe do zadnjeg čovjeka (broj 5), onda je potrebno vratiti se na početak (na čovjeka 3) i sve napraviti ponovno. Ova petlja iz tog razloga može pokazivati na uzrok stagniranja. No puna se slika tek dobije kada se isto prikaže u obliku grafa. Na grafu sa slike 3.10. vidi se da postoje tri povratne petlje u strukturi i da se sve preklapaju u dvije ovisnosti (čovjek 4, 5 i čovjek 5, 3). Micanjem jedne veze, u tim trima petljama može se napraviti prikladna optimizacija (analizom cijepanja povratnih veza). Ista stvar može se zaključiti i ako se gleda particionirana matrica ili ako se prekine veza između ljudi 5 i 3. To se u praksi može napraviti stavljanjem tih ljudi u isti ured, te da oni komuniciraju u kratkim iteracijskim koracima, kako bi bila zagarantirana njihova informacijska sinkronizacija. U optimiranoj strukturi bi osoba broj 3



predstavljala osobu koja inicira proces razvoja proizvoda, obzirom na to da od nje sve kreće; dok bi osoba 4 prikupljala sve informacije i slala ih osobi 5. Nedostatak matrice bi ovdje bio taj što se kod matrice ne bi vidjela alternativa optimizacije micanja veze između ljudi 4 i 5, što je iz grafa dobro vidljivo.



Slika 3.9. Partitioniranje matrice

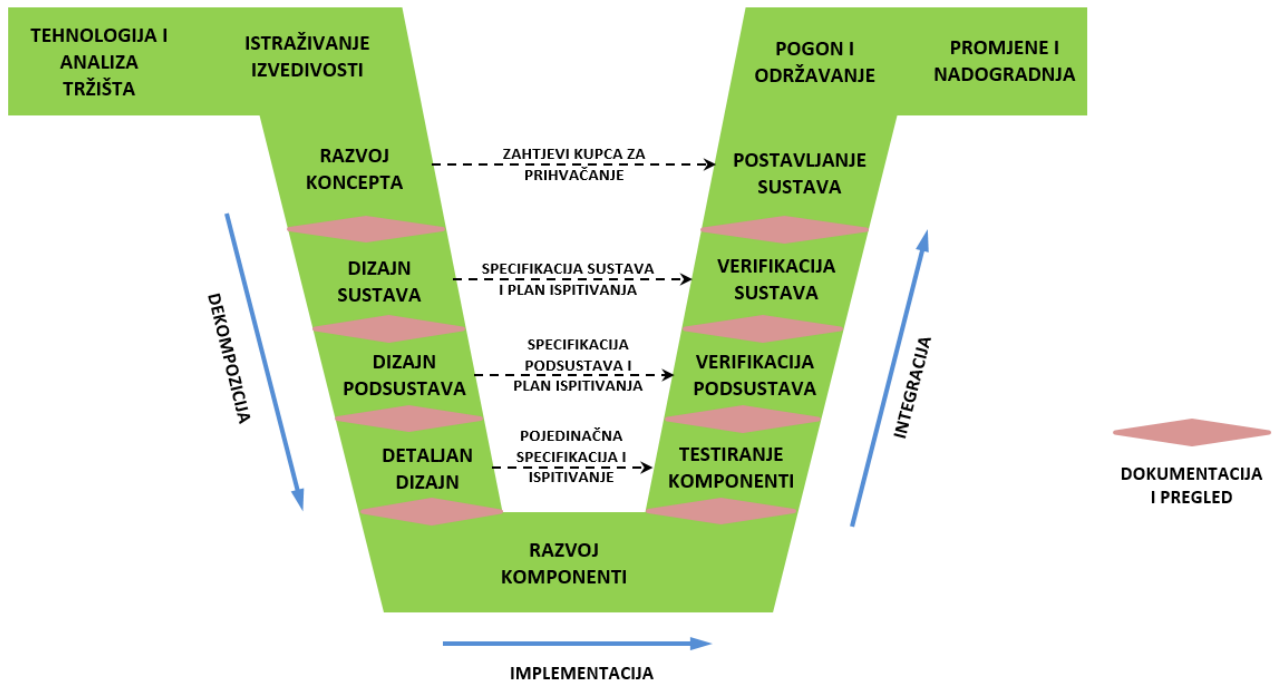


Slika 3.10. Pregled sustava preko grafa i moguća optimizacija micanjem jedne veze

### 3.4. DSM arhitekture proizvoda *Product Architecture DSM*

Kod analize arhitekture proizvoda, najbitnije je rastaviti sustav ili proizvod u manje elemente poput podsustava, modula i komponenata. Da bi sustav funkcionirao u cjelini, svaka komponenta mora izvršavati svoju funkciju i sve komponente moraju raditi zajedno. Tradicionalno se upotrebljava pristup pomoću V dijagrama, pokazan na slici 3.11. Ovaj dijagram vizualno pokazuje razvoj kompleksnog sustava, počinje se analizom tržišta i istraživanjem izvedivosti.

Razvija se koncept koji se, kako bi se sve definiralo, dalje definira i rastavlja do najmanje komponente. Nakon što se sve definiraju, prelazi se na testiranje komponenti, kao i podsustava, sustava i uzlaznom se putanjom slova V dolazi do gotovog proizvoda, koji se dalje pušta u pogon, održava te kasnije po potrebi nadograđuje.



Slika 3.11. V dijagram prema [25]

Razvoj arhitekture proizvoda obuhvaća slijedeće aktivnosti [25]:

1. rastavljanje sustava na podsustave i komponente
2. pridavanje funkcije tim komponentama i podsustavima
3. definiranje interakcija između podsustava i komponenata.

Analiza proizvoda pomoću DSM-a motivirana je dvama primarnim ciljevima. Jedan je dizajn poboljšane arhitekture koja se nalazi na silaznoj putanji slova V, dok je drugi poboljšana implementacija arhitekture koja se nalazi na uzlaznoj putanji slova V. Prednosti poboljšane arhitekture mogu sadržavati rastavljanje i segmentiranje razvojnog procesa proizvoda i organizacijske strukture. Postoji veliki broj radova i istraživanja na području analize arhitekture proizvoda pomoću DSM-a.

Prvi primjer korištenja kvadratne matrice, zvan  $N^2$ , koji sadrži veze između komponenata je - prema dostupnim podacima - krenuo od Lanova izvješća 1977., a kasnije je objavljena i knjiga [109]. Prema Eppingerovim i Browningovim saznanjima, kvadratna N matrica upotrebljavana je

u SAD-u 1950-ih i 1960-ih. Korištenje kvadratnih matrica za modeliranje veza sustava se nakon toga nastavlja u inženjerskoj zajednici. 1988. *House of Quality, Hauser i Clausing* [110] pokazali su neke prednosti korištenja kvadratne matrice na njihovom krovu, koji se sastojao od trokutnih polovica kvadratne matrice. 1994. godine, na MIT-u su istraživači objavili DSM model arhitekture proizvoda kao mrežu elemenata i njihovih veza, što ujedno i predstavlja arhitekturu proizvoda [111]. To isto istraživanje otkrilo je različite tipove interakcija između elemenata, poput prostorne udaljenosti, tijeka materijala, tijeka informacija ili prijenosa energije. Korištenje DSM-a u arhitekturi proizvoda je mnogim istraživačima i inženjerima pomoglo u boljem razumijevanju mreža i interakcija u kompleksnim sustavima, te se mogu izdvojiti dvije primarne prednosti:

- ***Prednosti za arhitekturu:*** pomaže u razumijevanju veza između modula i podsustava, konstruiranju modularnosti, planiranju modula i podsustava, poklapanju tehničke i organizacijske arhitekture.
- ***Prednosti za integraciju:*** pomažu u identificiranju problematičnih interakcija, razinama podsustava, modulima, planiranju potrebnih integracija.

Osnovna procedura izrade DSM-a arhitekture proizvoda analogna je generičkom postupku [25] opisanom u poglavlju 3.1:

#### ***1) Rastavljanje***

- Rastavljanje proizvoda ili sustava na podsustave te komponente. Izrada kvadratne matrice s komponentama, dodavanje naziva komponenata na kolone i retke i, po mogućnosti, grupiranje u podsustave ili module.
- Kreiranje kvadratne DSM matrice s nazivima zadataka.

#### ***2) Identificiranje***

- Identificiranje i zapisivanje relacija između komponenata u matrici (pomoću nekog alata PLM-a, ankete ili intervjua)

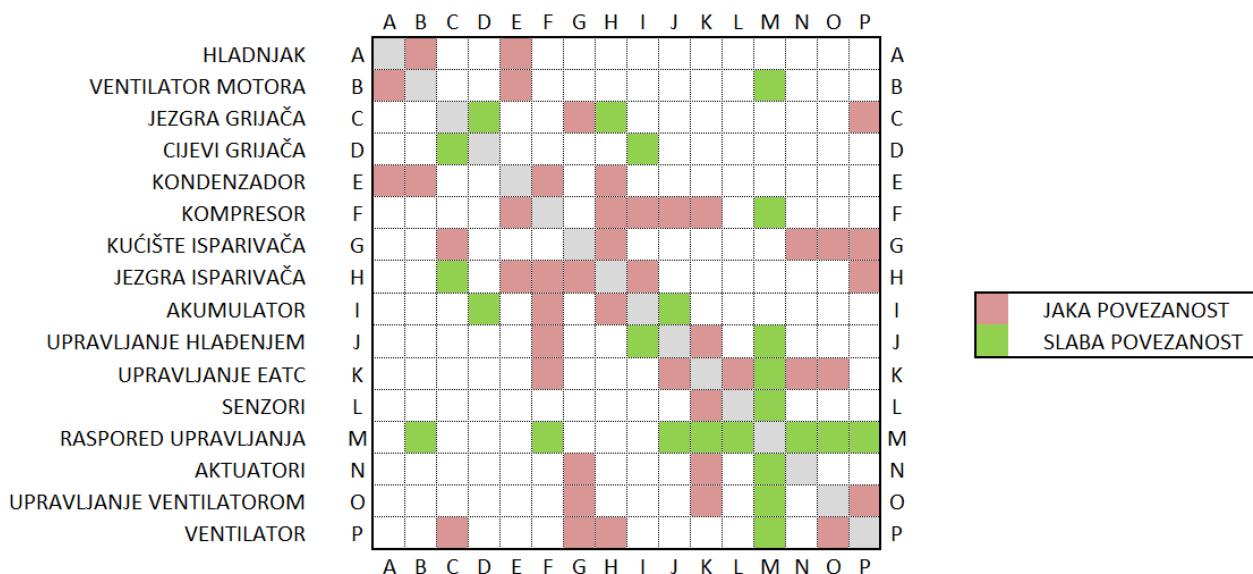
#### ***3) Analiza*** prema [45]

- Particioniranje: proces manipuliranja redcima i kolonama s ciljem smanjenja ili eliminiranja povratnih petlji (donje trokutasti oblik) i s ciljem da povratne petlje budu što bliže dijagonali.
- Klasteriranje: traženje elemenata koji su međusobno povezani tako da čine module ili klastere. Ovo je oblik analize particioniranja koji grupira komponente prema nekom cilju, koji obično sadrži broj i jačinu interakcija.

#### ***4) Prikaz rezultata***

- Kreiranje vizualnog prikaza matrice s važnim i interesantnim obojanim mjestima

U nastavku je pokazan primjer DSM-a kontrole klime u autu [25]. Sustav je opisan s kvadratnom matricom od 16 x 16, sa 16 elemenata. Veze korištene u matrici rangirane su u dvije veličine, jake i slabe. Time se može opisati razina, čvrstoća ili stupanj interakcije između komponenata.



Slika 3.12. Kontrola klime u autu preuzeto iz [25]

Smjernice koje je dobro imati na umu prilikom izrade DSM matrice arhitekture proizvoda, prema [25], slijede u nastavku:

1. **Granice** – limiti sustava. Bitno je odabrati granice na način da se uključe sve bitne komponente i veze koje se žele pokazati u DSM modelu. Uključivanje ili isključivanje određenih komponenti može model napraviti korisnijim. Za primjer uzmite model kontrole klime u autu, koji u DSM matricu ne uzima motor vozila.
2. **Simetrija** – u arhitekturi proizvoda većina je veza simetrična. Kao primjer može se navesti sljedeće, ako komponenta A dodiruje komponentu B, onda i komponenta B dodiruje komponentu A. Mogu postojati i nesimetrične veze, primjer takve veze bio bi da komponenta A stvara buku koja utječe na komponentu B, ali komponenta B ne utječe na komponentu A.
3. **Tip veza** – postoje različiti tipovi veza, neke veze su dobro poznate, poput tijeka materijala kroz podsustave, no postoje i veze koje nisu u potpunosti poznate ili shvaćene, skrivene, ili se pojavljuju pod određenim stanjima; poput vibracija, prijenosa

topline, električnih polja itd. Različiti tipovi veza mogu se prikazati u istom polju - s više boja, oznaka - ili brojevima.

4. **Jačina veze** – stupanj interakcije među komponentama. Može se pokazati na više načina, numeričkim DSM-om s brojevima, većim ili manjim crnim točkama, ili bojama.
5. **Identifikacija veza** – Veze se mogu identificirati iz dokumentacije proizvoda, intervjua i slično. Većina modela DSM-a zahtijeva diskusiju o vezama s ekspertima, da bi se dodale i veze koje u dokumentaciji nisu vidljive. Također je dobro s ekspertima napraviti provjeru modela.
6. **Granularnost** – potrebno je napraviti kompromis između bogatijeg modela s puno više elemenata, rastavljanjem u manje komponente i jednostavnosti modeliranja koju je jednostavno interpretirati. Preporuka je krenuti s malo komponenta, od 20 do 50 i po potrebi dodavati komponente tamo gdje se čini da su potrebne. Cijelo je vrijeme važno imati na umu svrhu modela i dostupne resurse.

Najčešća metoda analize arhitekture proizvoda je klasteriranje. To je oblik particioniranja (preslagivanja redaka i kolona) na način da se ispunjavaju ciljevi koji obično sadržavaju broj i intenzitet veze. Metoda klasteriranja ima dva međusobno konfliktna cilja, prvi je minimizirati broj klastera, a drugi je minimizirati broj i snagu interakcija van klastera. Klaster ili modul je skup grupiranih komponenta određenih veza, predložen analizom zvanom klasteriranje. Cilj je odabrati klaster na način da budu što samostaljniji, međutim, često u kompleksnim sustavima imamo oboje - klaster i povezane podsustave [112]. Ciljna funkcija koja se minimizira sadrži veličinu klastera ( $C_i$ ) i broj interakcija van klastera ( $I_o$ ), prema sljedećoj jednadžbi [25]:

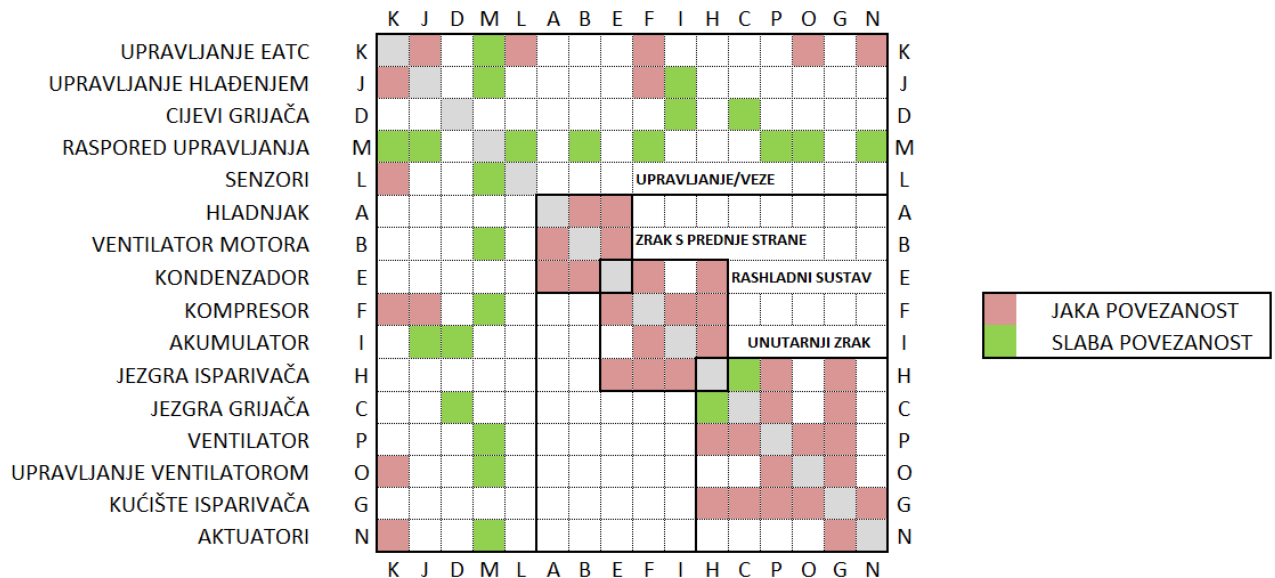
$$Obj = \alpha \sum_{i=1}^M C_i^2 + \beta I_o \quad 1$$

gdje su:  $\alpha = 10$ ,  $\beta = 100$

Slika u nastavku predstavlja particioniranu matricu pokazanu na slici 3.12. Analiza pokazuje da postoje tri grupe komponenta s puno jakih veza, da postoji veza među klasterima. Klasteri, podsustavi ili moduli, nazvani su „zrak s prednje strane“, „rashladni sustav“ i „unutarnji zrak“. Veza između klastera je jedna komponenta, ona ih međusobno povezuje - drugim riječima, ti klasteri su spojeni. Veza između klastera „zrak s prednje strane“ i klastera „rashladni sustav“ je

kondenzator (E), dok je veza između klastera „rashladni sustav“ i klastera „unutarnji zrak“ jezgra isparivača (H).

Analiza također otkriva da je pet elemenata jako integrirano među komponentama sustava, te formiraju modul koji je nazvan „upravljanje/veze“.



**Slika 3.13.** Partitionirana DSM matrica kontrole klime u auu prema [25]

Više o klasteriranju nalazi se u dodatku ovog rada.

DSM arhitekture proizvoda je primijenjen na veliki raspon industrijskih problema, te je dao mnogo korisnih uvida. Neki od njih, prema [25], su:

- poboljšanje modularnosti
- korištenje arhitekture proizvoda za razvojni proces proizvoda ili organizacije
- razumijevanje arhitekture proizvoda [113]
- menadžment povezanosti
- menadžment proizvodnog asortimana
- moguće za korištenje u svrhu osiguranja itd.

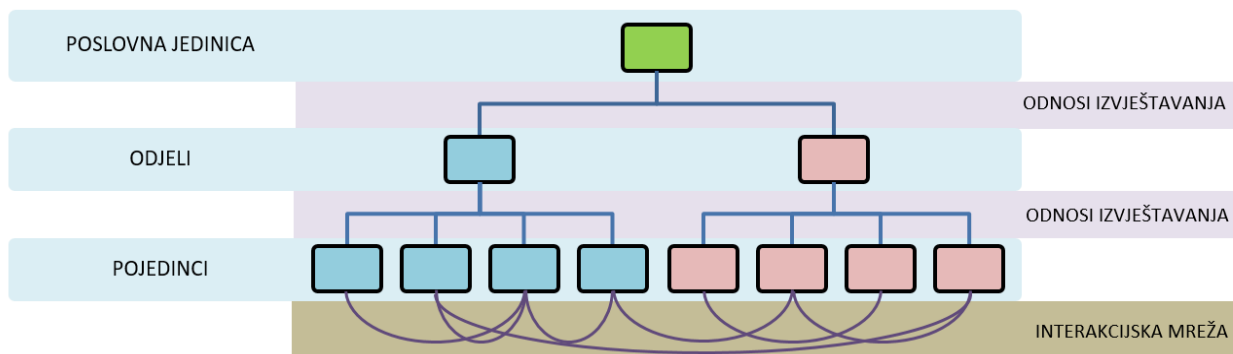
Vrijednost arhitekture proizvoda veća je što je sustav složeniji, a to je zbog toga što je kod sve složenijih sustava, sve teže intuitivno predvidjeti ponašanje modela.

### 3.5. DSM organizacijske arhitekture *Organization Architecture DSM*

U ovom poglavlju je pokazano kako je moguće primijeniti DSM za prikaz i analizu organizacije. Organizacija podrazumijeva grupu ljudi s određenom svrhom poput prodaje, nabave, proizvodnje, montaže, razvoja itd. Kod organizacijske arhitekture, ljudi se općenito grupiraju u timove, odjele ili drugačije organizacijske jedinice. Tijek informacija je u ovom slučaju razgovor dvoje ljudi, slanje e-pošte, sastanci, prezentacije itd. Organizacijska neusklađenost u stvarnim projektima može stvoriti puno problema, na primjer jedan konstruktor može prekasno dobiti informaciju da je nešto u dizajnu krivo, pa ukoliko informacija o grešci do njega dođe kasno (kada je proizvod već u odmakloj fazi), utoliko može lako doći do kašnjenja isporuke proizvoda. Osim toga, može se dogoditi da tim ima praznine ili preklapanja (redundantni posao). Iz navedenih primjera jasno je da je neophodno shvatiti tijek informacija u organizaciji i prilagoditi strukturu da bi se isti poboljšao.

Učinkovit razvoj proizvoda i sustava, zahtijeva da menadžeri omoguće nesmetani tijek informacija između ljudi u organizacijskoj jedinici. S jedne strane, informacija mora doći do pravih ljudi u pravo vrijeme. Menadžeri žele omogućiti bolju komunikaciju, slobodan tijek informacija (a time i razmjenu ideja, poslovnih informacija i problema). S druge strane, to može otići predaleko, na način da svatko svakome šalje e-poštu, a to može biti problematično i dovesti do fenomena zvanog „preopterećenje informacijama“ [25]. Neke osobe dnevno primaju i do stotine *e-mailova* i nemoguće je baviti se sa svima. Puno ljudi, kada pošalju *e-mail*, smatraju da je isti pročitao i shvaćen. To je vjerojatno i gore nego uopće ne slati informaciju, dok se ne osigura uspješni kontakt. Sastanci služe organizacijskoj komunikaciji, međutim, neki ljudi se nađu u situaciji da provedu previše vremena na sastancima, pa im ne ostane vremena za posao. Sve to pokazuje da nereguliran tijek informacija također nije odgovor.

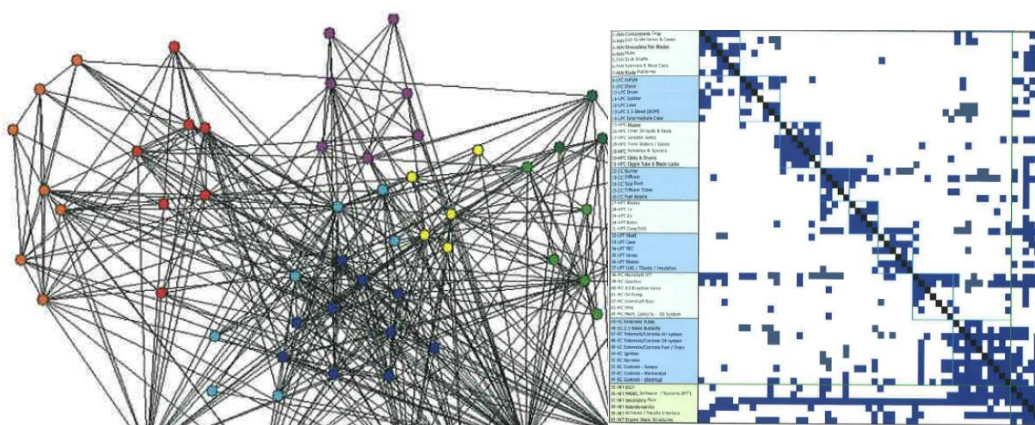
Upravljanje tijekom informacija u velikim organizacijama i kompleksnim projektima, jedan je od čestih razloga zašto menadžeri traže svrsishodnog arhitekta organizacije. Slično kao što DSM arhitekture proizvoda služi za organizaciju komponenti u module, tako organizacijski DSM služi za grupiranje zaposlenika u svrsishodne timove. Arhitektura u organizaciji sadrži tri razine, pokazane na sljedećoj slici. Prva razina je podjela organizacije u elemente poput odjela, timova i osoba; druga razina je podjela poslova i izvještavanje odozgo prema dolje, a zadnja su poprečni odnosi unutar organizacije, koji se zovu mreža interakcija.



**Slika 3.14.** Razmjena informacija u organizacijskoj arhitekturi prema [25]

Prve dvije razine se često predstavljaju organizacijskim rastavljanjem strukture (OBS – *organization breakdown structure*), a nazivaju se i organizacijski grafikoni. DSM se primjenjuje za treću razinu. Neke organizacije smatraju da je organizacija rastavljena na osobe s ulogama, no DSM može biti vrlo važan, dajući dodatan uvid u strukturu koja iz organizacijskih grafikona nije vidljiva. Organizacijski dizajn poboljšava strukture timova.

DSM u organizaciji pokazuje strukturu organizacijske jedinice, veze u ovom DSM-u predstavljaju kontakt osobu i izmjenu informacija. Izmjena informacija može biti putem različitih dostupnih komunikacijskih kanala, poput fizičkog kontakta, e-pošte, poziva preko mobitela, telefona, SMS poruka ili telegrama. Komunikacijski putevi se označavaju markacijama ili brojčano, na ćelijama van dijagonale. U nastavku je jedna slika komunikacijske mreže prikazane s dijagramom čvornih veza.



**Slika 3.15.** Komunikacijska mreža s prikazom matrice, prema [25]

Dijagram čvornih veza uobičajen je u analizi sustava, uključujući i socijalne mreže. Na gornjoj slici lijevo, prikazana je jedna komunikacijska mreža, dok je na desnoj strani pokazana ta ista



komunikacijska mreža, ali preko DSM modela. Vidljivo je da je prikaz tog sustava znatno pregledniji preko DSM-a i znatno poboljšava shvaćanje organizacijske jedinice. Allen i George [114] koristili su se kvadratnim matricama za prikaz organizacijske komunikacije. No prema saznanju iz [25], te iste matrice nisu korištene za specijalizirane analize. McCord i Eppinger [115] upotrebljavali su DSM za prikaz organizacijske arhitekture, te su bilježili interakcije između timova za General Motors.

### 3.6. DSM arhitekture procesa *Process Architecture DSM*

Proces je skup aktivnosti i interakcija koje se odvijaju tijekom projekta [25]. U ovom poglavlju ćemo pokazati mogućnost primjene DSM-a za prikaz i analizu strukture procesa, uključujući aktivnosti i interakcije u procesu. Za prikaz procesa upotrebljavaju se brojne i raznolike metode za planiranje i praćenje odvijanja procesa. Najčešći su dijagrami toka, koji prikazuju redoslijed odvijanja aktivnosti pomoću strelice, te Gantogrami [116], koji obuhvaćaju i vremensku dimenziju. DSM se također primjenjuje za modeliranje procesa i u odnosu na druge metode, DSM daje pregledniji i bolji uvid u arhitekture procesa i vodi do poboljšanja procesa. Što je proces kompleksniji, te ako još sadrži i iteracije, to je veća korist od DSM-a. Ovaj tip DSM-a se u literaturi pojavljuje pod različitim nazivima, kao što su npr.: *process architecture DSM*, *process DSM*, *process flow DSM*, *activity-based DSM* ili *task-based DSM*. DSM i u ovom slučaju sačinjava mrežu aktivnosti unutar procesa i interakcije.

Dva su tipa DSM-a arhitekture procesa. Prvi je DSM parametara, u kojem je mreža parametara modelirana kao skup aktivnosti, od kojih svaka aktivnost određuje jedan ili više parametara. Drugi tip je DSM softverskog procesa, u kojem se modelira tijek softverskog procesa, da bi se optimizirala sekvenca izvođenja koda. DSM arhitekture procesa krenuo je s Donom Stewardom 1960-ih, kada je Steward upotrebljavao matričnu tehniku za rješavanje sustava jednadžbi. Cilj je bio dobiti redoslijed rješavanja jednadžbi, a da se minimizira potreba za iteracijama. Kasnije su se za sekvence aktivnosti drugi koristili prednostima kvadratne matrice (zване *precedence matrix*), te 1973. Warfield - za minimiziranje ciklusa u matričnim prikazima sustava. Tek 1990-ih je naglo porastao broj radova na toj tematici, radovi su većinom s MIT-a. Modeliranje procesa je dobro utemeljeno područje, u kojem je poznato dosta metoda za modeliranje i vizualizaciju [96,117].

Procesi i aktivnosti obično su ovisni o promatraču. Ovo se pojavljuje zato što su procesi dio sustava, svaki sustav je dio većeg sustava, a svaka komponenta sustava može se rastaviti na manje komponente. Stoga je korištenje termina „proces“ ili „aktivnost“ relativnog značenja. Osim toga,

dio rada u procesu su informacije koje se prenose. Radi toga je potreban dodatan rad - da se uhvati i taj tip interakcija.

DSM se uglavnom upotrebljava za interakcije između aktivnosti. Interakcije među aktivnostima su vrlo važne u procesu, te o njima ovisi rješenje za taj proces. Isti skup aktivnosti može, a i ne mora, osigurati rješenje ovisno o ulazima i međusobnim interakcijama. Loši ili krivi ulazni podaci vode do loših izlaza [118,119]. Većina kvadratnih matrica samo prikazuje prisutnost interakcija, DSM označava važna ponavljanja interakcija i njihov utjecaj na ponašanje procesa. Druge metode prikaza procesa ne ukazuju na takva svojstva interakcija, ako razmotrimo Ganntov dijagram, koji ne pokazuje eksplicitno tijek informacija. Slika 3.16. vizualno prikazuje kako se DSM rabi za prikaz interakcija između aktivnosti.

Kao što je pokazano na slici 3.3., sekvencijalno povezane aktivnosti, nakon izvođenja jedne aktivnosti, omogućuju izvođenje aktivnosti iza njih. Neke se sekvencijalne aktivnosti mogu djelomično preklapati.

Paralelne aktivnosti nemaju međusobnih veza i mogu se izvoditi istovremeno. Iako paralelne aktivnosti nemaju direktnih veza, možda postoji ovisnost o nekom resursu. Međuovisne aktivnosti (spregnute) - kako i sama riječ kaže - trebaju ulazne podatke od druge aktivnosti. Međuovisni (spregnuti) tip aktivnosti može se često naći u konstrukciji. Postoji i uvjetovani tip aktivnosti, koje ovise o odluci donesenoj u aktivnosti ispred. Nije uobičajeno u DSM-u pokazivati uvjetovane aktivnosti, no ako se prikazuju, obično se to čini nekim drugim oznakama, poput dijamanta (slično kao i kod dijagrama tijeka, gdje to predstavlja točku odluke).

Najčešći procesi za modeliranje i analizu su PERT-ov dijagram (*Project Evaluation and Review Technique*), CPM (*Critical Path Method*) i Ganntov dijagram. Sve ove metode ne pokazuju dovoljno dobro iteracije, niti pokazuju međuovisne grupe aktivnosti. PERT i CPM metode mogu pokazati iteracije, ali one nisu dozvoljene, jer u tom slučaju metoda ne može izračunati kritični put. Glavna prednost DSM-a je traženje i označavanje iteracija (tj. petlji) koje su problematične u procesima [15]. Eppinger navodi da je u stotinama procesnih DSM-a nađena iteracija [25]. Iteracija uključuje ponavljanje aktivnosti, a prikazuju se povratnim petljama ili ciklusima u procesu. Iteracije utječu na cijenu projekta i na premašivanje zadanog vremena. Više je autora objasnilo konstruiranje kao iterativni proces i istražili su izvore iteracija [31,32,120]. Lévárđy i Browning [121] su dali uzroke iteracija u kontekstu tijeka informacija:

- Inherentno spojene aktivnosti – ne mogu biti izvedene bez pretpostavke ili izmjene informacije na iterativni način.
- Loša sekvenca aktivnosti – informacija često dođe prekasno i time tjera druge aktivnosti da čekaju ili rade pretpostavke.

- Nekompletne aktivnosti - informacija koju kasnije aktivnosti trebaju, nije u potpunosti dostupna, bez obzira na to jesu li ranije aktivnosti započele.
- Loša komunikacija – informacija se nije prenijela pravodobno, ispravno.
- Pogreške – loša informacija, koja se kasnije otkrije i uzrokuje ponovni rad dijela procesa.
- Promjene ulaznih podataka – u slučaju promjene ulaznih podataka, dolazi do ponovnog rada direktno zahvaćenih aktivnosti, a često i drugih aktivnosti koje slijede.

Neki od navedenih uzroka iteracija mogu se izbjeći pažljivom analizom procesa i analizom rizika. Drugi tipovi iteracija, oni koji se ne mogu izbjeći, su osnovni u procesu i moraju biti planirani i upravljani drugačije, osim toga, dakako da postoje i iteracije koje je potrebno poticati da prije konvergiraju.

Sve ovo vodi do zaključka da iteracije pokazuju da je arhitektura procesa izrazito važna. Činjenica da se superiornom arhitekturom mogu osigurati prednosti, motivirala je istraživače u više područja, uključujući i DSM. Neke od prednosti su:

- minimiziranje iteracija i neplaniranog rada
- smanjenje cijene i trajanja
- smanjenje rizika
- vizualizacija
- razumijevanje.

Kod izrade DSM-a arhitekture procesa, procedura je slična kao i za druge slučajeve, samo se u ovom slučaju radi o dijeljenju procesa na aktivnosti, slijedi davanje imena redcima i kolonama. Sve aktivnosti je poželjno posložiti u uobičajenoj sekvenci ako je ona poznata, te grupirati ako je to moguće. Nakon toga se određuju poznate veze između aktivnosti.

U nastavku je primjer DSM-a, napravljen za Boeing. DSM predstavlja arhitekturu procesa za borbeno voziloUCAV. Prva aktivnost postavlja zahtjeve i ciljeve dizajna (DR&O), druga predlaže koncept koji bi zadovoljio tim zahtjevima. Treća aktivnost analizira i evaluira rezultate koncepta. Aktivnost 11 prikuplja sve rezultate i odlučuje ide li se u aktivnost 12 i nastavlja s preliminarnim dizajnom, ili se vraća na početak, tj. konceptni dizajn. Na slici 3.17. su rezultati nakon particioniranja matrice.

|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| PRIPREMA UCAV KONCEPTA DR&O                                |   | X |   |   |   |   |   |   |   |    |    | X  |
| IZRADA KONCEPTA  | X |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | X  |
| PRIPREMA CRTEŽA & GEOMETRIJE                               | X | X |   |   |   |   |   | X |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE AERODINAMIČKE ANALIZE & OCJENJIVANJA             | X | X | X |   | X |   |   | X |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE PROPULZIJSKE ANALIZE & OCJENJIVANJA              | X | X | X |   |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE S&C ANALIZE KARAKTERISTIKA & OCJENJIVANJE        | X |   | X | X | X |   |   | X |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE MEHANIČKE & ELEKTRIČKE ANALIZE & OCJENJIVANJE    | X |   |   | X | X |   |   |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE ANALIZE TEŽINA & OCJENJIVANJE                    | X |   | X |   |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE ANALIZE PERFORMANSI & OCJENJIVANJE               | X |   |   | X | X |   |   | X |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE MULTIDISCIPLINARNE ANALIZE & OCJENJIVANJE        | X | X |   | X | X | X | X | X | X |    |    |    |
| IZRADA PROCJENE KONCEPTA I ODREĐIVANJE VARIJANTI           | X | X |   | X | X | X | X | X | X | X  |    |    |
| PRIPREMA & RASPODJELA IZBORA KONFIGURACIJE SETOVA PODATAKA | X | X |   |   |   |   |   | X |   |    | X  |    |

**Slika 3.16.** DSM procesa UCAV vozila prije partitioniranja

|  | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 7 | 8 | 6 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|
| PRIPREMA UCAV KONCEPTA DR&O                                |   | X |   |   |   |   |   |   |   |    |    | X  |
| IZRADA KONCEPTA  | X |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    | X  |
| PRIPREMA CRTEŽA & GEOMETRIJE                               | X | X |   |   |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE PROPULZIJSKE ANALIZE & OCJENJIVANJA              | X | X | X |   |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE AERODINAMIČKE ANALIZE & OCJENJIVANJA             | X | X | X | X |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE MEHANIČKE & ELEKTRIČKE ANALIZE & OCJENJIVANJE    | X |   |   | X | X |   |   |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE ANALIZE TEŽINA & OCJENJIVANJE                    | X |   | X |   |   |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE S&C ANALIZE KARAKTERISTIKA & OCJENJIVANJE        | X |   | X | X | X |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE ANALIZE PERFORMANSI & OCJENJIVANJE               | X |   |   | X | X |   | X |   |   |    |    |    |
| IZVOĐENJE MULTIDISCIPLINARNE ANALIZE & OCJENJIVANJE        | X | X |   | X | X | X | X | X | X |    |    |    |
| IZRADA PROCJENE KONCEPTA I ODREĐIVANJE VARIJANTI           | X | X |   | X | X | X | X | X | X | X  |    |    |
| PRIPREMA & RASPODJELA IZBORA KONFIGURACIJE SETOVA PODATAKA | X | X |   |   |   |   | X |   |   |    | X  |    |

**Slika 3.17.** DSM procesa UCAV vozila nakon partitioniranja

Eppinger [25] daje smjernice za izradu DSM modela:

1. Dobro organizirani procesi obično imaju utemeljenu sekvencu izvođenja, prikazanu s Ganttovim dijagramom ili dijagramom tijeka. To je prikladno za početak izrade DSM modela, no analizom je, pomoću DSM-a, jednostavnije optimizirati proces, ili ukazati na moguća poboljšanja.

2. Također, dobro organizirani procesi često imaju utemeljenu dekompoziciju aktivnosti, koja je dobra početna točka kod izrade modela. Ponekad zanemarive aktivnosti mogu imati velik utjecaj na proces, stoga ih je i bitno uključiti u model.
3. Preporučljivo je, kod izrade modela, prikazati proces kakav je trenutno, da bi se u kasnijoj fazi mogla napraviti usporedba s početnim stanjem.
4. Korisno je u modelu upotrebljavati jačinu interakcija brojevima (koristeći se numerički DSM-om).
5. Korištenje boja i simbola za bolje objašnjenje procesa.
6. Kod odabira broja parametra ili aktivnosti u matrici, uvijek je borba između jednostavnosti izrade i bogatijeg modela. Mnogi su modeli procesa rastavljeni u 30-70 aktivnosti.
7. Kod DSM-a procesa se vanjski ulazi/izlazi mogu pokazati dodatnim redcima ili kolonama i obično su smješteni van glavne matrice. Mnogi se DSM-i koriste u dodatne svrhe, poput određivanja vjerojatnosti, cijene, vremena, vjerojatnosti promjene, itd. (Browning 2009).

Pri analizi procesa se najčešće upotrebljava metoda sekvenciranja. To je oblik particioniranja koji promjenom redaka i kolona nastoji minimizirati iteracije. Postoji više algoritama, neki su primjenjivi i na binarnu matricu. Za razliku od statičkih DSM-a za proizvod ili organizaciju, kod procesnog DSM-a, aktivnosti počinju i završavaju u različito vrijeme. To znači da ako neka aktivnost počne prije nego li je dobila podatak od druge aktivnosti, da bi se mogla izvršiti koristi pretpostavke. Mogućnost početka neke aktivnosti bez svih podataka upotrebljavajući pretpostavke, velika je stvar u procesu. Kod nekih procesa, poput proizvodnog procesa, je znatno teže, ako ne i nemoguće nešto takvo izvesti, jer nije moguće napraviti neki sklop dok nisu sve komponente fizički prisutne. Cilj je presložiti aktivnosti da bi se minimizirala količina povratnih petlji u procesu. Ukoliko je nemoguće izbjeći sve povratne petlje, utoliko ih je poželjno približiti dijagonali, jer udaljenost od dijagonale definira koliki će biti utjecaj te petlje. Dugačke petlje - veze pri kraju matrice koje su udaljene od dijagonale - mogu biti problematične, jer tek nakon što se sve aktivnosti odrade, onda se vraća se na početak.

DSM arhitekture procesa primjenjiv je u brojnim industrijskim granama, a uglavnom se rabi za:

- vizualizaciju procesa i tijeka informacija
- poboljšanje procesa
- planiranje projekta

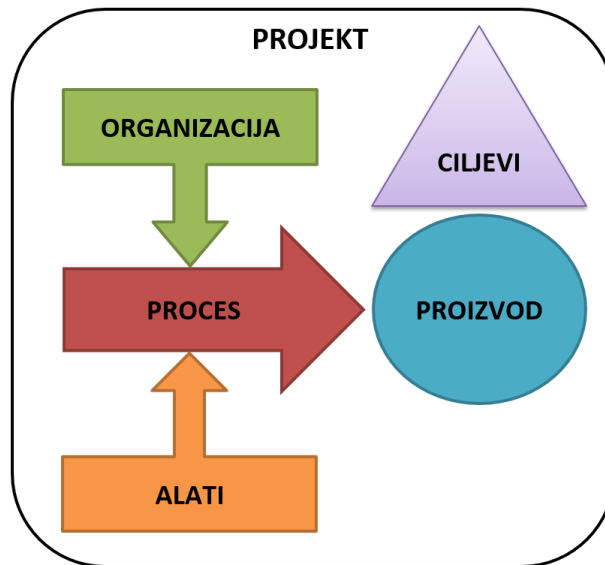
- označavanje iteracija i ponovnog rada
- analizu cijene, procjenu rizika
- otkrivanje potreba između funkcija ili interakcije među timovima
- organizirani posao i/ili grafički prikaz za bazu znanja.

Sve u svemu, DSM arhitekture procesa daje prikaz procesa sustava, njegovih aktivnosti i njihovih veza. Analiza se radi algoritmima za sekvenciranje, koji predlažu logički tijek procesa i ukazuju na međusobno povezane aktivnosti. Međusobno povezane aktivnosti izvode se iterativno i mogu se dodatno analizirati metodom cijepanja, koja predlaže koje pretpostavke je potrebno napraviti da bi se proces poboljšao.

### **3.7. DSM s više domena *Multi-Domain DSM***

U dosadašnjem izlaganju prikazani su rezultati istraživanja primjenom DSM matrice u jednoj domeni. Obzirom na to da se u ovom radu upotrebljava i matrica s više domena, u nastavku su prikazane matrice s više domena.

Ranih 2000-ih, istraživači su počeli proučavati mogućnost prikaza veza elemenata u više domena. Browning [21], Eppinger i Salminen [35] razmatrali su mapiranje između različitih domena, u matrici koja povezuje komponente, organizaciju i aktivnosti procesa. Modeli bazirani na DSM-u, koji su prošireni na dvije ili više domena, nazvani su kasnije više-domenska matrica Maurer [92]. Kasnije se otkrilo puno primjena matrice s više domena, a jedna od tih primjena je *Quality Function Deployment* (QFD), koji povezuje potrebe kupca sa specifikacijama proizvoda. Browning [96] je razlikovao pet različitih domena u projektu (sustav proizvoda, procesni sustav, organizacijski sustav, sustav alata i ciljni sustav), kako je i prikazano na slici 3.18.



**Slika 3.18.** Domene u projektu

MDM se počeo upotrebljavati relativno kasno, tek nakon 2000. godine. Širem krugu istraživača je postao interesantan tek nakon 2010. godine.

U kompleksnim projektima svaka od ovih domena ima svoju strukturu i svaka utječe na druge. Da bi se istražio utjecaj među domenama, potrebna je metoda modeliranja, koja omogućuje prikaze relacija između više domena. U literaturi se razlikuju tri vrste međudomenskog modeliranja:

1. DSM s 1,5 domenom je proširenje osnovnog DSM-a dodavanjem poboljšanog prikaza relacija između elemenata u različitim domenama i modeliranjem pripadnosti domena bojama.
2. *Domain Mapping Matrix* (DMM), kvadratna ili pravokutna matrica (ovisno o tome koliko elemenata sadrži koja domena) koja pokazuje odnos između dvije domene i ne pokazuje veze unutar domena.
3. Više-domenska matrica (MDM), predstavlja kombinaciju dviju ili više DSM matrica i DMM matrica u veći sustav, tj. model.

### 3.7.1. DSM s 1,5 domenom

Jednostavno proširenje osnovnog DSM-a prikazano je na slici 3.19. Dodavanjem dodatne kolone s lijeva i označavanjem elemenata prema vezi s elementima u drugoj domeni, dobiva se DSM s 1,5 domenom. U matrici je uz elemente moguće dodati kolonu koja pokazuje situaciju u drugoj domeni. Kao što se vidi na slici, matrica se sastoji od 9 elemenata u primarnoj domeni, a

koji su povezani na tri elementa A, B i C u drugoj domeni. DSM je partitioniran ovisno o strukturi u prvoj domeni. Obojani dijelovi pomažu razumijevanju međudomenskog mapiranja.

| SEKUNDARNO | PRIMARNO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A          | 1        | 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| B          | 2        | x | 2 |   |   |   |   |   |   |   |
| A          | 3        |   |   | 3 |   |   |   |   |   |   |
| C          | 4        |   |   | x | 4 |   |   |   |   |   |
| A          | 5        | x | x |   |   | 5 | x |   | x |   |
| B          | 6        |   |   | x |   | x | 6 |   |   |   |
| B          | 7        |   | x |   | x | x |   | 7 | x |   |
| C          | 8        |   |   |   |   |   |   | x | 8 |   |
| A          | 9        | x |   |   | x |   |   | x |   | 9 |

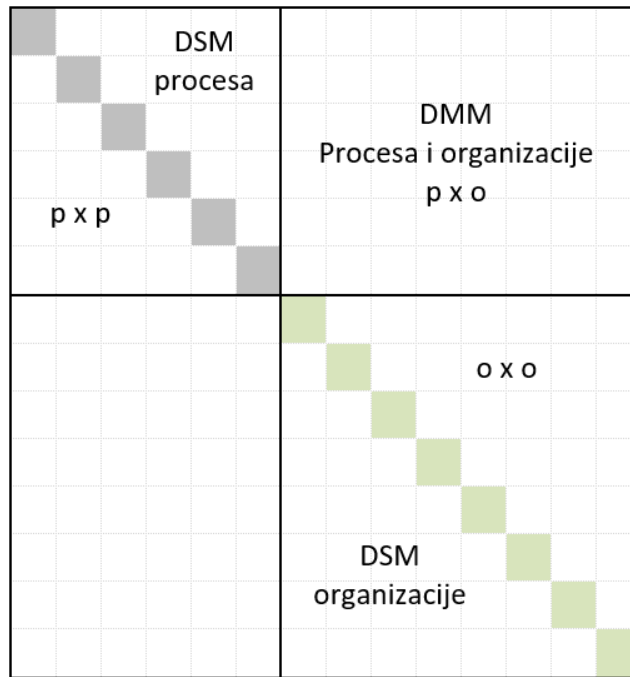
Slika 3.19. DSM s 1,5 domene

Prikazana se matrica upotrebljava za označavanje zadataka u DSM-u procesa s organizacijskom odgovornošću za zadatke.

### 3.7.2. DMM s dvije domene

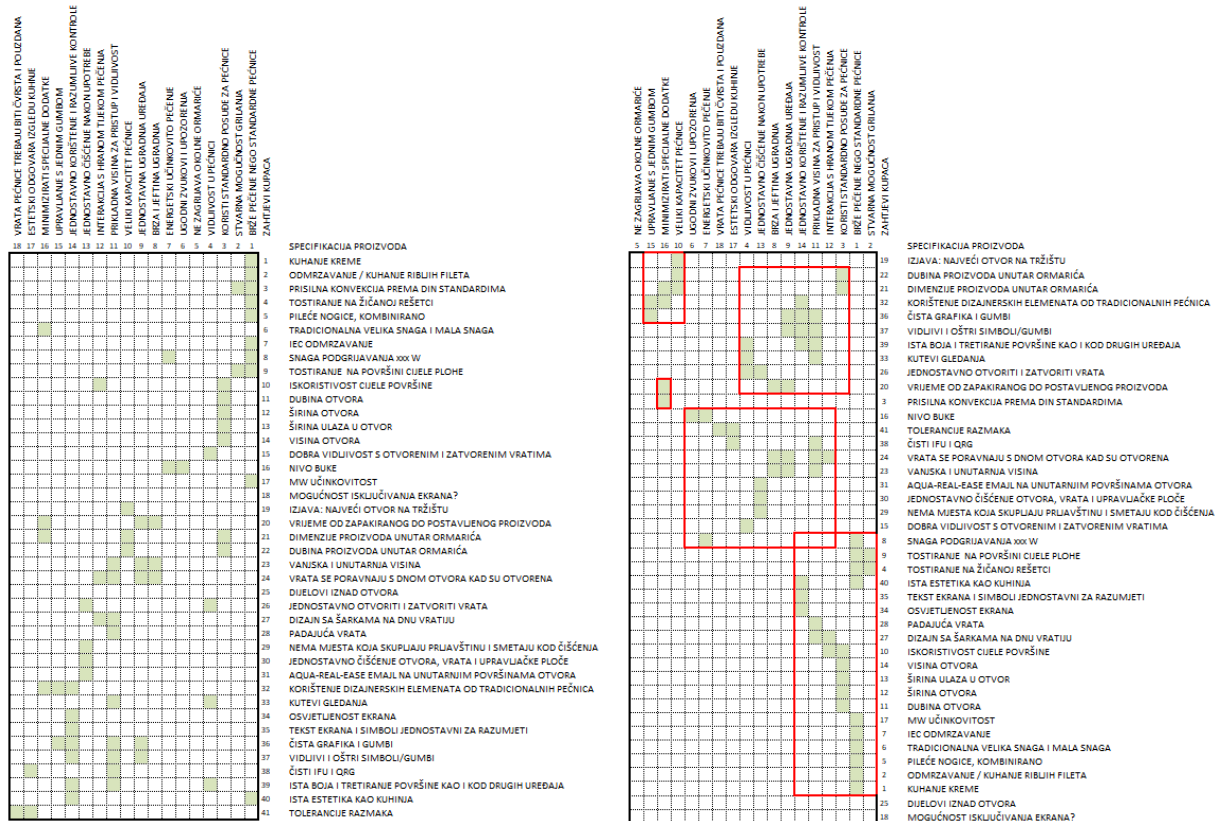
Kvadratne matrice se obično upotrebljavaju za označavanje veza. Danilovic i Browning [49] su proučavali primjere označavanja veza između različitih domena i nazvali su to DMM, ili mapiranje između domena. DMM je kvadratna matrica koja povezuje dvije domene, poput procesa i organizacije, pokazano na slici 3.20. Svaka se domena zasebno modelira pomoću DSM-a, koji bilježi unutarnje veze između elemenata. DMM je također binarna matrica, kao i DSM, ako se opisuje slučaj ima li ili nema veze, no isto tako, moguće je različitim brojevima prikazati jačinu ili tip veze.





**Slika 3.20.** DMM s dvije domene

Binarni DMM u nastavku prikazuje matricu mapiranja zahtjeva kupca i specifikacija proizvoda, na drugoj slici pokazano je što se dobije nakon analize klasteriranja. Analizom klasteriranja dobivena su 4 glavna klastera i jedan mali. Za razliku od DSM-a, DMM ne mora na dijagonali sadržavati oznaku, tako da se klasteri mogu nalaziti bilo gdje u matrici. Klasteri ukazuju na mjesto s puno veza i zahtjeva koordinaciju između domena, ili unutar svake domene uslijed veza između domena. Iz klasterirane matrice vidljivo je da su zadnja dva retka prazna (bez veza), što pokazuje da proizvod i zahtjevi kupca nemaju veza, ili može značiti da nedostaju neke bitne informacije o zahtjevima kupca.



Slika 3.21. Primjeri DMM-a s dvije domene

### 3.7.3. MDM s dvije ili više domena

DSM i DMM se mogu upotrebljavati za analizu utjecaja jedne domene na drugu, ili za identificiranje prisutnosti veza između dva sustava. Ova je mogućnost dovela do prijedloga matrica, kako je prikazano u nastavku. Predlagane su i istražene različite kombinacije DSM-a i DMM-a, uključujući pod-domene sustava proizvoda [49]. Maurer [92] je dao ime MDM (eng. *multidomain matrix*) za takvu matricu, pa je to ime postalo popularno u DSM zajednici.

Tehnike analiza MDM-a još se uvijek razvijaju. Nije još jasno kako najbolje analizirati MDM, zato što sadrži statičke i vremenski promjenjive DSM-matrice.

Još uvijek ima neriješenih pitanja, poput: bi li trebalo MDM sekvencirati, klasterirati - ili oboje?

|                         |  |  |   |   |
|-------------------------|--|--|---|---|
| DSM<br>ciljeva<br>g x g | DMM<br>ciljeva i<br>proizvoda<br>g x d | DMM<br>ciljeva i<br>procesa<br>g x p   | DMM<br>ciljeva i<br>organizacije<br>g x o   | DMM<br>ciljeva<br>i alata<br>g x t      |
|                         | DSM<br>proizvoda<br>d x d              | DMM<br>proizvoda i<br>procesa<br>d x p | DMM<br>proizvoda i<br>organizacije<br>d x o | DMM<br>proizvoda i<br>alata<br>d x t    |
|                         |  | DSM<br>procesa<br>p x p                | DMM<br>procesa i<br>organizacije<br>p x o   | DMM<br>procesa i<br>alata<br>p x t      |
|                         |  |  | DSM<br>organizacije<br>o x o                | DMM<br>organizacije i<br>alata<br>o x t |
|                         |  |  |   | DSM<br>alata<br>t x t                   |

**Slika 3.22.** Primjer područja primjene MDM-a

Potencijalne primjene DMM-a i MDM-a su:

- Za interakciju timova u organizaciji, baziranu na interakciji s komponentama proizvoda ili aktivnosti procesa.
- DSM i DMM se mogu upotrebljavati za otkrivanje unutar domenskih veza u drugom DSM-u, te u dinamičnom smislu otkrivanja kako promjena u jednoj domeni utječe na promjene u drugoj domeni.

### 3.8. Analiziranje strukture i evaluacija

Analiza strukture služi za bolju identifikaciju svojstava strukture i omogućava usporedbu sa sličnim funkcijskim proizvodom. Sama po sebi ne daje nikakve pogodnosti, ali daje uvid i omogućuje bolji menadžment konstrukcije i poboljšanja točno određenih dijelova strukture. Osim toga, nakon analize je moguće napraviti upute bazirane na rezultatima koje upotrebljavaju da bi se poboljšao proces razvoja proizvoda.

Analize mogu istaknuti određene dijelove koje je moguće optimizirati, čime se mogu postići značajna poboljšanja sustava, te postoje algoritmi koji se mogu primijeniti na strukturu, s ciljem dobivanja robusnijeg/jeftinijeg - ili možda pouzdanijeg sustava, ovisno o zahtjevu.

Analizirati se može cijeli sustav ili samo neki njegovi dijelovi, ovisno o želji autora, stoga ako se želi dobiti pregled cijelog sustava i kompleksnost mreže, za analizu će biti potrebno upotrebljavati cijeli sustav.

Većina algoritama za analizu odnosi se na matrični prikaz mreže, pa se struktura sustava vidi nakon preslagivanja elemenata u matrici. Kako je već spomenuto, postoje algoritmi za ručno particioniranje matrica koji mogu služiti za bolje razumijevanje sustava tijekom samog izvođenja procedure, no to je dugotrajno i stoga moguće jedino na malim matricama.

## 4. Analiza procesa po kriteriju vremena izvođenja

---

Obzirom na to da je temelj ovog rada DSM, zbog njegovih prednosti u odnosu na druge metode, a najviše radi jednostavnog označavanja važnih arhitekturnih svojstava poput ciklusa i iteracija [15], u nastavku je novopredložena metoda particioniranja. Analiza DSM modela se, uz ostale mogućnosti, radi metodama za particioniranje pomoću kojih se može vidjeti struktura sustava [22]. Trenutno postoji puno radova i raznih metoda za analizu proizvoda, organizacije i procesa, detaljan pregled radova je napravio Browning [15]. Ovdje će se govoriti samo o analizi procesa, jer je u nastavku predložen novi algoritam za particioniranje vremenski ovisnih sustava - poput aktivnosti i procesa. Steward [31] predlaže rješavanje iteracija cijepanjem i uvođenjem pretpostavki, dok u [30] govori da su pretpostavke rizici, te predlaže da DSM postane dio procesa, kako bi se u svakom trenutku bilježilo koje su se pretpostavke ostvarile, a koje nisu, te da se na taj način može procijeniti koji su preostali rizici na projektu. Eppinger i Smith [94,122,123] predložili su proširenu verziju DSM-a, koju su nazvali WTM (eng. *Work Transformation Matrix*). WTM je obuhvaćao pretpostavke:

1. svi zadaci/aktivnosti napravljeni su u jednom koraku
2. ponovljeni rad (eng. *Rework*) je u funkciji rada napravljenog u prethodnom koraku
3. parametri u matrici se ne mijenjaju u vremenu.

Istom metodom su se, u istom ili nadograđenom obliku, drugi kasnije koristili, recimo Browning [14] je upotrebljavao WTM u promatranju utjecaja izostanka završetka svakog zadatka/aktivnosti u jednom koraku. Oloufa je upotrebljavao CPM spregnut s DSM-om [45], te predlaže dijeljenje aktivnosti, kako bi se smanjio utjecaj potencijalnih iteracija na projekt. Postoje i Heuristična i poboljšana Heuristična rješenja [14], DaHA algoritam (eng. *Divide and hybridise algorithm*) [124]. U više članaka koristi se krivulja učenja [89,121,125,126,127], koja kod svake iteracije smanjuje vrijeme potrebno za ponovno izvođenje iste aktivnosti. U nekim radovima se za smanjenje ukupnog vremena izvođenja nekog procesa upotrebljava smanjenje vremena zbog preklapanja aktivnosti [128,129,130,131,132,133]. Ko upotrebljava metodu potenciranja matrica

i analizu cijepanjem [134]. Karniel i Reich [135,136], za konstruiranje novih proizvoda povezuju DSM s Petri-net metodom, Kusiak [137] rabi IDEF0 i IDEF3 metode.

Kratki pregled osnovnih metoda za particioniranje naveden je u prilogu ovog rada. Kod matricnih modela, tj. DSM-a, postoji mogućnost da se preslagivanje malih matrica radi ručno, bez softverskog alata, ali često to vrijedi samo za male matrice i matrice koje imaju malo veza [22]. Pozitivna strana ručnog preslagivanja jest da korisnici mogu već pri izvođenju procedure poboljšati svoje razumijevanje o promatranom sustavu [28].

Pod pojmom algoritam se ovdje misli na detaljni slijed uputa koje su računalno izvedive (tj. moguće ih je pretvoriti u program).

Radi jednostavnosti i lakšeg shvaćanja, razmotrit ćemo sustav s četiri zadatka koji imaju simetrične veze u odnosu na dijagonalu, jednostavan primjer je na sljedećoj slici, konvencionalni algoritam (koji upotrebljava *Reachability* metodu za particioniranje) neće ništa napraviti, te će nakon particioniranja, matrica ostati ista.

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
|   | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 1 |   |   |
| 2 | 1 | 2 | 1 |   |
| 3 |   | 1 | 3 | 1 |
| 4 |   |   | 1 | 4 |

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
|   | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 1 |   |   |
| 2 | 1 | 2 | 1 |   |
| 3 |   | 1 | 3 | 1 |
| 4 |   |   | 1 | 4 |

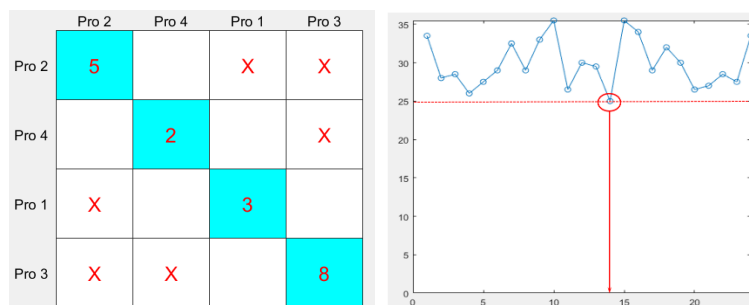
**Slika 4.1.** Primjer DSM-a prije particioniranja (lijevo) i nakon particioniranja (desno) *Reachability* metodom

Na slici u nastavku, prikazana je ista matrica prethodno pokazanog primjera u novopredloženoj proceduri za analiziranje procesa, napravljenom u programskom paketu MATLAB-a. Ideja autora je da se na dijagonalu, umjesto broja zadatka, unese vrijeme trajanja tog određenog zadatka i da se to vrijeme upotrebljava za računanje ukupnog vremena izvođenja, slično onome što su napravili Smith i Eppinger [122], s razlikom u načinu računanja vremena.

|       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | Pro 1 | Pro 2 | Pro 3 | Pro 4 |
| Pro 1 | 3     | X     |       |       |
| Pro 2 | X     | 5     | X     |       |
| Pro 3 |       | X     | 8     | X     |
| Pro 4 |       |       | X     | 2     |

**Slika 4.2.** DSM prije particioniranja novim predloženim načinom računanja

Recimo da zadatak/proračun 1 traje 3 sata, zadatak 2 traje 5 sati, zadatak 3 traje 8 sati i zadatak 4 traje 2 sata, što je i upisano u dijagonali početne matrice. Ako se računa prema novom predloženom načinu autora ovog rada, a koji je opširnije opisan u nastavku, dobije se optimalno rješenje koje bi trebalo biti najkraće vrijeme, ako se računa cijeli sustav i ako su korištene dovoljno točne pretpostavke za vrijeme ponovljenih zadataka i za broj ponavljanja istog zadatka. Na slici 4.3. prikazano je optimalno rješenje, dok je na desnoj strani prikazano vrijeme izvođenja za svaku moguću kombinaciju matrice, te se vidi da je za ovaj optimum izračunato minimalno vrijeme od 25 sati. Prema rezultatu ispada da je optimalno napraviti zadatak 2, pa zadatak 4, 1, pa tek onda 3. Ta kombinacija bila bi broj 14 s minimalnim ukupnim vremenom izvođenja od 25 sati.



**Slika 4.3.** Rezultat nakon particioniranja s novim predloženim načinom računanja

Kod svake analize DSM matrice, cilj je ustanoviti postoji li više rješenja ili bolje rješenje od onog predloženog konvencionalnim algoritmima za rješavanje, jer kako je moguće biti siguran da je to dobiveno rješenje optimalno za taj slučaj? Na malim matricama do deset aktivnosti, autor je zamijetio da se, ako se ne koristi smanjenjem vremena zbog paralelnog izvođenja aktivnosti, dobije više sličnih rješenja koje konvencionalni programi ne mogu vidjeti, a možda je neko od tih rješenja optimalno rješenje i zato je često korisniku ostavljeno da dalje, nakon prvog particioniranja matrice, sam, po svom nahođenju doraduje matricu kako bi dobio (po njegovom iskustvu) optimalno rješenje, no to je kod kompleksnijih i većih sustava problem i vrlo vjerojatno neće polučiti najboljim rješenjem koje je moguće dobiti, a postoji mogućnost i da korisnika odvede u krivom smjeru.

Rad novo predloženog načina računanja može se vrlo jednostavno objasniti kroz sljedećih 7 koraka.

Kratak opis programa bio bi sljedeći:

- **1. korak** - definiranje matrice (broja elemenata i veza)
- **2. korak** - definiranje vektora permutacije
- **3. korak** - kronološki odabir permutacije i izrada matrice za tu permutaciju
- **4. korak** - računanje vremena izvođenja za tu permutaciju i bilježenje tog vremena u dijagram „vrijeme izvođenja - broj permutacije“
- **5. korak** - ponavljanje 3. i 4. koraka sve dok postoje permutacije koje nisu izvedene
- **6. korak** - određivanje permutacije s minimalnim vremenom izvođenja iz dijagrama „vrijeme izvođenja – broj permutacije“
- **7. korak** - prikaz optimalnog rješenja.

Trenutno je najveći nedostatak ovog programa ograničenje na veličinu matrice koju program/računalo može obraditi u prihvatljivom vremenu. Sa sadašnjim računalima moguće je napraviti vektor permutacija za matrice veličine do 12 x 12, da bi se moglo još s tom matricom raditi, jer u tom slučaju vektor permutacije ima  $479 \cdot 10^6$  kombinacija, tj. 12! (u programu je korištena originalna funkcija iz MATLAB-a, koja podržava vektore permutacije za matrice do veličine 10 x 10 i tada vektor permutacije ima 3.628.800 kombinacija). Radi jasnijeg shvaćanja, u nastavku je pokazano kako povećanjem matrice raste vektor permutacije, a time i broj kombinacija koje je potrebno napraviti.

|   | Matrica<br>1x1 | Matrica<br>2x2 | Matrica<br>3x3 | Matrica<br>4x4 | Matrica<br>5x5 | Matrica<br>6x6 | Matrica<br>7x7 | Matrica<br>8x8 | Matrica<br>9x9 | Matrica<br>10x10 | Matrica<br>11x11 | Matrica<br>12x12 |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
|   | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1                | 1                | 1                |
|   |                | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2              | 2                | 2                | 2                |
|   |                |                | 3              | 3              | 3              | 3              | 3              | 3              | 3              | 3                | 3                | 3                |
|   |                |                |                | 4              | 4              | 4              | 4              | 4              | 4              | 4                | 4                | 4                |
|   |                |                |                |                | 5              | 5              | 5              | 5              | 5              | 5                | 5                | 5                |
|   |                |                |                |                |                | 6              | 6              | 6              | 6              | 6                | 6                | 6                |
|   |                |                |                |                |                |                | 7              | 7              | 7              | 7                | 7                | 7                |
|   |                |                |                |                |                |                |                | 8              | 8              | 8                | 8                | 8                |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                | 9              | 9                | 9                | 9                |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                |                | 10               | 10               | 10               |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                  | 11               | 11               |
|   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                  |                  | 12               |
| Broj kombinacija<br>vektora permutacije | 1              | 2              | 6              | 24             | 120            | 720            | 5040           | 40320          | 362880         | 3628800          | 39916800         | 479001600        |

**Slika 4.4.** Broj permutacija u ovisnosti o veličini matrice

Osim velikog broja kombinacija, pojavljuje se problem s potrebnom količinom memorije da bi se taj vektor permutacije mogao zapisati. Navedeni problemi ovu metodu čine gotovo



neupotrebljivom u praksi, jer su svi problemi u praksi veći od 12 elemenata. Potrebno je nastaviti raditi na proširenju mogućnosti ove metode ili na razvoju slične metode.

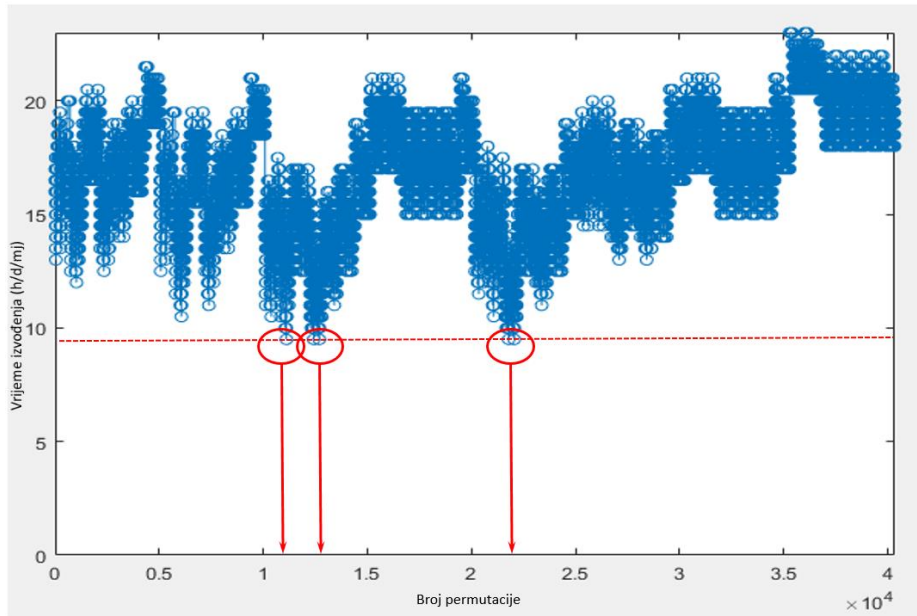
U nastavku je jedan primjer na matrici veličine 8 x 8, gdje je pokazano koja sve rješenja se dobiju, ako se zadaci izvode sekvencijalno, uzimajući u obzir samo povratne petlje. Slika 4.5. prikazuje početnu matricu prije particioniranja, dok su na slici 4.6. ispisana vremena izvođenja za različite kombinacije, bez obzira na paralelno izvođenje zadataka. Povratne petlje računaju se na način da se svaka povratna veza ostvaruje (izvodi). Korištena je pretpostavka da je kod ponavljanja istog zadatka dovoljno pola vremena za izvođenje. Ako se pogleda donja matrica, ukoliko se dođe na zadatak 2, utoliko povratna petlja vraća na zadatak 1 koji se ponovno izvodi, a za to ponovno izvođenje uzima se da je dovoljno pola početnog vremena. Na donjem se primjeru vrijeme računa prema sljedećem izrazu:

$$T = T_1 + T_2 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} + T_3 + \frac{T_1}{2} + \frac{T_2}{2} + \frac{T_3}{2} \dots \quad 2$$

|       | Pro 1 | Pro 2 | Pro 3 | Pro 4 | Pro 5 | Pro 6 | Pro 7 | Pro 8 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pro 1 | 1     | X     | X     | X     | X     | X     |       |       |
| Pro 2 |       | 1     | X     | X     | X     | X     |       |       |
| Pro 3 |       |       | 1     | X     | X     | X     |       |       |
| Pro 4 |       |       |       | 1     |       |       |       |       |
| Pro 5 |       | X     | X     | X     | 1     | X     |       |       |
| Pro 6 |       |       |       |       |       | 1     |       |       |
| Pro 7 |       |       |       |       |       | X     | 1     |       |
| Pro 8 |       |       |       |       | X     | X     |       | 1     |

**Slika 4.5.** Drugi primjer s novim predloženim načinom računanja vremena

Ukoliko se za svaku permutaciju nacrtava vrijeme izvođenja, utoliko se dobije dijagram u nastavku. Iz ovog dijagrama vidljivo je da postoje tri mjesta na kojima se nalaze lokalni minimumi, što bi moglo pomoći pri doradi predloženog načina analize procesa, jer je jasno da je dovoljno naći ta područja s lokalnim minimumima, te u tom području ispitati koji su to minimumi.



Slika 4.6. Zapis vremena za svaku permutaciju

Za prikazani primjer se dobije 18 suboptimalnih rješenja, koja su dana u nastavku.



Slika 4.7. Moguća suboptimalna rješenja ako se ne upotrebljava paralelno računanje vremena

Klasičnim programom sa službene stranice DSMweb.com (tj. metodom *Reachability*), dobije se samo jedno rješenje, a rezultat je u nastavku na slici 4.8. Matrica na slici 4.8. je najslbližija matrici

označenoj crvenim pravokutnikom na slici 4.7. Novim načinom računanja dobiven je redosljed zadataka 4, 6, 7, 3, 2, 5, 8, 1 - dok je kod konvencionalnog programa dobivena kombinacija 4, 6, 7, 2, 3, 5, 8, 1. Ako se usporede te dvije matrice, vidljivo je da kod matrice s klasičnim particioniranjem postoji jedna više povratna petlja iz zadatka 3 u zadatak 2, što se novim predloženim načinom računanja ne dobije. To je zato što je kod konvencionalne metode cilj napraviti slijed zadataka bez petlji ili približiti povratne petlje dijagonali, kako bi one imale minimalni utjecaj na duljinu iteracije, dok je kod nove metode jedino bitno da ukupno vrijeme izvođenja bude što kraće.

U slučaju da u rješenju postoje povratne veze (tj. neizbježne su), novim će se načinom računanja nastojati da su te povratne veze u jednoj koloni. Ako se pogleda malo detaljnije, vjerojatno takav način slaganja povratnih veza dodatno utječe na smanjenje ukupnog vremena izvođenja. Ako se razmatra desni donji detalj na slici 4.8., vrijeme izvođenja prema predloženoj proceduri je prema izrazu:

$$t_{donje} = t_2 + t_3 + \frac{t_2}{2} + \frac{t_3}{2} + t_5 + \frac{t_2}{2} + \frac{t_3}{2} + \frac{t_5}{2} \quad 3$$

Za gornju desnu matricu na slici 4.9. se može izračunati vrijeme prema izrazu:

$$t_{gornje} = t_3 + t_2 + t_5 + \frac{t_3}{2} + \frac{t_2}{2} + \frac{t_5}{2} \quad 4$$

Iz ove se dvije jednačbe oduzimanjem (3) – (4) dobiju dva člana  $\frac{t_2}{2} + \frac{t_3}{2}$  koji na kraju uzrokuju duže vrijeme izvođenja. U dostupnim simulacijama vremena trajanja postoji više načina kako izračunati povratne iteracije i prijedloge koji upotrebljavaju vjerojatnosti izvođenja, no fokus ovog doktorata bio je na razvoju matrice parametara generatora, a ne na razvoju novog programa i iz tog razloga se nije išlo u daljnje kompliciranje programa, no zbog u nastavku navedenih uočenih stvari, koje bi mogle biti zanimljive znanstvenicima koji se bave metodama particioniranja, ovo je stavljeno u rad - kao temelj za razmišljanje, možda i za neke buduće radove.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 4 | 6 | 7 | 2 | 3 | 5 | 8 | 1 |
| 4 | 4 |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   | 6 |   |   |   |   |   |   |
| 7 |   | 1 | 7 |   |   |   |   |   |
| 2 | 1 | 1 |   | 2 | 1 | 1 |   |   |
| 3 | 1 | 1 |   |   | 3 | 1 |   |   |
| 5 | 1 | 1 |   | 1 | 1 | 5 |   |   |
| 8 |   | 1 |   |   |   | 1 | 8 |   |
| 1 | 1 | 1 |   | 1 | 1 | 1 |   | 1 |

### Novi predloženi program

|       |   |   |  |   |   |   |
|-------|---|---|--|---|---|---|
| Pro 3 | X | X |  | 1 | ○ | X |
| Pro 2 | X | X |  | X | 1 | X |
| Pro 5 | X | X |  | X | X | 1 |

### Konvencionalni program

|   |   |   |  |   |   |   |
|---|---|---|--|---|---|---|
| 2 | 1 | 1 |  | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 |  |   | 3 | 1 |
| 5 | 1 | 1 |  | 1 | 1 | 5 |

**Slika 4.8.** Analiza računanjem vremena izvođenja – razlike s postojećim programom

Na temelju prethodnog primjera je jasno da na ovakvoj matrici veličine 8 x 8, koja ima 40.320 permutacija, može postojati više suboptimalnih rješenja. Postavlja se glavno pitanje, što se može očekivati na većim matricama poput 50 x 50, 100 x 100, ili kao u nastavku rada, na matrici s preko 200 x 200? Matrica 12 x 12 ima 479.001.600 permutacija, tj. ima 11.880 puta više kombinacija od matrice 8 x 8.

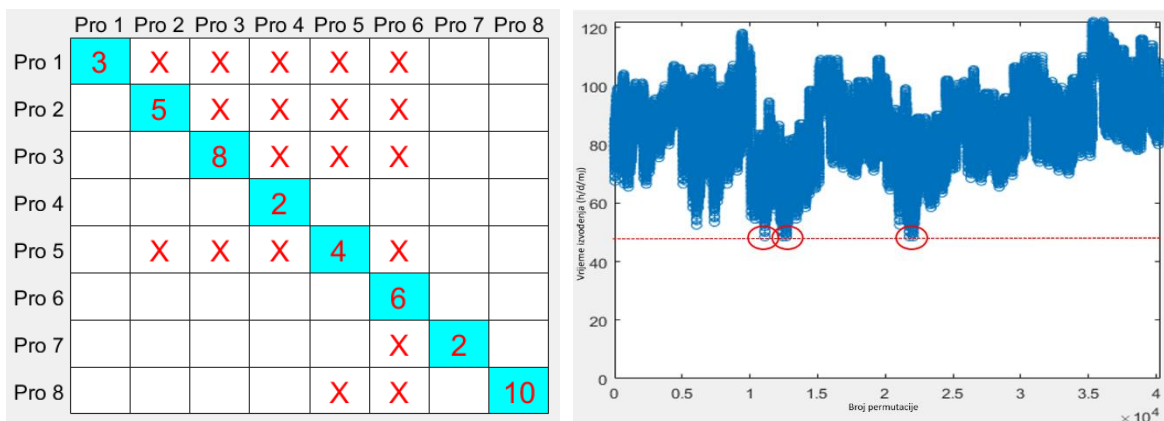
Bez da se razmišlja o dodatnom uvođenju paralelnog računanja vremena, moglo bi se zaključiti da konvencionalni programi imaju veliki nedostatak, jer ne daju potpuni uvid u sva moguća rješenja (korisnik nema pravu sliku koja su sve optimalna rješenja), a najvjerojatnije na većim matricama ne daju ni pravo optimalno rješenje.

Obzirom na ovakav rasplet situacije, autor je probao uvesti dodatno smanjenje ukupnog vremena zbog aktivnosti koje se mogu paralelno izvoditi. Na primjeru sa slike 4.9. u nastavku, zadatke 1, 2, 3, 4 možemo izvesti paralelno i trajanje svih zadataka bi bilo jednako trajanju najdužeg zadatka - tj., prema donjem primjeru - trajanju zadatka 3, odnosno 8 sati.

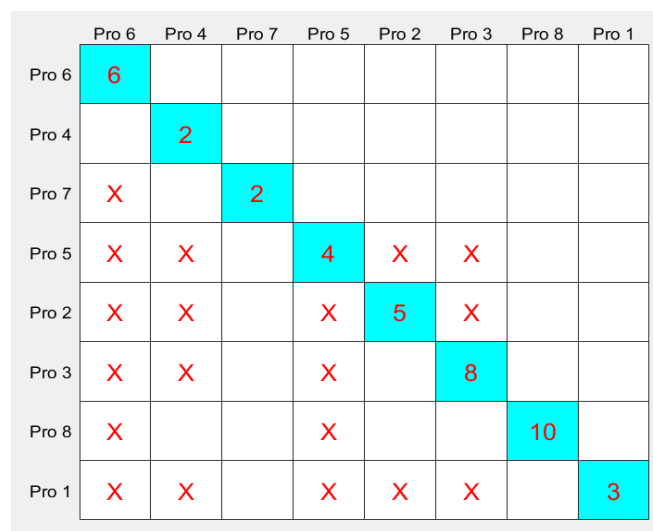
Ako se ovom primjeru doda predloženo smanjenje vremena izvođenja zbog mogućnosti paralelnog izvođenja zadataka, to bi dodatno zakompliciralo i preokrenulo situaciju. Na početni primjer su dodana neka vremena izvođenja za svaki zadatak. Kada se za ovaj slučaj prikažu vremena izvođenja za svaku permutaciju, slika ostaje slična onoj bez uzimanja u obzir paralelnog izvođenja, ali ipak ima znatnih razlika.

Glavna razlika je u tome što se ovim načinom računanja dobije samo jedno optimalno rješenje, prikazano u nastavku. U ovom slučaju, osim što je gornja strana matrice (iznad dijagonale)

optimirana po pitanju povratnih petlji, ako se pogledaju veze ispod dijagonale, vidljivo je da su i te veze optimirane, tj. poslagane u kolonama, da bi se što više zadataka moglo paralelno izvoditi. Ovaj predloženi način računanja daje dodatan uvid u nešto što do sada nije viđeno, a ispada logično, ako za cilj postavimo imati što više zadataka koje možemo izvoditi paralelno (što je i glavni cilj ako slijedimo načela *Concurrent Engineeringa*). Ovdje je također bitno zamijetiti da su dijagram na slici 4.6. i dijagram na slici 4.9. slični, tj. matrica koja je imala suboptimalno rješenje u slučaju bez uporabe smanjenja vremena zbog paralelnog izvođenja aktivnosti, je i dalje blizu optimalnog rješenja.



**Slika 4.9.** Primjer početne matrice (lijevo) i dijagram „broj permutacije - zapis vremena“ za svaku permutaciju, uporabom smanjenja vremena izvođenja zbog paralelnog izvođenja zadataka



**Slika 4.10.** Analiza računanjem vremena izvođenja – optimalno rješenje uporabom smanjenja vremena zbog paralelnog izvođenja zadataka

Iz provedenih analiza proizlazi da nije svejedno koliko koji zadatak traje i koji će u ukupnom poretku biti takav zadatak. Potrebno je detaljnije istražiti distribuciju vremena izvođenja pojedinih zadataka. Na temelju provedene analize u ovom slučaju zaključili smo da - ako su neki zadaci kratkog trajanja i nalaze se u povratnoj petlji - ukupno neće uzeti puno vremena, tj. imat će manji utjecaj na ukupno vrijeme.

Ovaj način računanja ima nedostatke (neke zamijećene ćemo spomenuti u nastavku) i sigurno nije najbolje rješenje, ali je vrlo jednostavno i daje zanimljiva rješenja, koja ne bi trebalo odbaciti bez daljnjih istraživanja.

Ovaj program nije bio cilj ovog doktorata, nastao je kao ideja prilikom izrade rada i ostali su neki nedostaci koje je potrebno doraditi u budućnosti.

Program se jednostavno može doradivati/nadopunjavati, naprimjer krivuljom učenja, vjerojatnosti izvođenja itd., no autor je želio da program ostane na jednostavnoj razini, bez uvođenja pretpostavki ili nesigurnosti (poput vjerojatnosti da se neka iteracija izvede). Steward [30], navodi da su pretpostavke rizik, te da projekti često ne uspiju kada se misli da su gotovo završeni, zato što se realiziraju neke pretpostavke koje nisu riješene, pa zbog toga projekti traju duže. Predlaže se daljnje poboljšanje ovog predloženog programa, na način da se traže lokalni minimumi, uz korekcije u računanju ukupnog vremena. Također, može se razmisliti i o kombinaciji ovog rješenja s nekom od metoda, poput metode Petri-net. MATLAB kod je u prilogu ovog rada.

U literaturi se nalazi više radova koji upotrebljavaju vjerojatnosti za iteracije, ili čak simulacije, no postavlja se pitanje zašto uvoditi rizik, ili u ovom slučaju nesigurnosti, tamo gdje to možda nije potrebno.

Na temelju rezultata i drugih proučenih metoda iz literature, dostupni programi za particioniranje DSM matrica koji se upotrebljavaju u praksi:

- ne uzimaju u obzir mogućnost da možda postoji više suboptimalnih rješenja (u prikazu ovog programa vidljivo je da u nekim slučajevima može postojati više suboptimalnih rješenja, a sva ta rješenja mogu imati isti broj povratnih petlji. Drugim riječima, u praksi često autor sam prerađuje matricu prema svojem mišljenju, čime poboljšava rezultat, što govori da postojeći programi ne osiguravaju jednoznačna rješenja),
- ne daju korisniku pravi uvid u sva moguća suboptimalna rješenja,
- korisnika mogu navesti na krivi put, zato što on nema informaciju o drugim mogućim suboptimalnim rješenjima, već samo o jednom.

Predloženi pristup pregledava svaku moguću varijantu matrice i za svaku računa vrijeme izvođenja, čime se izbjegava mogućnost postojanja nekog boljeg rješenja za koje korisnik neće saznati.

Veliko ograničenje ovog pristupa predstavljaju mogućnosti današnjih računala, koje dozvoljavaju da se u nekom razumnom vremenu mogu računati matrice do maksimalne veličine 10 x 10. Nekim dodatnim kodovima za vektor permutacije, moguće je proširiti mogućnost i računati matrice veličine 12 x 12 i veće, no nakon matrice 11 x 11, vrijeme izračuna postaje znatno duže.

## 5. Modeliranja generatora velike snage

---

U prvom dijelu ovog rada pokazani su primjeri i mogućnosti matrične metode. U literaturi je moguće naći brojne primjere primjene matrične metode u industriji, dok je u [15] iskazan dobar pregled napravljenih radova. Ovo istraživanje započelo je razvojem modela proračuna i modela arhitekture generatora, nakon kojih je razvijena matrica parametara, te su na kraju razvijeni modeli međudomenskih matrica, koji su ujedno postali dio konačne višedomenske matrice, a koja je bila cilj ovog rada. Istraživanje je omogućilo dekompoziciju i segmentaciju razvojnog procesa povezanu sa strukturom generatora, što omogućuje lakše upravljanje razvojnim procesom, pregled relacija i ovisnosti između konstrukcijskih parametara generatora, a što također vodi boljem razumijevanju procesa [22].

Istraživački rad na matricama nije direktno vezan za tijek istraživanja prema [71], ali radi pojašnjenja na čemu se radilo prije a na čemu kasnije, u nastavku je opis kroz pet faza. Tijekom prve faze istraživanja, razvijena je DSM matrica za mehaničke proračune generatora [69]. Primjena na mehaničkim proračunima pokazala se iznimno zanimljivom te su se tijekom istraživanja uočile neke zanimljive činjenice, poput potrebe za uvođenjem preliminarnih proračuna i mogućnosti postojanja boljeg slijeda izrade proračuna. Uočeno je da se ovime može znatno doprinijeti smanjenju ukupnog vremena izrade svih proračuna. Osim toga, tijekom prve faze napravljena je matrica arhitekture generatora, iz koje se može vidjeti kakva je arhitektura vertikalnog generatora velike snage i koja daje odgovor na treće istraživačko pitanje: „Mogu li se na temelju razvijenog modela konstrukcije generatora uočiti potencijalna poboljšanja konstrukcije?“.

Sljedeća faza istraživanja obuhvatila je izradu matrice parametara velikog generatora. Tijekom te faze istraživanja, inicijalni model matrice sadržavao je velik broj parametara, te zbog problema rada s tako velikim brojem, isti je model reduciran, što je opisano u nastavku. Matrica parametara verificirana je analizom tijekom niza sastanaka eksperata, razvojnih inženjera koji sudjeluju u svim fazama razvoja generatora tvrtke Končar.

Posljednja faza istraživanja, koja je omogućila praktičnu implementaciju rezultata ovog rada, obuhvatila je povezivanje parametara s nacrtima i proračunima. S obzirom na to da su nacrti i proračuni polazište za određivanje konstrukcijskih parametara, povezivanje je omogućilo analizu



razvojnog procesa. Time je omogućeno generiranje optimalnih sljedova izrade mehaničkih proračuna i dokumentacije, kako bi se moglo utjecati na ukupno vrijeme izrade projekta od početka do kraja izrade dokumentacije, bez obzira na varijabilnost izvedbi.

Razvojni projekt generatora time ne završava, jer nakon izrade konstrukcijske dokumentacije slijedi tehnološka razrada, a tek potom dolazi do proizvodnje. Cijeli proces bilo je nemoguće obuhvatiti, iako bi je sada, kada je razvijena osnovna matrica parametara, budući korisnici mogli iskoristiti i proširiti na željeni način, npr. uključanjem tehnoloških informacija, jer jednom kada se napravi inicijalni model, on je baza za daljnje dorade i usavršavanje [8]. Za takav način nadovezivanja na postojeći DSM ili MDM postoji više mogućnosti, sve ovisi o viziji autora, no da bi on viziju dobio, mora si prvo postaviti pitanje što time želi dobiti. Takvo nadovezivanje je najjednostavnije izvedivo s MDM matricom, na način da se napravi još jedna DSM matrica koja bi bila povezana s konstrukcijskom dokumentacijom. Time bi se vidio optimalni slijed izrade tehnološke razrade. Trenutno se tehnološka razrada radi prema redosljedu dostavljenih nacрта, a ukoliko je slijed konstrukcijske dokumentacije kriv, utoliko ni tehnološka dokumentacija ne može imati optimalni slijed.

Cjelokupni model razvoja vertikalnog električnog generatora realiziran u ovom istraživanju obuhvaća sljedeće matrice:

1. DSM svih proračuna vertikalnog električnog generatora – prikazuje skup proračuna koji se najčešće rade na vertikalnom hidrogeneratoru velike snage, cilj je bio povezati proračune kako bi se dobio uvid u međusobne veze između proračuna, ukazalo na trenutne nedostatke, te kako bi se možda probao dobiti bolji slijed proračuna, koji bi iziskivao manje ponovljenog rada, tj. iteracija.
2. DSM konstrukcije vertikalnog električnog generatora – prikazuje osnovnu strukturu glavnih dijelova velikog generatora, cilj ove matrice bio je vidjeti kakva je arhitektura vertikalnog hidrogeneratora i vidjeti postoji li mogućnost poboljšanja postojeće arhitekture generatora.
3. DSM parametara generatora – matrica parametara generatora napravljena je da bi se dobio uvid u postojeću strukturu konstrukcijskih i projektnih parametara. Uvid u strukturu bio je osnova za sačinjavanje MDM matrice u nastavku.
4. DMM parametara – proračuna – matrica koja povezuje parametre s proračunima, potrebna je za MDM matricu.

5. DMM parametara – dokumentacije – matrica koja povezuje parametre i dokumentaciju, potrebna je za izradu MDM matrice.
6. MDM parametara, proračuna i nacrt – ova matrica bila je konačni cilj ovog rada. Sastoji se od particioniranog DSM-a parametara, DMM matrice parametara – proračuna i DMM matrice parametara – dokumentacije (matrice pod točkama 3, 4, 5), a povezuje konstrukcijske i projektne parametre s dokumentacijom i s proračunima. Ovom matricom se jednostavno može optimirati slijed izrade dokumentacije i proračuna na bazi parametara. Pomoću ove MDM matrice se, osim optimiranja slijeda dokumentacije i proračuna, može napraviti vizualni prikaz utjecaja određenog parametra na ostale parametre i na dokumentaciju, tj. bojama prikazati što bi sve trebalo promijeniti promjenom jednog parametra. Ovo je bitno kako bi svi sudionici na jednom projektu imali uvid koliko posla znači promjena jednog parametra.

## 5.1. DSM proračuna vertikalnog električnog generatora

Kako je prethodno spomenuto, ovaj je rad nastao iz početne ideje da se postojeća matricna metoda, zvana matrica strukture konstrukcije (DSM), primijeni na nekom manje kompleksnom primjeru te da se procijene mogućnosti, prednosti i nedostaci - kako sa znanstvene strane, tako i s inženjerske strane. Veliki generator ima mnogo proračuna i provjera, samo za navedenih 20-ak na slici 2.5, može se reći da su uobičajeni prilikom izrade generatora. Broj proračuna i tip proračuna obično se razlikuju, ovisno o tome radi li se o revitalizaciji ili novom generatoru, a osim toga, ovisi i o zahtjevnosti kupca. Tako neki kupci nemaju zahtjeve na proračune, dok drugi traže detaljne proračune za sve glavne i opterećene dijelove, koje dodatno provjeravaju i komentiraju. Svi mehanički proračuni prikazani na slici 2.5, poredani su u matricu pokazanu u nastavku, početni slijed napravljen je prema vlastitom nahođenju autora. Osim proračuna, u matricu su uključena još tri skupa parametara koji utječu na proračune, a to su tenderski zahtjevi, proračun projektnih podataka i proračun turbine. Slično rabe i drugi autori, jedan od njih je [120].

Tenderski zahtjevi drugačiji su za svaki projekt, mijenjaju se ovisno od kupca do kupca i općenito, iz godine u godinu postaju sve zahtjevniji. Tenderski zahtjevi, tj. ono što kupac definira tenderom, su iznad svega. Najčešće i mora tako biti, neovisno govori li se o životnom vijeku komponenata generatora, brzini vrtnje, snazi, frekvenciji ili momentu tromosti generatora. Kupci na velikim generatorima u tenderu stavljaju zahtjeve na dozvoljena naprezanja u materijalima, broj ciklusa koji je potrebno upotrebljavati u mehaničkim proračunima, životni vijek na koji je potrebno dimenzionirati generator, a koji se kreće od 30 - pa sve do 70 godina rada, dozvoljeno akumulirano oštećenje, faktor vjerojatnosti. Često se radi o obnovi starog generatora, pa je tada potrebno u proračun uzeti i sve cikluse kroz protekle godine rada. Osim toga, česti su zahtjevi i na načine kočenja, odnosno s koje brzine počinje normalno ili hitno kočenje. Ponekad postoji zahtjev za način kočenja, kontinuirano ili intermitirajuće, ponekad je definiran tlak ili broj kočnica, ako postoji generator. Kupac često definira maksimalno vrijeme kočenja. Jedan od češćih uvjeta kupca u tenderu je definiranje granice s minimalnom svojom kritičnom brzinom, a ponekad postoji zahtjev i na torzijske kritične brzine. Osim toga, ponekad postoji zahtjev na opterećenje pokrova generatora, poput opterećenja za koje je potrebno proračunati i dimenzionirati pokrov generatora. Još jedan, gotovo obavezan zahtjev kupca u tenderu je definiranje maksimalne buke generatora, ovaj zahtjev možda trenutno i nije direktno vezan na proračune generatora, no fizikalno postoji

veza i postoji mogućnost da će se i to jednog dana moći proračunavati s dovoljnom točnošću, stoga je ovdje i spomenuto. Moguće je da se pojave i zahtjevi za dozvoljene vibracije statorskog paketa, ili možda zahtjev na minimalni tlak u paketu itd. Izvor ovih navoda je iz [79].

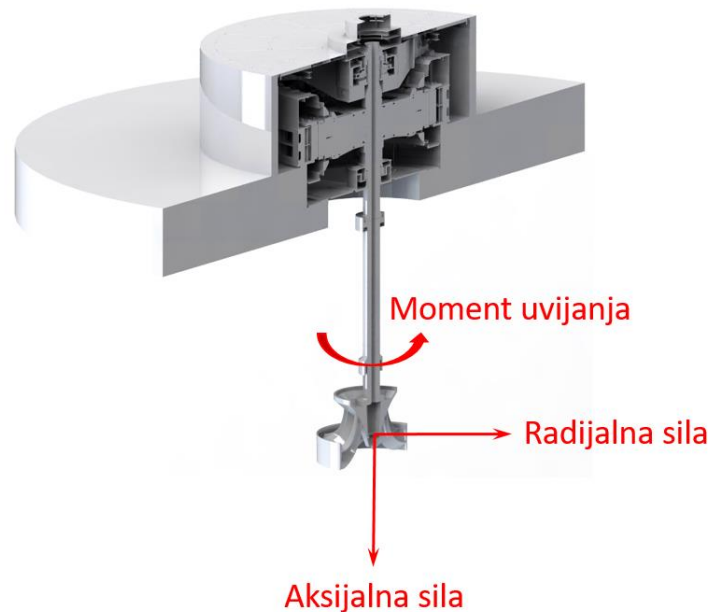
Tenderskih zahtjeva je jako puno i kao što je rečeno, mijenjaju se od kupca do kupca, pa je tako u današnje vrijeme moguće da kupac tenderskim zahtjevima zadire u bilo koji dio generatora.

Obzirom na tu činjenicu, tenderski zahtjevi su obavezni - kako u ovoj matrici, tako i u matrici parametara, o kojoj će biti riječi u slijedećim poglavljima.

Osim tenderskih zahtjeva, u ovoj je matrici upotrebljavan i termin turbinski podaci. Proizvođač turbine, nakon izrade proračuna turbine, određuje podatke koji su bitni za nastavak izrade konstrukcijske dokumentacije i proračuna generatora. Neki od podataka potrebnih za izradu proračuna su: brzina teoretskog pobjega i brzina radnog pobjega, koji su posebno bitni za proračune rotirajućih dijelova generatora. Ostali bitni podaci su: masa turbinskog vratila, masa turbinskog kola i sile prouzrokovane vodom. Zašto sila prouzrokovana vodom? Naprimjer, Kaplan turbina stvara aksijalnu silu, veću od mase rotora, pa se kod nje javlja velika povratna sila, koja je u nekim slučajevima toliko velika da podiže rotor agregata. U tim slučajevima nosivi ležaj na generatoru (kombinirani, tj. radijalno-aksijalni) mora imati mogućnost primiti i povratnu silu. Osim toga, Kaplan turbina zahtijeva rupu u sredini vratila, kroz koju proizvođač turbine provlači cijevi za upravljanje nagibom lopatica na radnom kolu, tj. rotirajućem dijelu turbine. Obično uz Kaplan turbinu postoji i međuvratilo s trećim ležajem (možda i više ležaja), te su općenito male radijalne sile u normalnom radu. Francis turbina ima nešto manje aksijalne sile od Kaplan turbina, te nešto veće radijalne sile, dok se Pelton turbina upotrebljava na malim agregatima i ne stvara aksijalnu silu (pojašnjenje smjerova sila je na slici u nastavku). Radijalna sila u radu, naravno, ovisi o broju sapnica i njihovoj raspodjeli (rezultantna sila računa se iz poligona sila), ako govorimo o najčešćim slučajevima, gdje je recimo 5 - 6 sapnica jednoliko raspoređenih po obodu, dok u normalnom radu, sa svim otvorenim sapnicama, postoji minimalna radijalna sila (teoretski je nula). Obično postoji zahtjev proizvođača turbine da se generatorski ležaji dimenzioniraju za rad sa samo jednom sapnicom, što odgovara radu generatora u slučajevima kada nema dovoljno vode, ili čak s tri sapnice (što je najnepovoljniji slučaj ako turbina ima pet ili 6 sapnica). Obzirom na to da se Pelton turbina direktno montira na kraju vratila generatora, ona stvara veliko radijalno opterećenje na generatorski ležaj. Uz Pelton turbinu, obično turbinski proizvođač zahtijeva da se pri tim radijalnim silama vratilo deformira unutar nekih određenih granica, koje je ponekad teško zadovoljiti, a često to znači veći ležaj, te deblji pogonski kraj vratila. Tip turbine znatno utječe na

veličinu ležaja i dimenzioniranje vratila, no kada pričamo o generatorima velike snage, pričamo uglavnom o Francis i Kaplan turbinama.

Osim navedenih, za proračun generatora potrebne su još dimenzije međuvratila, krutosti i prigušenja turbinskog ležaja ili više njih, te podaci o prirubničkom spoju između generatora i turbine, jer najčešće je turbinski proizvođač odgovoran za prirubnički spoj.



**Slika 5.1.** Skica pojašnjenja smjera sila (izvedba s Francis turbinom)

U matrici se upotrebljava proračun projektnih podataka koji se odnosi na sve podatke potrebne za izradu mehaničkih proračuna, a dolaze iz projekta. U tim podacima su nazivni parametri stroja, poput snage generatora, broja okretaja, faktora snage, momenata kratkih spojeva (dvopolni i trolpolni kratki spoj), momenta pogrešne sinkronizacije, zamašne mase, krutosti magnetnog polja, magnetne sile privlačenja između rotora i statora za 10 % ekscentriteta, magnetne sile za 50 % polova rotora u kratkom spoju, magnetne sile privlačenja jednog pola, te broja lopatica i veličine lopatica ventilatora - kako bi se generator mogao ispravno hladiti.

U nastavku, na slici 5.2. prikazani su proračuni koji se rade na velikim generatorima i za njih su identificirane najučestalije veze. Veze su identificirane kolonu po kolonu, na način da taj proračun u koloni utječe, tj. daje podatke potrebne za ostale proračune. Ako se pogleda kolona 12, vidi se da proračun donjeg nosača utječe na proračun kritičnih brzina, broj 17 i na proračun sila na temelje, broj 1. S druge strane, moguće je gledati retke, a u redcima su veze s proračunima koje taj proračun upotrebljava. Kao primjer, ako se gleda redak 20, za proračun kape generatora potreban je proračun pod brojem 4, tj. proračun turbine. Proizvođač turbine daje silu na koju je

potrebno proračunati kapu generatora i definira maksimalni otklon generatorske kape, čime se definira i određena robusnost kape. Ispod je početna matrica s identificiranim vezama između proračuna.

| Početni DSM                           |    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |    |
|---------------------------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Proračun sila na temelje              | 1  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proračun kočenja i dizanja            | 2  |   | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun vratila, prirubnice i pera   | 3  |   |   | 3 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun turbine                      | 4  |   |   |   | 4 |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun polnog kotača                | 5  |   | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun pola                         | 6  |   |   |   |   |   | 6 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun međupolnih veza              | 7  |   |   |   |   |   | 1 | 7 |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun dovoda struje polovima       | 8  |   |   |   |   | 1 | 1 |   | 8 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun gornjeg nosača               | 9  |   |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   | 9 | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proračun kućišta                      | 10 |   |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 | 10 | 1  |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proračun statorskog paketa            | 11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    | 11 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| Proračun donjeg nosača                | 12 |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |    |    | 12 |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proračun naprave za nošenje rotora    | 13 |   |   | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    | 13 |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |
| Proračun naprave za transport rotora  | 14 |   |   | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    |    | 14 |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |
| Proračun naprave za nošenje statora   | 15 |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1  |    |    |    |    | 15 |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun naprave za transport statora | 16 |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 | 1  |    |    |    |    |    | 16 |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun kritičnih brzina             | 17 |   |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1 | 1 |    | 1  |    |    |    |    |    | 17 | 1  | 1  |    | 1  | 1  | 1  |
| Proračun SS ventilatora               | 18 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 18 | 1  |    | 1  | 1  | 1  |
| Proračun PS ventilatora               | 19 |   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 19 |    | 1  | 1  | 1  |
| Proračun generatorske kape            | 20 |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 20 |    |    |
| Tenderski zahtjevi na proračune       | 21 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 21 |    |
| Proračun projektnih podataka          | 22 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 22 |

Slika 5.2. Nuparticionirana matrica osnovnih proračuna

Analiza je napravljena pomoću *open source* programa za particioniranje, DSM\_Program-v2.1 sa stranice DSMweb.org, koji se za particioniranje koristi metodom matrice dostupnosti, tj. *Reachability Matrix Method*.

Standardni mehanički proračuni pokrivaju glavne dijelove generatora poput:

- rotora
- statora
- nosača (gornjeg i donjeg)
- ležajeva (vodećeg i kombiniranog)
- kočnice, itd.

Iz nuparticionirane matrice je jednostavno programom ispisati sve ovisnosti između proračuna. Iz sljedeće se slike vide sve ovisnosti i jasno je da proračun p1, tj. Proračun sila na temelje, ovisi o

podacima iz mnogih drugih proračuna, poput p2, p3, p4, p5, p6, p9, p10, p11, p12, p18, p19, p20, p21, p22. Proračun p9, tj. Proračun gornjeg nosača, ovisi o proračunima p3, p4, p5, p6, p10, p17, p18, p19, p20, p21, p22. Proračun p10, tj. Proračun kućišta, ovisi o p3, p4, p5, p6, p9, p11, p17, p18, p19, p20, p21, p22. Proračuni p12 i p17 (proračun donjeg nosača i proračun kritičnih brzina) također ovise o puno drugih proračuna. Pozadina svakog proračuna su parametri koje taj proračun treba za izvođenje. Kada se kaže da jedan proračun ovisi o drugom proračunu, misli se da se njime definiraju parametri ili jedan parametar koji taj proračun upotrebljava. Iz toga, u ovoj matrici, ako postoji veza između dva proračuna, drugi proračun ne može početi dok ne dobije podatak iz prvog proračuna.

Već iz ovoga se može vidjeti da su neki proračuni ovisni o puno drugih proračuna i to ih kasnije svrstava na kraj matrice, dok će se proračuni koji ovise o malo drugih proračuna ili ne ovise o drugim proračunima, kasnije naći na vrhu matrice, što će značiti da mogu biti napravljeni prvi.

| Broj proračuna | Puno ime:                                 | Ovisi o:  |
|----------------|---|---|
| 1              | p1 Proračun sila na temelje               | p2, p3, p4, p5, p6, p9, p10, p11, p12, p18, p19, p20, p21, p22, |
| 2              | p2 Proračun kočenja i dizanja             | p3, p4, p5, p6, p21, p22,                                       |
| 3              | p3 Proračun vratila, pribubnice i pera    | p4, p5, p6, p21, p22,   |
| 4              | p4 Proračun turbine                       | p21, p22,   |
| 5              | p5 Proračun polnog kotača                 | p2, p3, p4, p6, p21, p22,                                       |
| 6              | p6 Proračun pola                          | p21, p22,   |
| 7              | p7 Proračun međupolnih veza               | p6, p21, p22,   |
| 8              | p8 Proračun dovoda struje polovima        | p5, p6, p21, p22,   |
| 9              | p9 Proračun gornjeg nosača                | p3, p4, p5, p6, p10, p17, p18, p19, p20, p21, p22,              |
| 10             | p10 Proračun kućišta                      | p3, p4, p5, p6, p9, p11, p17, p18, p19, p20, p21, p22,          |
| 11             | p11 Proračun statorskog paketa            | p21, p22,   |
| 12             | p12 Proračun donjeg nosača                | p2, p3, p4, p5, p6, p17, p18, p19, p21, p22,                    |
| 13             | p13 Proračun naprave za nošenje rotora    | p3, p5, p6, p18, p19,   |
| 14             | p14 Proračun naprave za transport rotora  | p3, p5, p6, p18, p19,   |
| 15             | p15 Proračun naprave za nošenje statora   | p10, p11,   |
| 16             | p16 Proračun naprave za transport statora | p10, p11,   |
| 17             | p17 Proračun kritičnih brzina             | p3, p4, p5, p6, p9, p10, p12, p18, p19, p21, p22,               |
| 18             | p18 Proračun SS ventilatora               | p19, p21, p22,  |
| 19             | p19 Proračun PS ventilatora               | p2, p3, p4, p5, p6, p18, p21, p22,                              |
| 20             | p20 Proračun generatorske kape            | p4,   |
| 21             | p21 Tenderski zahtjevi na proračune       |   |
| 22             | p22 Proračun projektnih podataka          | p21,  |

**Slika 5.3.** Tablica proračuna i ovisnost proračuna o drugim proračunima

Nakon particioniranja matrice, tj. preslaganja, dobiven je poredak koji zahtijeva puno manje povratnih iteracija, tj. ponavljanja proračuna. Sve počinje od tenderskih zahtjeva na proračune, proračuna projektnih podataka i proračuna turbine. Već iz ovoga je vidljivo da promjena u proračunu projektnih podataka znači ponavljanje praktički svih proračuna. Ovo nije u potpunosti tako, jer samo neki od parametara utječu na neki proračun, no ne svi parametri, zato bi matrica parametara trebala dati točniji uvid u relacije. Zanimljiva činjenica dobivena ovom analizom je da se proračun sila na temelje treba raditi na kraju, kada su svi drugi mehanički proračuni gotovi.

Obično je obrnuto, često se proračun sila na temelje i proračun kritičnih brzina rade još u fazi početka projekta, što bi značilo da je potrebno napraviti reviziju takvog proračuna, da bi proračuni bili napravljeni s ispravnim podacima. Osim toga, iz donje se matrice može zaključiti da su proračuni kočenja i dizanja, proračun vratila i polnog kotača spregnuti i bilo bi dobro raditi ih istovremeno (ili da ih radi ista osoba) da bi se mogli izmjenjivati podaci, kako bi se izbjegla dodatna potreba za iteracijama. Isto tako, proračuni kućišta, gornjeg nosača, donjeg nosača i kritičnih brzina su također spregnuti i bilo bi ih dobro raditi u isto vrijeme (ili ista osoba), s ciljem razmjene podataka, kako ne bi bilo potrebe za ponavljanjem nekog od proračuna. Glavni podatak koji se izmjenjuje je krutost nosača potrebna za proračun kritičnih brzina. Ako se pokaže da je kritična brzina ispod minimalne propisane tenderom, jedna od opcija utjecanja na istu je pojačavanje nosača, radi se rijetko, ali je moguće. Daljnja optimizacija bi mogla biti da se donja matrica optimira analizom cijepanjem, pa bi se mogle maknuti povratne veze iz proračuna kritičnih brzina na proračun gornjeg nosača, kućišta i donjeg nosača. Kod proračuna ventilatora bi se mogla maknuti jedna povratna veza, tako da bi jedini spregnuti proračuni ostali proračun kočenja i dizanja, proračun vratila, prirubnice i pera te proračun polnog kotača.

| Particionirana matrica                | 21 | 22 | 4  | 6 | 7 | 11 | 20 | 2 | 3 | 5 | 8 | 18 | 19 | 9  | 10 | 17 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 1  |    |
|---------------------------------------|----|----|----|---|---|----|----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Tenderski zahtjevi na proračune       | 21 | 21 |    |   |   |    |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun projektnih podataka          | 22 | 1  | 22 |   |   |    |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun turbine                      | 4  | 1  | 1  | 4 |   |    |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun pola                         | 6  | 1  | 1  |   | 6 |    |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun međupolnih veza              | 7  | 1  | 1  |   | 1 | 7  |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun statorskog paketa            | 11 | 1  | 1  |   |   | 11 |    |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun generatorske kape            | 20 |    |    | 1 |   |    | 20 |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun kočenja i dizanja            | 2  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    | 2 | 1 | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun vratila, prirubnice i pera   | 3  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |   | 3 | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun polnog kotača                | 5  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    | 1 | 1 | 5 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun dovoda struje polovima       | 8  | 1  | 1  |   | 1 |    |    |   |   |   | 1 | 8  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun SS ventilatora               | 18 | 1  | 1  |   |   |    |    |   |   |   |   |    | 18 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun PS ventilatora               | 19 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    | 1 | 1 | 1 |   |    | 1  | 19 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Proračun gornjeg nosača               | 9  | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  |   | 1 | 1 |   |    | 1  | 1  | 9  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |
| Proračun kućišta                      | 10 | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  | 1 |   | 1 | 1 |    | 1  | 1  | 1  | 10 | 1  |    |    |    |    |    |    |
| Proračun kritičnih brzina             | 17 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |   | 1 | 1 |   |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 17 | 1  |    |    |    |    |    |
| Proračun donjeg nosača                | 12 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    | 1 | 1 | 1 |   |    | 1  | 1  |    | 1  | 12 |    |    |    |    |    |    |
| Proračun naprave za nošenje rotora    | 13 |    |    |   | 1 |    |    |   |   |   | 1 | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    | 13 |    |    |
| Proračun naprave za transport rotora  | 14 |    |    |   | 1 |    |    |   |   |   | 1 | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    | 14 |    |
| Proračun naprave za nošenje statora   | 15 |    |    |   |   | 1  |    |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |    | 15 |
| Proračun naprave za transport statora | 16 |    |    |   |   |    | 1  |   |   |   |   |    |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 16 |
| Proračun sila na temelje              | 1  | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  | 1 | 1 | 1 | 1 |    | 1  | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |    | 1  |

Slika 5.4. Particionirana matrica osnovnih proračuna



Uz particioniranje je napravljena i analiza ulančavanjem, koja pokazuje koji proračuni se moraju izvoditi sekvencijalno, a koji se mogu izvoditi paralelno. Matrica je prikazana na slici 5.5. Boje u redovima pokazuju što se može raditi istovremeno, a što sekvencijalno. Naprimjer, ako se pogleda proračun projektnih podataka (drugi u poretku), iza njega se mogu paralelno izvoditi proračun turbine i proračun pola, dok se iza njih mogu paralelno izvoditi proračun međupolnih veza, proračun statorskog paketa, proračun generatorske kape, proračun kočnja i dizanja te proračun vratila, prirubnice i pera. Nakon završetka proračuna kočnja i dizanja te proračuna vratila, može se pristupiti proračunu polnog kotača. Ovdje se vidi nedostatak ove metode, jer ukoliko ne postoje kapaciteti da se toliko proračuna radi istovremeno, već recimo tri ili četiri proračuna, utoliko bi za smanjenje ukupnog vremena izrade proračuna trebalo prvo pristupiti proračunu kočnja i dizanja te proračunu vratila, prirubnice i pera, kako bi se ostvarili uvjeti za izradu proračuna polnog kotača. Vidljivo je da se dosta proračuna može izvoditi paralelno i time bi se moglo znatno smanjiti ukupno vrijeme izvođenja svih proračuna. Bez obzira na prikazanu matricu, u praksi je situacija znatno drugačija. Često u vrijeme izrade nekog od proračuna nema dovoljno podataka ili je potrebno napraviti neke promjene na konstrukciji. Osim toga, nikada se ne radi o samo jednom projektu, već zna biti aktualno od par objekata, pa do više desetaka projekata, ili se pojave neki nenadani problemi koje je potrebno rješavati, dok su, s druge strane, raspoloživi resursi ograničeni i to sve utječe na slijed i brzinu izrade proračuna.

Iz matrice u nastavku vidi se da je nakon izrade proračuna pola, moguće izvoditi paralelno sljedeće proračune:

- proračun turbine
- proračun pola.

Slijede:

- proračun međupolnih veza
- proračun statorskog paketa
- proračun kape
- proračun kočnja i dizanja
- proračun vratila, prirubnice i pera.

Nakon izvođenja proračuna polnog kotača, paralelno se mogu izvoditi:

- proračun dovoda struje polovima
- proračun SS ventilatora.

Na kraju, nakon proračuna kritičnih brzina paralelno se mogu izvesti:

- proračun donjeg nosača
- proračun naprave za nošenje rotora
- proračun naprave za transport rotora
- proračun naprave za nošenje statora
- proračun naprave za transport statora.

Ovdje se nailazi na još jedan nedostatak ove metode, a to je da se iz veza ispod može vidjeti da proračun donjeg nosača (broj 12) mora čekati podatak iz proračuna kritičnih brzina (broj 17), dok drugi proračuni (13, 14, 15 i 16) već imaju sve podatke za njihovo izvođenje.

|                                       | 21 | 22 | 4  | 6 | 7 | 11 | 20 | 2  | 3 | 5 | 8 | 18 | 19 | 9  | 10 | 17 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 1  |   |
|---------------------------------------|----|----|----|---|---|----|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Tenderski zahtjevi na proračune       | 21 | 21 |    |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun projektnih podataka          | 22 | 1  | 22 |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun turbine                      | 4  | 1  | 1  | 4 |   |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun pola                         | 6  | 1  | 1  |   | 6 |    |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun međupolnih veza              | 7  | 1  | 1  |   | 1 | 7  |    |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun statorskog paketa            | 11 | 1  | 1  |   |   |    | 11 |    |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun generatorske kape            | 20 |    |    | 1 |   |    |    | 20 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun kočenja i dizanja            | 2  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |    | 2 | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun vratila, prirubnice i pera   | 3  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |    |   | 3 | 1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun polnog kotača                | 5  | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |    | 1 | 1 | 5 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun dovoda struje polovima       | 8  | 1  | 1  |   | 1 |    |    |    |   |   | 1 | 8  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun SS ventilatora               | 18 | 1  | 1  |   |   |    |    |    |   |   |   |    | 18 | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun PS ventilatora               | 19 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |    | 1 | 1 | 1 |    | 1  | 19 |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun gornjeg nosača               | 9  | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  |    | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 9  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun kućišta                      | 10 | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  | 1  |   | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 10 | 1  |    |    |    |    |    |    |   |
| Proračun kritičnih brzina             | 17 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    |    | 1 | 1 |   | 1  | 1  | 1  | 1  | 17 | 1  |    |    |    |    |    |   |
| Proračun donjeg nosača                | 12 | 1  | 1  | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 | 1 |   | 1  | 1  |    |    | 1  | 12 |    |    |    |    |    |   |
| Proračun naprave za nošenje rotora    | 13 |    |    |   | 1 |    |    |    | 1 | 1 |   | 1  | 1  |    |    |    |    | 13 |    |    |    |    |   |
| Proračun naprave za transport rotora  | 14 |    |    |   | 1 |    |    |    | 1 | 1 |   | 1  | 1  |    |    |    |    |    | 14 |    |    |    |   |
| Proračun naprave za nošenje statora   | 15 |    |    |   |   | 1  |    |    |   |   |   |    |    | 1  |    |    |    |    |    | 15 |    |    |   |
| Proračun naprave za transport statora | 16 |    |    |   |   | 1  |    |    |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 16 |   |
| Proračun sila na temelje              | 1  | 1  | 1  | 1 | 1 |    | 1  | 1  | 1 | 1 | 1 |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    | 1 |

**Slika 5.5.** Proračuni analizirani metodom ulančavanja

Izrada ove matrice daje ograničen uvid u stvarno stanje, kakvo se obično nailazi u praksi, te ima određene nedostatke, na koje se ukazalo ranije. Ograničenja uvida proizlaze iz činjenice da veze parametara opisuju ovisnost veze parametara i proračuna, međutim, nisu obuhvaćeni svi parametri i veze unutar proračuna. Za ilustraciju, može se dogoditi da neki od proračuna koji se izvodi kasnije možda ne treba sve parametre od prethodnog proračuna, a ovdje se, zbog nedostatka dovoljno detaljnog uvida u parametre proračuna, to ne može vidjeti. Osim toga, kao što je prije rečeno, u praksi se često radi na više projekata istovremeno i često postoje rokovi na neke od proračuna, pa se često u takvim situacijama slobodni kapaciteti preusmjeravaju prema prioritetima.

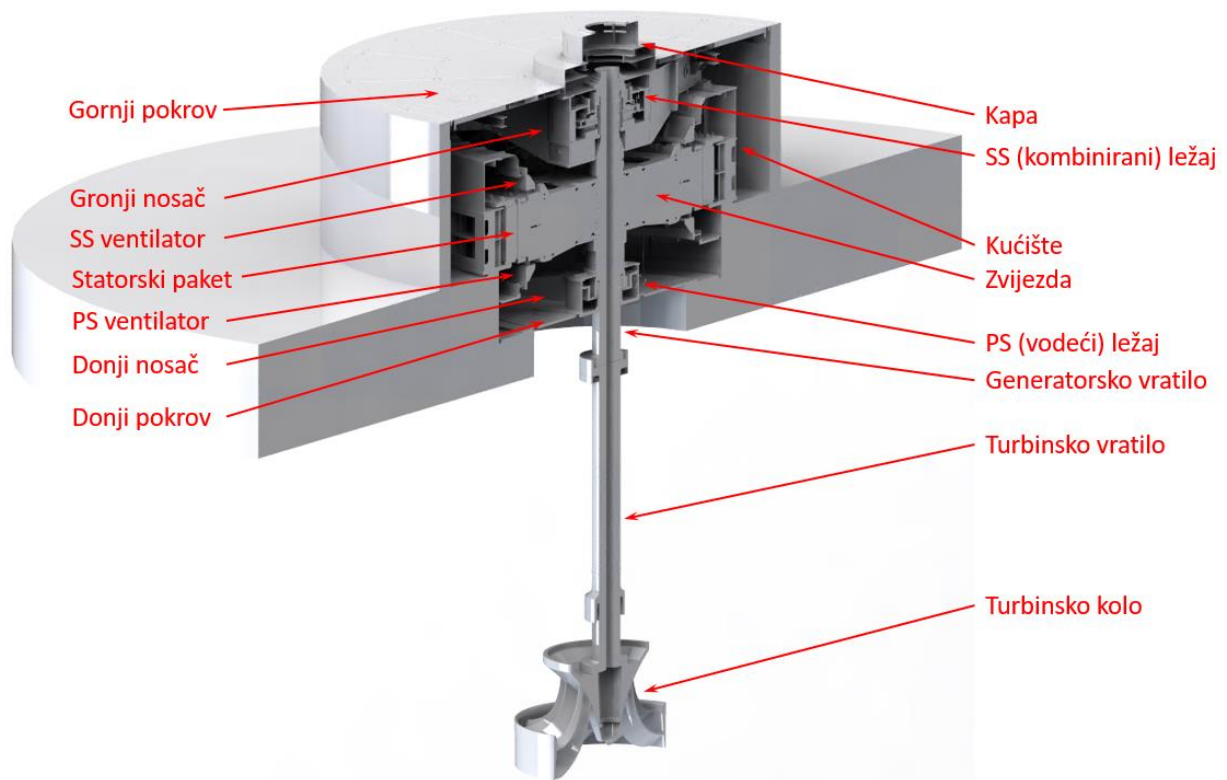
Saznanja dobivena ovom analizom značajna su, prvenstveno zato što se sada može utjecati na smanjenje nepotrebnih iteracija, uz povećanje kvalitete završnih proračuna. Povećanje kvalitete proizlazi iz izvođenja proračuna - na ovaj način dobivenim redoslijedom mogu se dobiti proračuni koji će se u konačnici temeljiti na točnijim podacima.

U praksi se naime, često neke veličine u proračunima pretpostavljaju na temelju iskustva. Predloženim redoslijedom izvođenja, kao što je navedeno, proračuni će se manje oslanjati na pretpostavljene ulazne podatke.

## 5.2. DSM konstrukcije vertikalnog električnog generatora

Analiza matrice proračuna generatora istakla je informacije o proračunima i njihove relacije, koje prije ovog istraživanja nisu bile vidljive. Inženjeri koji rade proračune te relacije „imaju u glavi“, no dok se to ne vizualizira, te dok se ne napravi „optimirani“ poredak, nije moguće znati koji bi bio optimalni slijed proračuna, čak i za tih dvadesetak proračuna. U posljednjih deset godina objavljeni su brojni radovi (prema [15] više od 1.000) u kojima se pokazuju pozitivne strane primjene DSM-a na arhitekturu proizvoda, istaknimo ovdje radove [41,138,139,140,141,142]. Jedan od ciljeva ovog rada bio je također vidjeti ima li mogućnosti da se naprave potencijalna poboljšanja na konstrukciji generatora, stoga je jedno od postavljenih istraživačkih pitanja: Može li se na temelju razvijenog modela konstrukcije generatora uočiti potencijalna poboljšanja konstrukcije? Pri tome treba uzeti u obzir, kao što je već istaknuto, da je generator proizvod s vrlo dugom tradicijom proizvodnje u tvrtki. Modeliranje arhitekture generatora ograničeno je na razinu sklopova i podsklopova, kao što je u nastavku opisano. Pri tome se opisu nisu uzeli u obzir sklopovi cjelokupnog hidroagregata, već samo sklopovi generatora važni za opis strukture generatora. Razvojem ove matrice pokušalo se odgovoriti na pitanja kakvi su odnosi između elemenata strukture vertikalnog velikog hidrogeneratora i može li se postojeća, tradicionalna struktura promijeniti, odnosno poboljšati?

S obzirom na to da je istraživanje ograničeno na arhitekturu generatora, analiza je obuhvatila sustav generatora do dodira s okolinom (temeljima). Turbinsko radno kolo i turbinsko vratilo koji ne spadaju u domenu generatora nisu dio ove matrice, no obzirom na to da na kraj vratila u nekim izvedbama može doći uljna glava, sklop uljne glave obuhvaćen je matricom, jer ipak povezuje dodatno rotirajući dio sa statičkim dijelom, tj. kapom i gornjim nosačem. Bez te veze u matrici, vrlo vjerojatno ne bi postojao peti sklop, no procijenjeno je da bi bilo pogrešno ne uzeti u obzir uljnu glavu. Granice matrice postavljene su na dodiru kućišta s temeljem, dodiru pokrova s betonom, te na dodiru donjeg nosača s temeljem i donjeg pokrova s betonom. Radi boljeg razumijevanja valja pogledati sliku u nastavku. Napravljena je mala usporedba ove metode s metodom klasteriranja, iz koje su dobiveni slični rezultati po pitanju modula, te je odlučeno da je ova metoda također primjenjiva za daljnju analizu.



**Slika 5.6.** Dijelovi generatora prema [79]

Relacije u matrici identificirane su po cjelinama sklopova i podsklopova slučajnim redoslijedom; prvo se krenulo od kućišta, statorskog paketa i svega što je bilo u dodiru. Preko gornjeg nosača došlo se do kape i rotora generatora, a na kraju i do donjeg nosača, što se naposljetku i nije puno razlikovalo od particionirane matrice.

Teoretski redoslijed popunjavanja matrice ne bi smio imati utjecaj na konačni rezultat, no to u ovom slučaju nije tako, kao što je zamijećeno i u radu [40]. U poglavlju s novom predloženom metodom, pokazan je primjer sa simetričnim relacijama u odnosu na dijagonalu, na kojem konvencionalni programi ne pomažu (tj. particioniranjem se ne mijenja poredak). Nekoliko je provjera pokazalo da o redoslijedu popunjavanja ovisi i ukupni poredak u particioniranoj matrici, a to je ujedno jedna od motivacija za nastanak nove metode, koja bez obzira na redoslijed popunjavanja uvijek daje isto optimalno rješenje, tj. postoji ponovljivost.

Neparticionirana, ishodišna matrica konstrukcije generatora prikazana je na slici u nastavku. Ova matrica bi se mogla dodatno proširiti dodavanjem svih sitnijih komponenti, koje ovdje nisu razmatrane, poput izvoda statora, cjevovoda, ugrađene opreme kao što je PT100 sonda, grijači, akcelerometar itd.



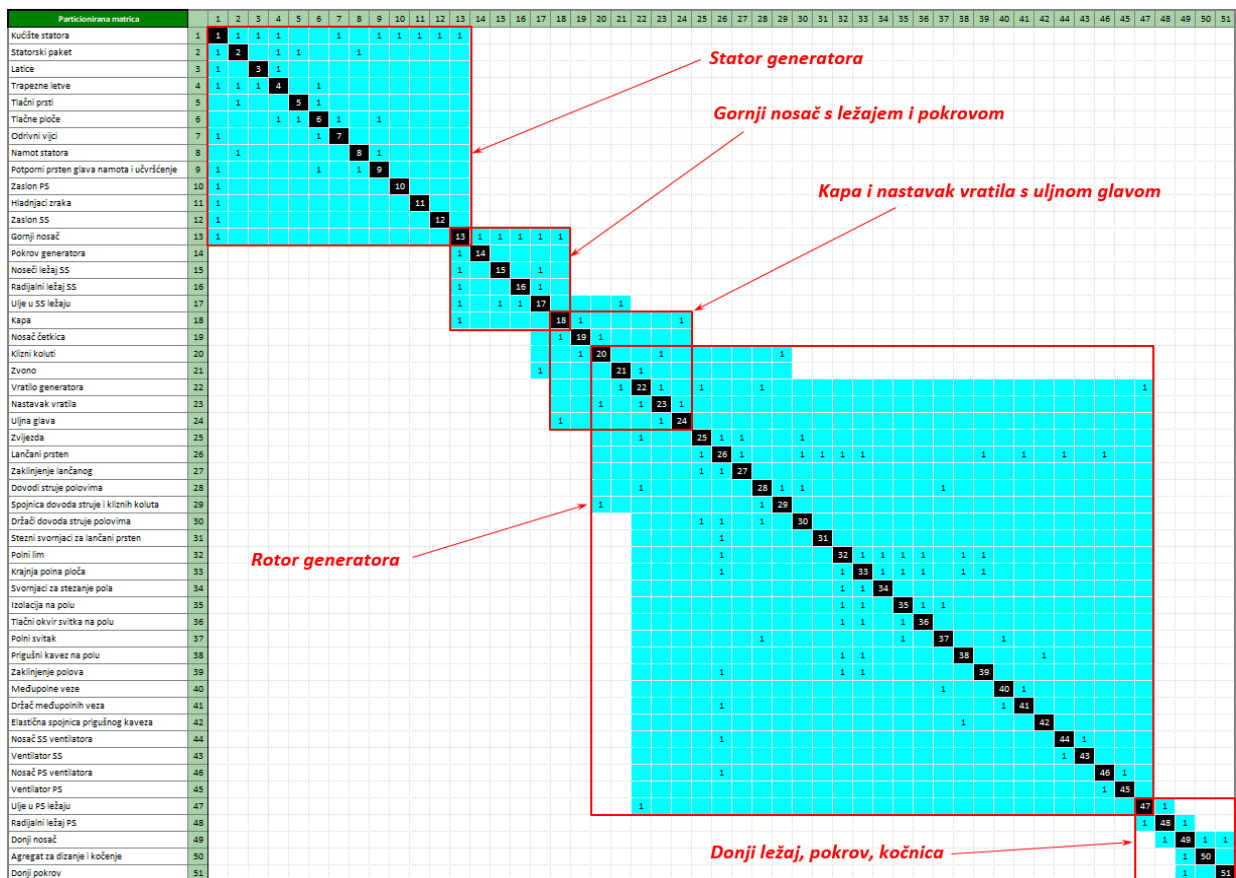
| Naziv                                     | Ovisi o:  |
|---|---|
| Kućište statora                           | Statorski paket, Latice, Trapezne letve, Odrivni vijci, Potporni prsten glava namota i učvršćenje, Zaslon PS, Hladnjaci zraka, Zaslon SS, Gornji nosač,   |
| Statorski paket                           | Kućište statora, Trapezne letve, Tlačni prsti, Namot statora,   |
| Latice                                    | Kućište statora, Trapezne letve,  |
| Trapezne letve                            | Kućište statora, Statorski paket, Latice, Tlačne ploče,   |
| Tlačni prsti                              | Statorski paket, Tlačne ploče,  |
| Tlačne ploče                              | Trapezne letve, Tlačni prsti, Odrivni vijci, Potporni prsten glava namota i učvršćenje,   |
| Odrivni vijci                             | Kućište statora, Tlačne ploče,  |
| Namot statora                             | Statorski paket, Potporni prsten glava namota i učvršćenje,   |
| Potporni prsten glava namota i učvršćenje | Kućište statora, Tlačne ploče, Namot statora,   |
| Zaslon PS                                 | Kućište statora,  |
| Hladnjaci zraka                           | Kućište statora,  |
| Zaslon SS                                 | Kućište statora,  |
| Gornji nosač                              | Kućište statora, Pokrov generatora, Noseći ležaj SS, Radijalni ležaj SS, Ulje u SS ležaju, Kapa,  |
| Pokrov generatora                         | Gornji nosač,   |
| Noseći ležaj SS                           | Gornji nosač, Ulje u SS ležaju,   |
| Radijalni ležaj SS                        | Gornji nosač, Ulje u SS ležaju,   |
| Ulje u SS ležaju                          | Gornji nosač, Noseći ležaj SS, Radijalni ležaj SS, Zvono,   |
| Kapa                                      | Gornji nosač, Nosač četkica, Uljna glava,   |
| Nosač četkica                             | Kapa, Klizni koluti,  |
| Klizni koluti                             | Nosač četkica, Nastavak vratila, Spojnica dovoda struje i kliznih koluta,   |
| Zvono                                     | Ulje u SS ležaju, Vratilo generatora,   |
| Vratilo generatora                        | Zvono, Nastavak vratila, Zvijezda, Dovodi struje polovima, Ulje u PS ležaju,  |
| Nastavak vratila                          | Klizni koluti, Vratilo generatora, Uljna glava,   |
| Uljna glava                               | Kapa, Nastavak vratila,   |
| Zvijezda                                  | Vratilo generatora, Lančani prsten, Zaklinjenje lančanog, Držači dovoda struje polovima,  |
| Lančani prsten                            | Zvijezda, Zaklinjenje lančanog, Držači dovoda struje polovima, Stezni svornjaci za lančani prsten, Polni lim, Krajnja polna ploča, Zaklinjenje polova, Držać međupolnih veza, Nosač SS ventilatora, Nosač PS ventilatora, |
| Zaklinjenje lančanog                      | Zvijezda, Lančani prsten,   |
| Dovodi struje polovima                    | Vratilo generatora, Spojnica dovoda struje i kliznih koluta, Držači dovoda struje polovima, Polni svitak,   |
| Spojnica dovoda struje i kliznih koluta   | Klizni koluti, Dovodi struje polovima,  |
| Držači dovoda struje polovima             | Zvijezda, Lančani prsten, Dovodi struje polovima,   |
| Stezni svornjaci za lančani prsten        | Lančani prsten,   |
| Polni lim                                 | Lančani prsten, Krajnja polna ploča, Svornjaci za stezanje pola, Izolacija na polu, Tlačni okvir svitka na polu, Prigušni kavez na polu, Zaklinjenje polova,  |
| Krajnja polna ploča                       | Lančani prsten, Polni lim, Svornjaci za stezanje pola, Izolacija na polu, Tlačni okvir svitka na polu, Prigušni kavez na polu, Zaklinjenje polova,  |
| Svornjaci za stezanje pola                | Polni lim, Krajnja polna ploča,   |
| Izolacija na polu                         | Polni lim, Krajnja polna ploča, Tlačni okvir svitka na polu, Polni svitak,  |
| Tlačni okvir svitka na polu               | Polni lim, Krajnja polna ploča, Izolacija na polu,  |
| Polni svitak                              | Dovodi struje polovima, Izolacija na polu, Međupolne veze,  |
| Prigušni kavez na polu                    | Polni lim, Krajnja polna ploča, Elastična spojnica prigušnog kaveza,  |
| Zaklinjenje polova                        | Lančani prsten, Polni lim, Krajnja polna ploča,   |
| Međupolne veze                            | Polni svitak, Držać međupolnih veza,  |
| Držać međupolnih veza                     | Lančani prsten, Međupolne veze,   |
| Elastična spojnica prigušnog kaveza       | Prigušni kavez na polu,   |
| Ventilator SS                             | Nosač SS ventilatora,   |
| Nosač SS ventilatora                      | Lančani prsten, Ventilator SS,  |
| Ventilator PS                             | Nosač PS ventilatora,   |
| Nosač PS ventilatora                      | Lančani prsten, Ventilator PS,  |
| Ulje u PS ležaju                          | Vratilo generatora, Radijalni ležaj PS,   |
| Radijalni ležaj PS                        | Ulje u PS ležaju, Donji nosač,  |
| Donji nosač                               | Radijalni ležaj PS, Agregat za dizanje i kočenje, Donji pokrov,   |
| Agregat za dizanje i kočenje              | Donji nosač,  |
| Donji pokrov                              | Donji nosač,  |

**Slika 5.8.** Tablica međuovisnosti komponenata

U nastavku je dan prikaz particionirane matrice, zanimljivo je vidjeti da se poredak komponenata nije znatno promijenio, ali su istaknuti moduli s komponentama koje su međusobno povezane, što se iz prve matrice i nije tako čisto vidjelo. Iz početne, neparticionirane i ove particionirane matrice, može se zaključiti da je arhitektura konstrukcije generatora složena, s malo preklapanja modula koji predstavljaju sklopove. To znači da konstrukciju generatora čine dobro definirani podsustavi, što je posljedica dugogodišnjeg razvoja stroja.

Za generator se može reći da se sastoji od pet glavnih sklopova (također vidljivih na slici u nastavku):

- stator generatora
- gornji nosač s ležajem i pokrovom
- kapa i nastavak vratila s uljnom glavom
- rotor generatora
- donji ležaj, pokrov i kočnica.



**Slika 5.9.** Particionirana matrica komponenta generatora

Kao što je na početku spomenuto, da je bila izbačena uljna glava, matrica bi imala jednu cjelinu manje, ali bi to unijelo grešku u stvarnu arhitekturu konstrukcije.

Iz rezultata na slici 5.9, može se zaključiti da je trenutna arhitektura generatora suboptimalna, s minimalnim preklapanjem dva modula, jer ne postoje veze koje su van klastera (veći sklopovi poput rotora i statora), te nema potrebe za uvođenjem promjena ili daljnjih optimizacija.



### 5.3. DSM parametara generatora

Prethodna dva primjera DSM-a pokazala su neke od prednosti njegova korištenja, a iz matrice proračuna vidi se jedan nedostatak, a to je nedostatak vidljivosti parametara koji su u pozadini proračuna, a u konačnici na njih utječu. Taj je nedostatak moguće otkloniti na način da se napravi matrica svih parametara na koju će se kasnije povezati proračuni. U nastavku je izložen prikaz razvoja matrice parametara generatora, čime se detaljno modelira cjelokupna arhitektura generatora, preko ključnih funkcionalnih i konstrukcijskih parametara. Time se ujedno realizira i postavljeni cilj ovog istraživanja u sklopu doktorske disertacije. Modelom parametara povezuju se projekt, konstrukcija i proračuni, te se može steći uvid u stvarno potreban slijed određivanja parametara tijekom razvoja novog velikog vertikalnog generatora. Matrica parametara generatora otkriva mogućnosti poboljšanja procesa i ukazuje na eventualne nedostatke u tradicionalnom razvojnom procesu, što će se također vidjeti u nastavku. Potrebno je spomenuti da se u literaturi mogu naći primjeri primjene DSM-a na parametrima [25,38,40,45,93,113,143,144,145], što je ujedno bila motivacija istraživanja izloženog u nastavku.

Pristup razvoju matrice parametara slijedi isti postupak kao i kod izrade matrice proračuna. Treba istaći da se u ovoj matrici rabi pojam „zahtjevi kupca“, koji obuhvaća skup svih parametara na koje kupac može ili želi utjecati. Ti zahtjevi su slični onome što je u matrici proračuna nazvano „tenderski zahtjevi na proračune“. Svi zahtjevi kupca su ubačeni u jedan pojam jer ih je puno - kada bi se za svaki zahtjev kupca napisao po jedan parametar, veličina matrice bi se znatno povećala, a već sada je prevelika, s druge strane, ne bi dobili nikakvu posebnu informaciju iz te podjele zahtjeva na parametre. Osim toga, mogu se naći i radovi drugih autora koji također upotrebljavaju jedan pojam za sve zahtjeve kupca, neki su [120,146]. Zahtjevi kupca su redovito specifični za svaki projekt, a mogu obuhvatiti vrlo različite parametre koji se moraju zadovoljiti, bio to zahtjev na dozvoljena naprezanja u materijalima, brojevi ciklusa koje konstrukcija mora zadovoljiti tj. životni vijek, akumulirano oštećenje, faktor vjerojatnosti, neki konstrukcijski parametar poput promjera temelja na koji se učvršćuje generator, možda broj ruku donjeg nosača, tlak kočenja, promjer jame za gornji pokrov, nosivost krana, dimenzije otvora ulaznih vrata u strojarnicu ili možda dimenzije pristupnog tunela - ako je strojarnica ispod zemlje. Kako je već rečeno, zahtjeva kupca je puno i mijenjaju se od kupca do kupca i od projekta do projekta. U uvjetima velike konkurencije i borbe za opstanak na tržištu, u današnje vrijeme, kupac svojim zahtjevima može zadirati praktički u bilo koji dio generatora.

Obzirom na tu činjenicu, zahtjevi kupca su nužni dio ove matrice.

Osim zahtjeva kupca, u matrici se upotrebljava termin „turbinski podaci“. Proizvođač turbine nakon izrade proračuna iste, određuje parametre koji su bitni za nastavak izrade projekta, konstrukcije i proračuna generatora. Od turbinskih parametara potrebni su isti parametri koji su potrebni i za izradu proračuna (spomenuto u poglavlju 5.1.) - brzina teoretskog pobjega, brzina radnog pobjega, masa turbinskog vratila, masa turbinskog kola i sile prouzrokovane vodom. Turbinski parametri također obuhvaćaju dimenzije međuvratila, krutosti i prigušenja turbinskog ležaja, podatke o prirubničkom spoju između generatora i turbine itd.

Stoga, zahtjevi kupca i turbinski podaci su skup parametara nužnih za definiranje konstrukcijskih parametara generatora, što se također može vidjeti i iz tablice međuovisnosti parametara na slijedećih par strana u nastavku.

S obzirom na to da je ova matrica napravljena u sinergiji projekta i konstrukcije, odabir parametara za njezinu izradu bio je velik izazov i trajao je par tjedana. Najprije su projektant i konstruktor, u suradnji odabrali parametre koji su najvažniji za izradu elektromagnetnog proračuna. Zaključeno je da bi samo tih parametara moglo biti za jednu matricu, pa je bilo potrebno već tu odabrati samo važnije parametre koji su bitni projektantima. U konačnoj verziji odabrana su 53 parametra. Nakon odabira tih parametara, identificirane su veze među njima, što je i provjereno u više iteracija.

Završetkom identifikacija relacija projektnih parametara, prema montažnom nacrtu (postojećeg) generatora, dodavani su važniji konstrukcijski i mehanički parametri za svaki bitniji podsklop, pritom pazeći da se ne ide preduboko u sve parametre, kako bi konačna matrica ostala razumne veličine. Parametri koji nisu smatrani potrebnima za ovu analizu izbačeni su ili su objedinjeni, jer kada bi se uključili svi parametri koji definiraju generator, matrica bi imala preko 2.000 parametara. To bi dodatno znatno otežalo identifikaciju relacija, koja je i na matrici ove veličine otežana, a osim toga, korišteni program može particionirati matrice do maksimalno 250 parametara, stoga korištenim programom ne bi bilo moguće particionirati matricu. To je zamijećeno već u samom početku, kada se pristupilo izradi matrice i stav je da to ovdje nije ni bitno, jer cilj je napraviti matricu koja će se poslije povezati s dokumentacijom i proračunima, a kasnijom primjenom te matrice u praksi se ta matrica može lako doradivati i dopunjavati, ako se pokaže potreba za dopunom i promjenom u relacijama.

Odabirom svih parametara, prva je verzija matrice imala 215 parametara, što je kasnijim intervjuima s ostalim konstruktorima prošireno na konačni broj od 220 parametara.

Kako bi se ubrzao proces identifikacije svih relacija, autor je napravio prvu identifikaciju relacija. Radi smanjenja mogućnosti pogreške, autor je podijelio matricu s točno označenim dijelom matrice na devet konstruktora (svaki od konstruktora dobio je označen dio matrice za koji je

specijaliziran) i svaki konstruktor je modificirao i komentirao, što misli da bi trebale biti relacije između tih parametara.

Nakon komentara, uočeno je da nisu svi konstruktori u potpunosti shvatili kako bi trebalo popunjavati relacije, te je zaključeno da je najbolje rješenje održati više zajedničkih sastanaka od 5 do 6 konstruktora, na kojima će se prolaziti kroz sve relacije, kako bi se svi usuglasili. Uočeno je da za neke relacije postoji više mišljenja, a takvi su slučajevi rješavani na način da se o tome raspravljalo dok se nije postigao zajednički dogovor.

Završetkom tih sastanaka, napravljena je još jedna iteracija prolaska kroz sve relacije putem grupnih sastanaka, ali ovog puta s manje ljudi (istih kao i u prethodnom krugu). Razlog smanjenog broja ljudi je činjenica da su ti sastanci iziskivali puno vremena, a poslovne prilike konstruktorima ne dozvoljavaju trošenje toliko vremena na aktivnosti koje nisu vezane striktno za njihov posao. U tom krugu uočeno je da ponovnim prolaskom kroz relacije, ti isti ljudi imaju drugačija mišljenja o nekim relacijama. To je uvelo konfuziju, pa se postavilo pitanje točnosti konačne matrice.

Završetkom sastanaka, u cilju smanjenja greške u ukupnom poretku parametara, napravljena je lista s parametrima sortiranima po redoslijedu dobivenom iz particionirane matrice (što bi trebalo biti suboptimalno rješenje), te je isti slijed podijeljen više konstruktorima i projekantima za komentiranje. Neki komentari su uvaženi i to je dovelo do konačne matrice, koja se nalazi u nastavku ovog rada.

Iz svih tih sastanaka, listi i intervjuu, može se zaključiti da matrica ima više rješenja (suboptimalnih), vrlo vjerojatno svaki taj pristup je ispravan, ali pitanje je ispravnosti konačne matrice. Postavilo se pitanje može li se matrica takve veličine napraviti da bude točna, u slučaju da se radi samo intervjuima bez potvrde u praksi?

Naknadnim opsežnim razmišljanjem o problemu, shvaćeno je da se na taj način ni ne može dobiti jedinstvena matrica (koja bi garantirala ponovljivost kod svakog intervjuu i kod više ljudi), jer svaki krug razgovora uvede neka nova razmišljanja i nove relacije, čime se cijela slika o promatranom sustavu mijenja. Jedini ispravni pristup je upotreba zadnje verzije matrice, dane u ovom radu, takve kakva je, te ju je potrebno godinama dopunjavati i ispravljati prema stvarnom stanju. Kroz 10-ak godina korištenja i dorade bi se trebala dobiti ispravna matrica parametara, koja bi bila potpuno primjenjiva u praksi. Neki autori su također spomenuli da nikada nisu završili, svaki put su težili dubljem razumijevanju promatranog sustava [84].

Upravo ova problematika zakomplicirala je donošenje nekih konkretnih zaključaka o idealnoj strukturi parametara.

U nastavku je najprije pokazana tablica međuovisnosti parametara. Konačna matrica parametara prije particioniranja dana je na slici 5.11. Radi bolje vidljivosti, mjesta s vezom obojena su u crno.

Nakon partitioniranja dobije se matrica prikazana na slici 5.12. Zahtjevi kupca su prvi parametar, što je bilo i očekivano, a nakon zahtjeva kupaca su turbinski podaci. Nakon tih parametara, koje određuje kupac i proizvođač turbine, slijede parametri koje definira projekt (tj. elektromagnetski proračun). Zanimljivo je da se u tim parametrima mogu naći i neki konstrukcijski parametri, za koje se može reći da su konstantni, ili ih je definirao kupac ili proizvođač turbine. To su parametri poput unutarnjeg promjera rupe u vratilu, zatim udaljenost od donjeg ležaja do prirubnice generatora (parametri rednog broja 58 i 59), materijal pera (parametar 87). Brzina kod koje počinje trajno kočenje (tj. parametar pod brojem 104) obično je konstantna, ako nema nekog zahtjeva kupca, stoga je parametar definiran nakon određivanja nazivne brzine vrtnje. Ista stvar vrijedi i za parametar brzina vrtnje kod koje počinje trajno kočenje. Također, neki od parametara koji se nalaze pri vrhu su materijal zvijezde, koji je većinom obični konstrukcijski čelik oznake S355, radi potrebe da bude zavarljiv, te se po potrebi naprezanja u njemu smanjuju podebljavanjem korištenih ploča ili promjenom dizajna. Ista stvar vrijedi i za materijale: gornjeg nosača, kućišta, trapeznih letvi, odzivnih vijaka, tlačnih ploča, latice. Među parametrima koji su „standardni“, su dimenzije nekih dijelova poput širine latice (parametar broj 212) i duljine zavora latice prema trapeznoj letvi (parametar 211). Ova dva parametra su konstantna, jer su dimenzije latice i trapezne letve uvijek iste za sve projekte.

Ukratko bi se suboptimalni slijed partitionirane matrice mogao napisati:

- zahtjevi kupca
- turbinski parametri
- konstantni parametri (poput materijala, latice, trapeznih letvi itd.)
- projektni parametri (iz elektromagnetskog proračuna)
- konstrukcijski parametri.

| Ime parametra                                   | Ovisi o:   |
|---|--|
| Zahtjevi kupca                                  |  |
| Turbinski podaci                                | Zahtjevi kupca,  |
| Napon generatora                                | Zahtjevi kupca,  |
| Struja generatora                               | Napon generatora, Snaga generatora,  |
| Snaga generatora                                | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,  |
| cos fi  | Zahtjevi kupca,  |
| Struja uzbude                                   | Napon generatora, Struja generatora, Snaga generatora, cos fi, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Visina statorskog utora, Zračni raspored, Širina polne jezgre, Širina polne papuče, Visina polne jezgre, Masa polnog namota, Broj zavoja u svitku statora, Broj paralelnih grana, Korak statorskog namota,  |
| Napon uzbude                                    | Zahtjevi kupca, Napon generatora, Struja generatora, Snaga generatora, cos fi, Struja uzbude, Frekvencija, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Visina statorskog utora, Zračni raspored, Širina polne jezgre, Širina polne papuče, Visina polne jezgre, Masa polnog namota, Broj zavoja u svitku statora, Broj paralelnih grana, Korak statorskog namota,  |
| Frekvencija                                     | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,  |
| Nazivni broj okretaja                           | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,  |
| Pobjeg  | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,  |
| Vanjski promjer rotora (polova)                 | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Unutarnji promjer statorskog paketa, Zamašni moment,  |
| Unutarnji promjer lančanog prstena              | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Vanjski promjer lančanog prstena, Materijal lima lančanog prstena, Zamašni moment, Visina rashladnih kanala u jarmu rotora, Lančani minimalni radijalni presjek,   |
| Vanjski promjer lančanog prstena                | Unutarnji promjer lančanog prstena,  |
| Vanjski promjer statorskog paketa               | Snaga generatora, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Visina statorskih utora,  |
| Unutarnji promjer statorskog paketa             | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci, Snaga generatora, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Vanjski promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora,  |
| Aksijalna duljina paketa                        | Snaga generatora, Nazivni broj okretaja, Vanjski promjer rotora (polova), Vanjski promjer statorskog paketa, Unutarnji promjer statorskog paketa, Broj statorskih utora, Omjer kratkog spoja, Zamašni moment, Broj zavoja u svitku statora, Korak statorskog namota, Vratilo kritična brzina,  |
| Broj statorskih kanala za hlađenje              | Snaga generatora, Nazivni broj okretaja, Vanjski promjer rotora (polova), Vanjski promjer statorskog paketa, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Visina statorskih kanala za hlađenje, Broj statorskih utora, Materijal statorskih limova, Gubici, Omjer kratkog spoja, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| Visina statorskih kanala za hlađenje            | Snaga generatora, Gubici, Količina zraka za hlađenje generatora,   |
| Broj statorskih utora                           | Nazivni broj okretaja, Vanjski promjer rotora (polova), Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Omjer kratkog spoja,  |
| Širina statorskog utora                         | Napon generatora, Struja generatora, Snaga generatora, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Omjer kratkog spoja, Dionih vodiči statora,   |
| Visina statorskog utora                         | Napon generatora, Struja generatora, Snaga generatora, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Širina statorskog utora, Dionih vodiči statora, Broj zavoja u svitku statora,  |
| Zračni raspored                                 | Nazivni broj okretaja, Vanjski promjer rotora (polova), Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Omjer kratkog spoja, Broj zavoja u svitku statora, Broj paralelnih grana,  |
| Širina polne jezgre                             | Snaga generatora, cos fi, Struja uzbude, Napon uzbude, Frekvencija, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Unutarnji promjer statorskog paketa, Širina polne jezgre,   |
| Širina polne papuče                             | Snaga generatora, cos fi, Struja uzbude, Napon uzbude, Frekvencija, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Unutarnji promjer statorskog paketa, Širina polne jezgre,   |
| Visina polne jezgre                             | Snaga generatora, cos fi, Struja uzbude, Nazivni broj okretaja, Broj statorskih utora,   |
| Debljina KPP                                    | Zahtjevi kupca, Frekvencija, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Visina polne papuče, Promjer vodiča prigušnog kaveza,   |
| Visina polne papuče                             | Turbinski podaci, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Debljina KPP, Promjer vodiča prigušnog kaveza,   |
| Broj prigušnih vodiča po polu                   | Broj statorskih utora, Širina polne papuče, Promjer vodiča prigušnog kaveza,   |
| Promjer vodiča prigušnog kaveza                 |  |
| Visina otvora utora na pp iznad prigušnog štapa | Zračni raspored,   |
| Materijal statorskih limova                     | Zahtjevi kupca, Gubici,  |
| Materijal polnog lima                           | Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Gubici, Masa polnog namota, Masa polne jezgre,  |
| Materijal lima lančanog prstena                 | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Unutarnji promjer lančanog prstena, Vanjski promjer lančanog prstena, Vanjski promjer statorskog paketa, Masa polnog namota, Visina rashladnih kanala u jarmu rotora, Lančani minimalni radijalni presjek, Lančani preklon limova, Lančani veličina laste / čekića, Masa polne jezgre,  |
| Gubici  | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci, Struja generatora, Snaga generatora, cos fi, Struja uzbude, Napon uzbude, Frekvencija, Vanjski promjer statorskog paketa, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih kanala za hlađenje, Visina statorskih kanala za hlađenje, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Visina statorskog utora, Zračni raspored, Širina polne jezgre, Širina polne papuče, Visina polne jezgre, Debljina KPP, Visina polne papuče, Broj prigušnih vodiča po polu, Promjer vodiča prigušnog kaveza, Visina otvora utora na pp iznad prigušnog štapa, Materijal statorskih limova, Materijal polnog lima, Dionih vodiči statora, Broj zavoja u svitku statora, Broj paralelnih grana, Zaklinjenje utora, Korak statorskog namota, Visina tlačnog prsta, Sila na GKL, Sila na DVL, Zračnost u ležajima, |
| Masa statorskog namota                          | Napon generatora, Nazivni broj okretaja, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Visina statorskog utora, Visina tlačnog prsta,  |
| Masa polnog namota                              | Snaga generatora, Struja uzbude, Omjer kratkog spoja,  |
| Omjer kratkog spoja                             | Zahtjevi kupca, Snaga generatora, Struja uzbude, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Visina statorskog utora, Zračni raspored, Korak statorskog namota,  |
| Zamašni moment                                  | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,  |
| Nazivni moment                                  | Snaga generatora, Frekvencija, Nazivni broj okretaja,  |
| Moment 2ks                                      | Snaga generatora, Broj statorskih utora, Nazivni moment, Korak statorskog namota,  |
| Moment 3ks                                      | Snaga generatora, Broj statorskih utora, Nazivni moment, Korak statorskog namota,  |
| Moment PS                                       | Snaga generatora, Broj statorskih utora, Nazivni moment, Korak statorskog namota,  |
| Fm  | Snaga generatora, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Omjer kratkog spoja, Korak statorskog namota,  |
| Fm50% ks polova                                 | Snaga generatora, Struja uzbude, Napon uzbude, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Omjer kratkog spoja, Korak statorskog namota,   |

|  |   |
|--|---|
| Krutost magnetnog polja                                      | Struja uzbude, Napon uzbude, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Zračni raspod, Fm, Fm50% ks polova, Korak statorskog namota,   |
| Dionih vodiča statora  | Struja generatora, Nazivni broj okretaja, Širina statorskog utora, Gubici, Broj paralelnih grana,   |
| Broj zavoja u svitku statora                                 | Nazivni broj okretaja, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Broj paralelnih grana,   |
| Broj paralelnih grana  | Struja generatora, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih utora, Broj zavoja u svitku statora,  |
| Zaklinjenje utora  | Zahtjevi kupca, Širina statorskog utora,  |
| Korak statorskog namota                                      | Broj statorskih utora,  |
| Visina tlačnog prsta   | Unutarnji promjer lančanog prstena, Broj statorskih utora, Širina statorskog utora, Paket tlak u paketu, Paket broj tlačnih prstiju,  |
| Visina rashladnih kanala u jarmu rotora                      | Unutarnji promjer statorskog paketa, Gubici, Zamašni moment, Lančani broj rashladnih kanala, Lančani širina ventilacijskog kanala, Količina zraka za hlađenje generatora,   |
| Vratilo kritična brzina                                      | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Zamašni moment, Krutost magnetnog polja, Vratilo promjer donjeg dijela, Vratilo unutarnji promjer, Vratilo udaljenost donjeg ležaja od prirubničkog spoja, Vratilo udaljenost između ležaja, Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale, Vratilo promjer ispod zvijezde, Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Masa rotora generatora, Masa aktivnog dijela rotora, Masa vratila, Krutost ulja GVL, Prigušenje ulja GVL, Krutost ulja DVL, Prigušenje ulja DVL, Krutost gornjeg nosača sa kućištem, Krutost donjeg nosača, Masa zvijezde, Torzijska krutost zvijezde, |
| Vratilo vanjski promjer prirubnice                           | Turbinski podaci, Vratilo promjer simetrale vijaka na prirubnici, Vratilo broj vijaka na prirubnici, Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici,  |
| Vratilo debljina prirubnice                                  | Turbinski podaci, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Vratilo vanjski promjer prirubnice, Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici,  |
| Vratilo promjer donjeg dijela                                | Zamašni moment, Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Vratilo kritična brzina, Vratilo vanjski promjer prirubnice,   |
| Vratilo unutarnji promjer                                    | Turbinski podaci,   |
| Vratilo udaljenost donjeg ležaja od prirubničkog spoja       | Turbinski podaci,   |
| Vratilo udaljenost između ležaja                             | Vratilo kritična brzina, Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale, Lančani visina,  |
| Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale | Lančani visina,   |
| Vratilo promjer ispod zvijezde                               | Zamašni moment, Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Vratilo kritična brzina,  |
| Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja                         | Turbinski podaci, Fm, Fm50% ks polova, Vratilo kritična brzina,   |
| Masa rotora generatora                                       | Zamašni moment, Masa aktivnog dijela rotora, Masa vratila, Masa zvijezde,   |
| Masa aktivnog dijela rotora                                  | Unutarnji promjer lančanog prstena, Vanjski promjer lančanog prstena, Broj prigušnih vodiča po polu, Promjer vodiča prigušnog kaveza, Materijal lima lančanog prstena, Masa polnog namota, Visina rashladnih kanala u jarmu rotora, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani veličina svornjaka, Materijal svornjaka na lančanom, Lančani visina, Lančani debljina gornje tlačne ploče, Lančani debljina donje tlačne ploče, Lančani debljina lima, Lančani broj rashladnih kanala, Lančani širina ventilacijskog kanala, Masa polne ležaje, Pol broj polova,  |
| Masa vratila   | Vratilo vanjski promjer prirubnice, Vratilo debljina prirubnice, Vratilo promjer donjeg dijela, Vratilo unutarnji promjer, Vratilo udaljenost donjeg ležaja od prirubničkog spoja, Vratilo udaljenost između ležaja, Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale, Vratilo promjer ispod zvijezde, Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja,  |
| Materijal vratila  | Turbinski podaci, Zamašni moment, Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Vratilo promjer donjeg dijela, Vratilo unutarnji promjer, Vratilo promjer iznad gornjeg ležaja (grlo),  |
| Sila na GKL  | Turbinski podaci, Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Fm, Fm50% ks polova, Vratilo udaljenost donjeg ležaja od prirubničkog spoja, Vratilo udaljenost između ležaja, Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale, Masa rotora generatora,   |
| Krutost ulja GVL   | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Sila na GKL, Prigušenje ulja GVL, Zračnost u ležajima, Preload ležaja, GVL Broj segmenata, GVL Površina segmenta, GNL Broj segmenata, GNL Površina segmenta,   |
| Prigušenje ulja GVL  | Sila na GKL, Krutost ulja GVL, Zračnost u ležajima, Preload ležaja, GVL Broj segmenata, GVL Površina segmenta, GNL Broj segmenata, GNL Površina segmenta,   |
| Sila na DVL  | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Fm, Fm50% ks polova, Vratilo udaljenost između ležaja, Vratilo udaljenost između donjeg ležaja i magnetne simetrale, Masa rotora generatora,   |
| Krutost ulja DVL   | Nazivni broj okretaja, Pobjeg, Sila na DVL, Prigušenje ulja DVL, Zračnost u ležajima, Preload ležaja, DVL Broj segmenata, DVL Površina segmenta,  |
| Prigušenje ulja DVL  | Sila na DVL, Krutost ulja DVL, Zračnost u ležajima, Preload ležaja, DVL Broj segmenata, DVL Površina segmenta,  |
| Krutost gornjeg nosača sa kućištem                           | Vratilo kritična brzina, Kućište visina, Kućište broj katova, Kućište broj otvora za hladnjake, Kućište površina otvora za hladnjake, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište debljina plašta, Kućište broj cijevi, Kućište dimenzije cijevi, Kućište broj rebra, Kućište debljina rebra, Materijal gornjeg nosača, Materijal kućišta, Paket debljina gornje prirubnice,  |
| Krutost donjeg nosača  | Vratilo kritična brzina, Donji nosač promjer simetrale oslonaca, Donji nosač dimenzije ruku, Donji nosač broj ruku,   |
| Zračnost u ležajima  | Preload ležaja,   |
| Preload ležaja   | Vratilo promjer donjeg dijela, Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Zračnost u ležajima,   |
| Vratilo promjer simetrale vijaka na prirubnici               | Turbinski podaci, Nazivni moment, Moment PS,  |
| Vratilo broj vijaka na prirubnici                            | Turbinski podaci, Nazivni moment, Moment PS, Vratilo promjer simetrale vijaka na prirubnici, Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici,  |
| Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici               | Turbinski podaci, Nazivni moment, Moment PS, Vratilo promjer simetrale vijaka na prirubnici,  |
| Vratilo materijal vijaka i matice                            | Turbinski podaci, Nazivni moment, Moment PS, Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici,  |
| Vratilo sila u vijcima                                       | Turbinski podaci, Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici, Vratilo materijal vijaka i matice,  |
| Vratilo izduženje vijaka                                     | Vratilo veličina vijaka i matice na prirubnici, Vratilo sila u vijcima,   |
| Vratilo broj pera na zvijezdi                                | Nazivni moment, Moment PS, Vratilo širina pera, Vratilo materijal pera,   |
| Vratilo visina pera  | Vratilo promjer ispod zvijezde, Vratilo širina pera,  |
| Vratilo širina pera  | Vratilo promjer ispod zvijezde, Vratilo visina pera,  |
| Vratilo materijal pera                                       |   |
| Vratilo promjer iznad gornjeg ležaja (grlo)                  | Turbinski podaci, Sila na GKL,  |
| Zvijezda broj letvi  | Lančani broj limova u sloju,  |
| Zvijezda broj ruku   | Turbinski podaci, Masa aktivnog dijela rotora, Masa vratila, Zvijezda broj letvi, Materijal zvijezde,   |
| Zvijezda dimenzije ruku (prstenova)                          | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Zvijezda broj ruku, Zvijezda visina letve, Materijal zvijezde,   |
| Zvijezda debljina vertikalnih rebra                          | Masa aktivnog dijela rotora, Zvijezda dimenzije ruku (prstenova), Materijal zvijezde,   |
| Zvijezda broj vertikalnih rebra                              | Masa aktivnog dijela rotora, Zvijezda broj ruku, Materijal zvijezde,  |

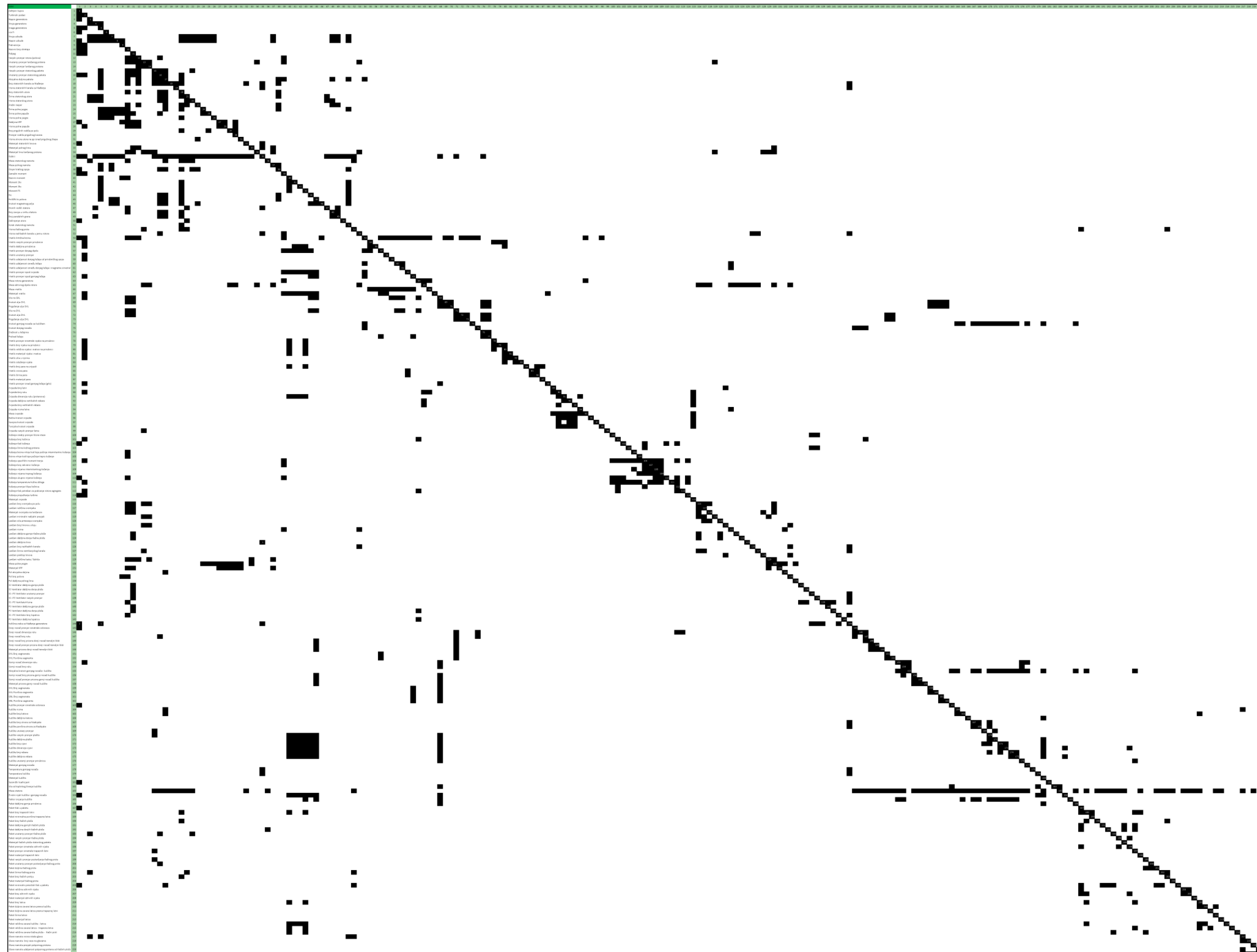
|  |   |
|--|---|
| Zvijezda visina letve  | Lančani visina ,  |
| Masa zvijezde  | Zvijezda broj letvi, Zvijezda broj ruku, Zvijezda dimenzije ruku (prstenova), Zvijezda debljina vertikalnih rebara, Zvijezda broj vertikalnih rebara, Zvijezda visina letve, Materijal zvijezde,  |
| Bočna krutost zvijezde                                       | Zvijezda broj ruku, Zvijezda dimenzije ruku (prstenova), Zvijezda debljina vertikalnih rebara, Zvijezda broj vertikalnih rebara, Materijal zvijezde,  |
| Savojna krutost zvijezde                                     | Zvijezda broj ruku, Zvijezda debljina vertikalnih rebara, Zvijezda broj vertikalnih rebara, Materijal zvijezde,   |
| Torzijska krutost zvijezde                                   | Zvijezda broj ruku, Zvijezda dimenzije ruku (prstenova), Zvijezda debljina vertikalnih rebara, Zvijezda broj vertikalnih rebara, Materijal zvijezde,  |
| Zvijezda vanjski promjer letve                               | Unutarnji promjer lančanog prstena,   |
| Kočenje srednji promjer klizne staze                         | SS i PS Ventilator unutarnji promjer, SS i PS Ventilator vanjski promjer,   |
| Kočenje broj kočnica   | Turbinski podaci, Masa rotora generatora, Donji nosač broj ruku,  |
| Kočenje tlak kočenja   | Zahtjevi kupca, Kočenje specifični moment trenja, Kočenje ukupno vrijeme kočenja, Kočenje promjer klipa kočnice,  |
| Kočenje širina kočnog prstena                                | Kočenje specifični moment trenja, SS i PS Ventilator unutarnji promjer, SS i PS Ventilator vanjski promjer,   |
| Kočenje brzina vrtnje kod koje počinje intermitentno kočenje | Nazivni broj okretaja ,   |
| Brzina vrtnje kod koje počinje trajno kočenje                | Nazivni broj okretaja ,   |
| Kočenje specifični moment trenja                             | Turbinski podaci, Zamašni moment, Kočenje srednji promjer klizne staze, Kočenje broj kočnica, Kočenje tlak kočenja, Kočenje širina kočnog prstena, Kočenje brzina vrtnje kod koje počinje intermitentno kočenje, Brzina vrtnje kod koje počinje trajno kočenje, Kočenje broj sekvenci kočenja, Kočenje vrijeme intermitentnog kočenja, Kočenje vrijeme trajnog kočenja, Kočenje promjer klipa kočnice, Kočenje propuštanje turbine, |
| Kočenje broj sekvenci kočenja                                | Zamašni moment, Kočenje specifični moment trenja, Kočenje vrijeme intermitentnog kočenja, Kočenje vrijeme trajnog kočenja, Kočenje promjer klipa kočnice, Kočenje propuštanje turbine,  |
| Kočenje vrijeme intermitentnog kočenja                       | Kočenje brzina vrtnje kod koje počinje intermitentno kočenje, Kočenje specifični moment trenja, Kočenje broj sekvenci kočenja, Kočenje vrijeme trajnog kočenja,   |
| Kočenje vrijeme trajnog kočenja                              | Brzina vrtnje kod koje počinje trajno kočenje, Kočenje specifični moment trenja, Kočenje broj sekvenci kočenja, Kočenje vrijeme intermitentnog kočenja,   |
| Kočenje ukupno vrijeme kočenja                               | Zahtjevi kupca, "Nazivni broj okretaja", "Zamašni moment", "Kočenje srednji promjer klizne staze", "Kočenje broj kočnica", "Kočenje tlak kočenja", "Kočenje vrijeme intermitentnog kočenja", "Kočenje vrijeme trajnog kočenja", "Kočenje promjer klipa kočnice", "Kočenje propuštanje turbine",   |
| Kočenje temperatura kočne obloge                             | Turbinski podaci, Kočenje srednji promjer klizne staze, Kočenje broj kočnica, Kočenje tlak kočenja, Kočenje širina kočnog prstena, Kočenje brzina vrtnje kod koje počinje intermitentno kočenje, Brzina vrtnje kod koje počinje trajno kočenje, Kočenje broj sekvenci kočenja,  |
| Kočenje promjer klipa kočnice                                | Kočenje broj kočnica, Kočenje specifični moment trenja,   |
| Kočenje tlak potreban za podizanje rotora agregata           | Turbinski podaci, Masa rotora generatora, Kočenje broj kočnica, Kočenje promjer klipa kočnice,  |
| Kočenje propuštanje turbine                                  | Zahtjevi kupca, Turbinski podaci,   |
| Materijal zvijezde   |   |
| Lančani broj svornjaka po polu                               | Nazivni broj okretaja , Pobjeg, Unutarnji promjer lančanog prstena, Vanjski promjer lančanog prstena, Lančani veličina svornjaka, Materijal svornjaka na lančanom, Masa polne jezgre,   |
| Lančani veličina svornjaka                                   | Nazivni broj okretaja , Pobjeg, Lančani broj svornjaka po polu, Masa polne jezgre,  |
| Materijal svornjaka na lančanom                              | Nazivni broj okretaja , Pobjeg, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani preklap limova, Masa polne jezgre,  |
| Lančani minimalni radijalni presjek                          | Unutarnji promjer lančanog prstena, Vanjski promjer lančanog prstena, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani veličina svornjaka, Lančani veličina laste / čekića,  |
| Lančani sila pritezanja svornjaka                            | Lančani veličina svornjaka, Materijal svornjaka na lančanom,  |
| Lančani broj limova u sloju                                  | Unutarnji promjer lančanog prstena, Vanjski promjer lančanog prstena, Pol broj polova,  |
| Lančani visina   | Zamašni moment, Visina rashladnih kanala u jarmu rotora, Pol aksijalna duljina,   |
| Lančani debljina gornje tlačne ploče                         | Pobjeg, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani sila pritezanja svornjaka,  |
| Lančani debljina donje tlačne ploče                          | Pobjeg, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani sila pritezanja svornjaka,  |
| Lančani debljina lima  | Gubici,   |
| Lančani broj rashladnih kanala                               | Visina rashladnih kanala u jarmu rotora, Pol broj polova, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| Lančani širina ventilacijskog kanala                         | Unutarnji promjer lančanog prstena, Lančani broj svornjaka po polu, Lančani veličina svornjaka, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| Lančani preklap limova                                       | Lančani broj limova u sloju, Pol broj polova,   |
| Lančani veličina laste / čekića                              | Nazivni broj okretaja , Pobjeg, Vanjski promjer rotora (polova), Vanjski promjer lančanog prstena, Materijal polnog lima, Masa polnog namota, Masa polne jezgre,  |
| Masa polne jezgre  | Širina polne jezgre, Širina polne papuče, Visina polne jezgre, Debljina KPP, Visina polne papuče, Broj prigušnih vodiča po polu, Promjer vodiča prigušnog kaveza, Visina otvora utora na pp iznad prigušnog štapa, Materijal polnog lima, Lančani veličina laste / čekića,  |
| Materijal KPP  | Materijal KPP, Pol aksijalna duljina, Pol debljina polnog lima,   |
| Pol aksijalna duljina  | Nazivni broj okretaja , Pobjeg, Debljina KPP, Visina polne papuče, Broj prigušnih vodiča po polu, Promjer vodiča prigušnog kaveza, Visina otvora utora na pp iznad prigušnog štapa, Masa polnog namota, Lančani veličina laste / čekića,  |
| Pol broj polova  | Frekvencija, Nazivni broj okretaja ,  |
| Pol debljina polnog lima                                     |   |
| SS Ventilator debljina gornje ploče                          | Pobjeg,   |
| SS Ventilator debljina donje ploče                           | Pobjeg,   |
| SS i PS Ventilator unutarnji promjer                         | Pobjeg, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| SS i PS Ventilator vanjski promjer                           | Pobjeg, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| SS i PS Ventilator Visina                                    | Nazivni broj okretaja , SS Ventilator debljina gornje ploče, SS Ventilator debljina donje ploče, PS Ventilator debljina gornje ploče, PS Ventilator debljina donje ploče, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| PS Ventilator debljina gornje ploče                          | Pobjeg,   |
| PS Ventilator debljina donje ploče                           | Pobjeg, Masa rotora generatora,   |
| SS i PS Ventilator broj lopatica                             | Nazivni broj okretaja , Količina zraka za hlađenje generatora,  |

|   |   |
|---|---|
| PS Ventilator debljina lopatica                       | Masa rotora generatora,   |
| Količina zraka za hlađenje generatora                 | Zahtjevi kupca, Snaga generatora, Gubici, SS i PS Ventilator unutarnji promjer, SS i PS Ventilator vanjski promjer, SS i PS Ventilator/visina, SS i PS Ventilator broj lopatica,  |
| Donji nosač promjer simetrale oslonaca                | Zahtjevi kupca,   |
| Donji nosač dimenzije ruku                            | Sila na DVL, Krutost donjeg nosača, Kočenje promjer klipa kočnice, Kočenje tlak potreban za podizanje rotora agregata, Donji nosač promjer simetrale oslonaca, Donji nosač broj ruku,   |
| Donji nosač broj ruku                                 | Unutarnji promjer statorskog paketa, Sila na DVL, Krutost donjeg nosača, Donji nosač promjer simetrale oslonaca,  |
| Donji nosač broj prizona donji nosač-temeljni blok    | Fm50% ks polova, Sila na DVL, Donji nosač broj ruku,  |
| Donji nosač promjer prizona donji nosač-temeljni blok | Fm50% ks polova, Sila na DVL, Donji nosač broj prizona donji nosač-temeljni blok,   |
| Materijal prizona donji nosač-temeljni blok           | Fm50% ks polova, Sila na DVL, Donji nosač broj prizona donji nosač-temeljni blok, Donji nosač promjer prizona donji nosač-temeljni blok,  |
| DVL Broj segmenata                                    | Vratilo promjer donjeg dijela, Sila na DVL,   |
| DVL Površina segmenta                                 | Vratilo promjer donjeg dijela, Sila na DVL, DVL Broj segmenata,   |
| Gornji nosač dimenzije ruku                           | Turbinski podaci, Sila na GKL, Gornji nosač broj ruku, Aksijalna krutost gornjeg nosača i kućišta, Kućište unutarnji promjer priрубnica, Materijal gornjeg nosača,  |
| Gornji nosač broj ruku                                | Sila na GKL, Aksijalna krutost gornjeg nosača i kućišta, Kućište unutarnji promjer priрубnica,  |
| Aksijalna krutost gornjeg nosača i kućišta            | Gornji nosač dimenzije ruku, Gornji nosač broj ruku, Kućište promjer simetrale oslonaca, Kućište visina, Kućište broj otvora za hladnjake, Kućište površina otvora za hladnjake, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište debljina plašta, Kućište broj cijevi, Kućište dimenzije cijevi, Kućište broj rebara, Kućište debljina rebara, Kućište unutarnji promjer priрубnica, Materijal gornjeg nosača, Materijal kućišta, Paket debljina gornje priрубnice, Paket broj trapeznih letvi, Paket promjer simetrale trapeznih letvi,  |
| Gornji nosač broj prizona gornji nosač-kućište        | Fm50% ks polova, Sila na GKL, Gornji nosač broj ruku,   |
| Gornji nosač promjer prizona gornji nosač-kućište     | Fm50% ks polova, Sila na GKL, Gornji nosač broj prizona gornji nosač-kućište,   |
| Materijal prizona gornji nosač-kućište                | Fm50% ks polova, Sila na GKL, Gornji nosač broj prizona gornji nosač-kućište, Gornji nosač promjer prizona gornji nosač-kućište,  |
| GVL Broj segmenata                                    | Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Sila na GKL,  |
| GVL Površina segmenta                                 | Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Sila na GKL, GVL Broj segmenata,  |
| GNL Broj segmenata                                    | Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Sila na GKL,  |
| GNL Površina segmenta                                 | Vratilo promjer ispod gornjeg ležaja, Sila na GKL, GNL Broj segmenata,  |
| Kućište promjer simetrale oslonaca                    | Zahtjevi kupca,   |
| Kućište visina  | Aksijalna duljina paketa, Glave namota visina istaka glava,   |
| Kućište broj katova                                   | Aksijalna duljina paketa, Kućište visina, Paket broj latica,  |
| Kućište debljina katova                               | Materijal kućišta,  |
| Kućište broj otvora za hladnjake                      | Količina zraka za hlađenje generatora, Kućište površina otvora za hladnjake, Kućište vanjski promjer plašta,  |
| Kućište površina otvora za hladnjake                  | Količina zraka za hlađenje generatora, Kućište broj otvora za hladnjake, Kućište vanjski promjer plašta,  |
| Kućište unutarnji promjer                             | Vanjski promjer statorskog paketa, Kućište debljina plašta,   |
| Kućište vanjski promjer plašta                        | Vanjski promjer statorskog paketa, Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL,   |
| Kućište debljina plašta                               | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Kućište vanjski promjer plašta, Materijal kućišta,   |
| Kućište broj cijevi                                   | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Kućište unutarnji promjer, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište dimenzije cijevi, Materijal kućišta,  |
| Kućište dimenzije cijevi                              | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Kućište broj cijevi, Materijal kućišta, Životni vijek kućišta i gornjeg nosača, Paket promjer simetrale odriрnih vijaka,   |
| Kućište broj rebara                                   | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište broj cijevi, Kućište debljina rebara, Materijal kućišta,   |
| Kućište debljina rebara                               | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Kućište broj rebara, Materijal kućišta, Životni vijek kućišta i gornjeg nosača,  |
| Kućište unutarnji promjer priрубnica                  | Sila na GKL, Paket promjer simetrale trapeznih letvi,   |
| Materijal gornjeg nosača                              |   |
| Temperatura gornjeg nosača                            | Gubici, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| Temperatura kućišta                                   | Gubici, Količina zraka za hlađenje generatora,  |
| Materijal kućišta                                     |   |
| Seizmički koeficijent                                 | Zahtjevi kupca,   |
| Sila od toplinskog širenja kućišta                    | Sila na GKL, Kućište promjer simetrale oslonaca, Temperatura kućišta, Masa statora,   |
| Masa statora  | Vanjski promjer statorskog paketa, Unutarnji promjer statorskog paketa, Aksijalna duljina paketa, Broj statorskih kanala za hlađenje, Visina statorskih kanala za hlađenje, Broj statorskih otvora, Širina statorskog otvora, Visina statorskog otvora, Materijal statorskih limova, Masa statorskog namota, Visina tlačnog prsta, Donji nosač promjer simetrale oslonaca, Donji nosač dimenzije ruku, Donji nosač broj ruku, Donji nosač broj prizona donji nosač-temeljni blok, Donji nosač promjer prizona donji nosač-temeljni blok, Materijal prizona donji nosač-temeljni blok, DVL Broj segmenata, DVL Površina segmenta, Gornji nosač dimenzije ruku, Gornji nosač broj ruku, Gornji nosač broj prizona gornji nosač-kućište, Gornji nosač promjer prizona gornji nosač-kućište, Materijal prizona gornji nosač-kućište, GVL Broj segmenata, GVL Površina segmenta, GNL Broj segmenata, GNL Površina segmenta, Kućište promjer simetrale oslonaca, Kućište visina, Kućište broj katova, Kućište debljina katova, Kućište broj otvora za hladnjake, Kućište površina otvora za hladnjake, Kućište unutarnji promjer, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište debljina plašta, Kućište broj cijevi, Kućište dimenzije cijevi, Kućište broj rebara, Kućište debljina rebara, Kućište unutarnji promjer priрубnica, Materijal gornjeg nosača, Materijal kućišta, Paket debljina gornje priрубnice, Paket broj trapeznih letvi, Paket broj tlačnih ploča, Paket debljina gornjih tlačnih ploča, Paket debljina donjih tlačnih ploča, Paket unutarnji promjer tlačne ploče, Paket vanjski promjer tlačne ploče, Paket materijal tlačnih ploča statorskog paketa, Paket materijal trapeznih letvi, Paket duljina tlačnog prsta, Paket širina tlačnog prsta, Paket broj tlačnih prstiju, Paket materijal tlačnog prsta, Paket veličina odriрnih vijaka, Paket broj odriрnih vijaka, Paket materijal odriрnih vijaka, Paket broj latica, Paket širina laticе, Paket materijal laticе, Glave namota visina istaka glava, Glave namota presjek potporne čestice, |
| Životni vijek kućišta i gornjeg nosača                | Zahtjevi kupca, Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Fm, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Temperatura kućišta, Materijal kućišta,  |
| Faktor izvjanja kućišta                               | Moment PS, Fm50% ks polova, Sila na GKL, Gornji nosač dimenzije ruku, Gornji nosač broj ruku, Kućište broj katova, Kućište broj otvora za hladnjake, Kućište površina otvora za hladnjake, Kućište vanjski promjer plašta, Kućište debljina plašta, Kućište broj cijevi, Kućište dimenzije cijevi, Kućište broj rebara, Kućište debljina rebara,  |
| Paket debljina gornje priрубnice                      | Sila na GKL, Materijal kućišta,   |
| Paket tlak u paketu                                   | Zahtjevi kupca,   |

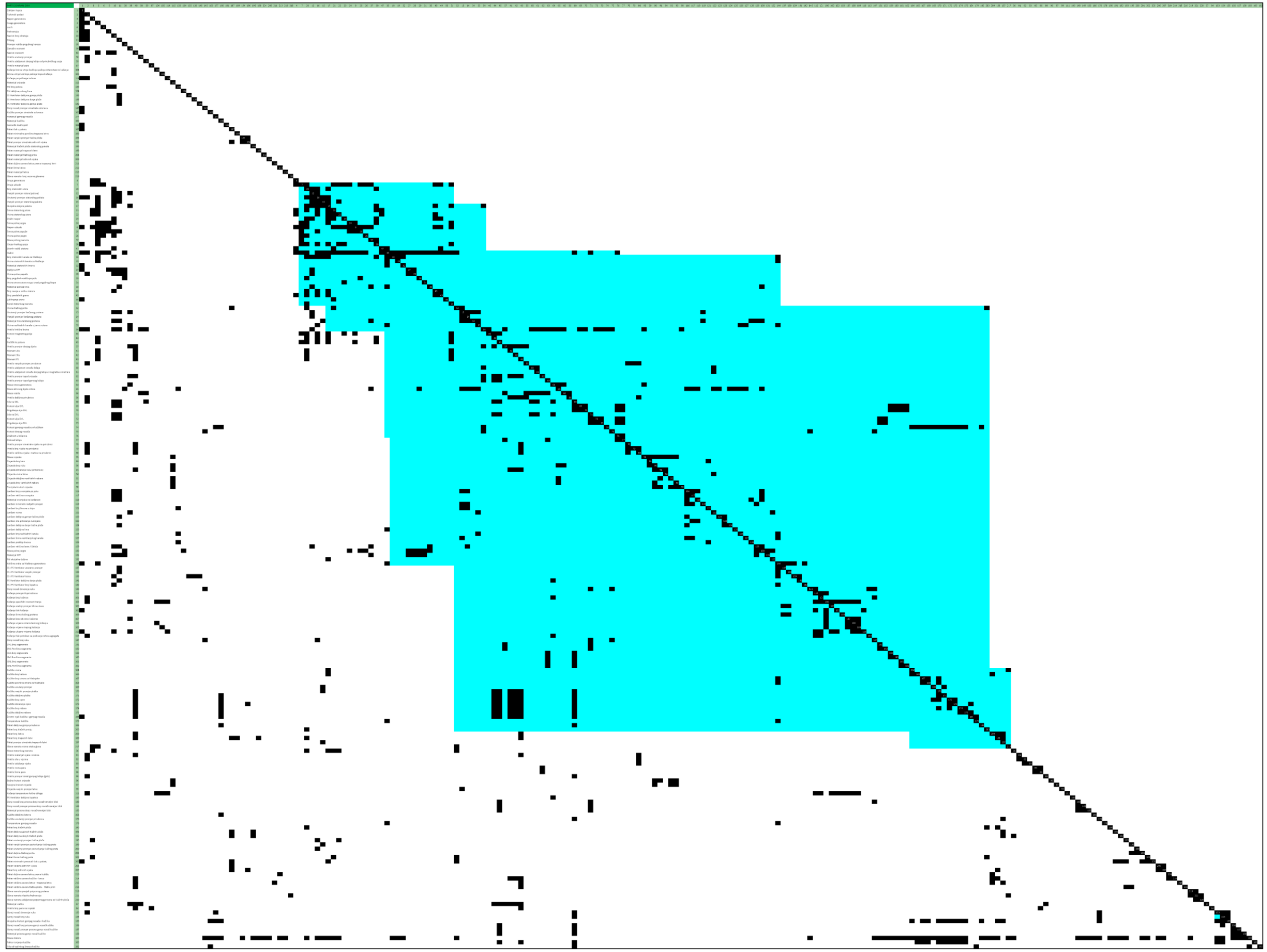


|  |  |
|--|--|
| Paket broj trapezних letvi                                 | Broj statorskih utora, Nazivni moment, Moment PS, Paket tlak u paketu, Paket minimalna površina trapezne letve, Paket promjer simetrale trapezних letvi, Paket materijal trapezних letvi,  |
| Paket minimalna površina trapezne letve                    |  |
| Paket broj tlačnih ploča                                   | Broj statorskih utora, Paket broj trapezних letvi, Paket broj tlačnih prstiju,   |
| Paket debljina gornjih tlačnih ploča                       | Paket tlak u paketu, Materijal tlačnih ploča statorskog paketa, Paket promjer simetrale trapezних letvi,   |
| Paket debljina donjih tlačnih ploča                        | Masa statorskog namota, Paket tlak u paketu, Materijal tlačnih ploča statorskog paketa, Paket promjer simetrale trapezних letvi,   |
| Paket unutarnji promjer tlačne ploče                       | Napon generatora, Unutarnji promjer statorskog paketa, Visina statorskog utora,  |
| Paket vanjski promjer tlačne ploče                         | Paket promjer simetrale odzivnih vijaka,   |
| Materijal tlačnih ploča statorskog paketa                  |  |
| Paket promjer simetrale odzivnih vijaka                    | Paket tlak u paketu, Paket vanjski promjer tlačne ploče,   |
| Paket promjer simetrale trapezних letvi                    | Vanjski promjer statorskog paketa,   |
| Paket materijal trapezних letvi                            |  |
| Paket vanjski promjer postavljanja tlačnog prsta           | Vanjski promjer statorskog paketa,   |
| Paket unutarnji promjer postavljanja tlačnog prsta         | Unutarnji promjer statorskog paketa,   |
| Paket duljina tlačnog prsta                                | Paket vanjski promjer postavljanja tlačnog prsta, Paket unutarnji promjer postavljanja tlačnog prsta,  |
| Paket širina tlačnog prsta                                 | Napon generatora, Širina statorskog utora, Visina tlačnog prsta, Paket broj tlačnih prstiju,   |
| Paket broj tlačnih prstiju                                 | Broj statorskih utora,   |
| Paket materijal tlačnog prsta                              |  |
| Paket minimalni preostali tlak u paketu                    | Zahtjevi kupca, Aksijalna duljina paketa, Visina tlačnog prsta, Paket tlak u paketu, Paket debljina gornjih tlačnih ploča, Paket debljina donjih tlačnih ploča, Paket unutarnji promjer tlačne ploče, Paket duljina tlačnog prsta, Paket širina tlačnog prsta, |
| Paket veličina odzivnih vijaka                             | Paket tlak u paketu, Paket broj odzivnih vijaka,   |
| Paket broj odzivnih vijaka                                 | Paket tlak u paketu, Paket broj trapezних letvi, Paket promjer simetrale odzivnih vijaka, Paket veličina odzivnih vijaka,  |
| Paket materijal odzivnih vijaka                            |  |
| Paket broj latica  | Nazivni moment, Moment PS, Paket broj trapezних letvi, Paket promjer simetrale trapezних letvi,  |
| Paket duljina zavora laticе prema kućištu                  | Paket broj latica, Paket širina laticе,  |
| Paket duljina zavora laticе prema trapeznoj letvi          |  |
| Paket širina laticе  |  |
| Paket materijal laticе                                     |  |
| Paket veličina zavora kućište - latica                     | Nazivni moment, Moment 2ks, Moment 3ks, Moment PS, Paket broj trapezних letvi, Paket broj latica, Paket duljina zavora laticе prema kućištu,   |
| Paket veličina zavora latica - trapezna letva              | Nazivni moment, Moment PS, Paket promjer simetrale trapezних letvi, Paket broj latica, Paket duljina zavora laticе prema trapeznoj letvi,  |
| Paket veličina zavora tlačna ploča - tlačni prsti          | Nazivni moment, Moment PS, Paket unutarnji promjer tlačne ploče, Paket vanjski promjer postavljanja tlačnog prsta,   |
| Glave namota visina istaka glava                           | Napon generatora, Snaga generatora, Korak statorskog namota, Visina tlačnog prsta,   |
| Glave namota broj veza na glavama                          | Glave namota visina istaka glava,  |
| Glave namota presjek potpornog prstena                     | Glave namota vlastita frekvencija,   |
| Glave namota udaljenost potpornog prstena od tlačnih ploča | Glave namota visina istaka glava, Glave namota vlastita frekvencija,   |
| Glave namota vlastita frekvencija                          | Glave namota visina istaka glava, Glave namota broj veza na glavama, Glave namota presjek potpornog prstena, Glave namota udaljenost potpornog prstena od tlačnih ploča,   |

Slika 5.10. Tablica međuovisnosti parametara



Slika 5.11. Početni DSM Parametara generatora



Slika 5.12. Particionirani DSM Parametara generatora

Ovom analizom i prikazanim matricama, dobili smo optimirani slijed elektromagnetskog i konstrukcijskog razvoja generatora. Treba istaći da je dobiveni rezultat suboptimalan, naime, obzirom na to da se radi o velikoj matrici, postoji mogućnost višestrukih suboptimuma. Obzirom na ograničenja obrade tako velikih matrica, smatramo da se ovaj suboptimalni rezultat može upotrebljavati u višedomenskoj matrici (MDM), što je izloženo u poglavlju 5.5.

#### **5.4. DMM parametara – proračuna i parametara – dokumentacije**

Za izradu MDM matrice, bilo je potrebno napraviti dvije matrice koje povezuju dvije domene. Prva matrica povezuje parametre i proračune. Relacije u ovoj matrici identificirane su na način da se prolazio red po red, odgovarajući na pitanje koji parametar utječe na promatrani proračun. Nakon identifikacije relacija koju je napravio autor, istu su naknadno provjerila i doradila dva konstruktora, dok je relacije za elektromagnetski proračun identificirao projektant. Sama je identifikacija relacija u ovoj matrici znatno jednostavnija od identifikacije veza u matrici parametara, te je i cijeli postupak znatno kraći. U matricu su uključena 23 proračuna, od elektromagnetskog proračuna koji radi odjel projekta, do proračuna rotorskih i statorskih dijelova, naprava, proračuna kritičnih brzina te sila na temelje (proračuni koji se upotrebljavaju vidljivi su u tablici 5.1.).

Nakon optimiranja redoslijeda DMM matrice na način da se preslože redovi (tj. proračuni) tako da su prvi proračuni oni koji prema particioniranoj matrici parametara, prvi dobiju sve parametre, a zadnji su oni koji trebaju parametre koji se dobiju na kraju. Optimirana matrica dana je na slici 5.13. Način na koji je provedeno optimiranje detaljnije je pokazan u sljedećem poglavlju s MDM matricom, ovdje ćemo se samo osvrnuti na dobivene rezultate.

Usporedimo inicijalni poredak proračuna (lijevo) i poredak proračuna nakon optimiranja prema particioniranoj matrici parametara (desno). Ovaj poredak ne označava nužno početak proračuna, već mogući kraj proračuna (kada su definirani svi parametri), a proračun se može početi izvoditi ranije, ali ovdje će se razmatrati kao da je počeo tek kada dobije sve parametre.

Optimirani poredak počinje s proračunom međupolnih veza i proračunom pola, što se u stvarnosti i radi među prvim proračunima, često još u fazi izrade elektromagnetskog proračuna, da bi se prije izdavanja projektnih podataka vidjelo je li sve u redu (ovo najviše ovisi o projektantu koji radi elektromagnetski proračun), zatim slijedi proračun SS ventilatora - što je moguće, obzirom na to da za njegov proračun nije potrebno puno podataka. Zatim slijedi proračun kape generatora te proračun ležaja, proračun kape se vrlo vjerojatno i može raditi u toj fazi, ali se u praksi, zbog prioriteta obično radi pri kraju. Proračun ležaja radi se među prvim proračunima i to odgovara

stvarnom stanju. Slijede proračuni lančanog prstena i dovoda struje polovima. Na početku projekta se u industriji među prvim proračunima rade proračun pola i proračun lančanog prstena (zato što proračun lančanog prstena upotrebljava podatke o opterećenju iz proračuna pola. Proračun dovoda struje polovima moguć je u ovom trenutku za većinu generatora. Za točan proračun dovoda struje polovima, potrebni su podaci o radijalnom širenju lančanog prstena (proračun koji je napravljen prije njega) i širenja zvijezde, koje je u stvarnosti znatno manje od širenja lančanog prstena (reda deset puta manje), pa bi proračun bio dovoljne točnosti i bez tog podatka u ovoj fazi. Nakon njih dolaze proračun kočenja i dizanja te proračun PS ventilatora, što približno odgovara vremenu kada se u stvarnosti ovi proračuni i rade. Proračun PS ventilatora treba podatke iz proračuna kočenja (što je u ovom poretku dobro, jer se proračun kočenja radi neposredno prije). Slijede proračun donjeg nosača i elektromagnetni proračun. Proračun donjeg nosača moguće je napraviti u ovoj fazi, dok je elektromagnetni proračun tek sada u mogućnosti da se privede kraju. Ako se elektromagnetni proračun završi prije, to je povoljno za proces, jer se izbjegava mogućnost pojave dodatnih iteracija i ponavljanja ovih proračuna koji su napravljeni prije završetka elektromagnetnog proračuna. Proračun statorskog paketa i proračun glava namota su logičan slijed nakon završetka elektromagnetnog proračuna. Slijede naprave za rotor te proračun vratila, što je izvedivo u praksi. Trenutno se naprave obično rade među zadnjima, radi prioriteta i zahtjeva kupaca, koji definiraju rokove za proračune glavnih komponenata generatora, u koje spada i proračun vratila.

Zanimljivo je da se svi ovi proračuni mogu raditi paralelno elektromagnetnom proračunu. U praksi je to stvarno jedan iterativni proces, gdje se definira osnovni elektromagnetni dizajn, pa se on u iteracijama po malo doraduje. Ovo je bitan dio - tek nakon završetka elektromagnetnog proračuna mogu se završavati proračuni statorskog paketa (jer se broj utora i dimenzije moraju prije definirati), proračun glava namota (elektromagnetni proračun definira oblik glava namota i duljinu istaka), proračun vratila i prirubničkog spoja (jer moraju biti definirani momenti kratkih spojeva), proračun zvijezde (uz brzinu vrtnje i preklop s vratilom, treba momente kratkih spojeva). Ostaju još proračuni gornjeg nosača i kućišta (koji trebaju sile magnetnog privlačenja) i na kraju proračun sila na temelje, koji se manje – više u praksi izvodi među prvim proračunima. Isto je već zamijećeno kod DSM-a proračuna, te je ustanovljeno da je to moguće, ali je potrebno uvesti preliminarno izdanje proračuna sila na temelje. Dobiveni redosljed primjenjiv je u praksi, iako postoji problem evaluacije primjene ovog redosljeda. Jedan od razloga su često definirani rokovi za proračune glavnih dijelova, zbog čega određeni proračuni postaju prioritet. Pored toga, često se događa da kupac komentira neki dio proračuna i traži dorade istoga (neplanirane iteracije). U praksi se ovi problemi mogu riješiti na zadovoljavajući način, no dodatni problem koji otežava

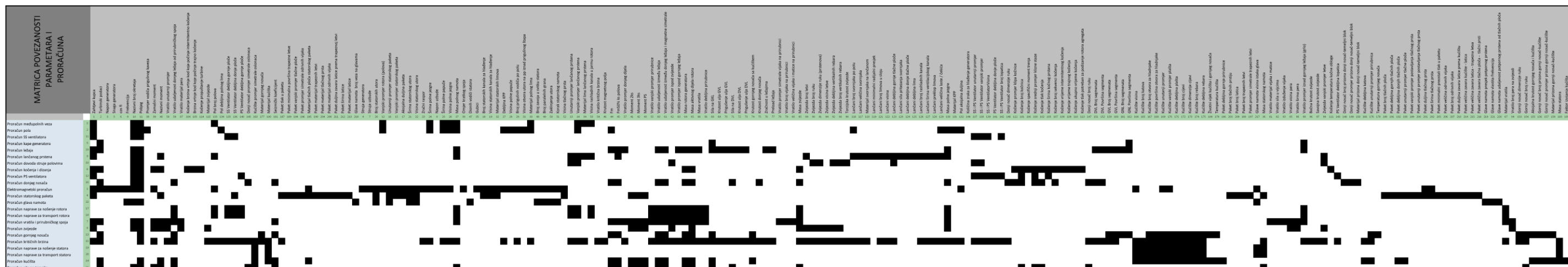
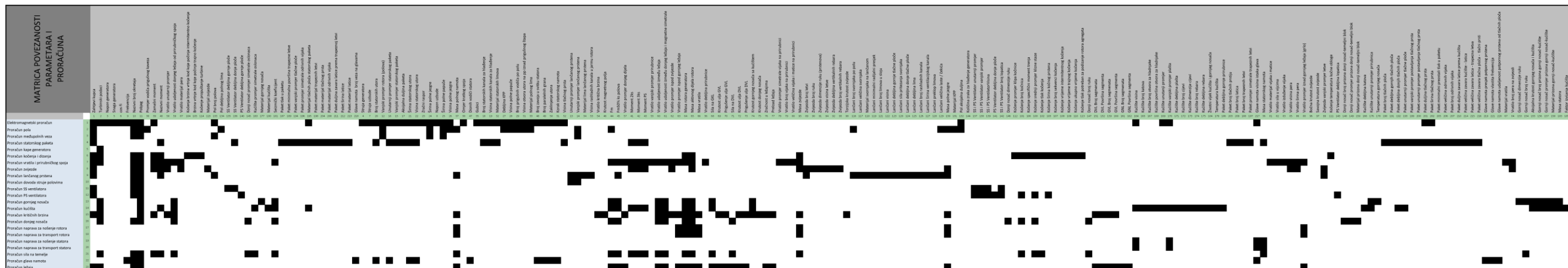
evaluaciju rezultata primjene ovog redoslijeda proračuna, posljedica je dostupnih kapaciteta i opterećenja, zbog paralelnih projekata (koji se rade istovremeno). Pri tome treba uzeti u obzir i krivulju učenja, koja se nužno manifestira skraćanjem vremena izrade proračuna s većim brojem ponavljanja.

**Tablica 5.1.** Lijevo su proračuni korišteni u DMM matrici prije optimiranja, a desno nakon optimiranja

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Elektromagnetski proračun             | 1  |
| Proračun pola                         | 2  |
| Proračun međupolnih veza              | 3  |
| Proračun statorskog paketa            | 4  |
| Proračun kape generatora              | 5  |
| Proračun kočenja i dizanja            | 6  |
| Proračun vratila i prirubničkog spoja | 7  |
| Proračun zvijezde                     | 8  |
| Proračun lančanog prstena             | 9  |
| Proračun dovoda struje polovima       | 10 |
| Proračun SS ventilatora               | 11 |
| Proračun PS ventilatora               | 12 |
| Proračun gornjeg nosača               | 13 |
| Proračun kućišta                      | 14 |
| Proračun kritičnih brzina             | 15 |
| Proračun donjeg nosača                | 16 |
| Proračun naprava za nošenje rotora    | 17 |
| Proračun naprava za transport rotora  | 18 |
| Proračun naprava za nošenje statora   | 19 |
| Proračun naprava za transport statora | 20 |
| Proračun sila na temelje              | 21 |
| Proračun glava namota                 | 22 |
| Proračun ležaja                       | 23 |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Proračun međupolnih veza              | 3  |
| Proračun pola                         | 2  |
| Proračun SS ventilatora               | 11 |
| Proračun kape generatora              | 5  |
| Proračun ležaja                       | 23 |
| Proračun lančanog prstena             | 9  |
| Proračun dovoda struje polovima       | 10 |
| Proračun kočenja i dizanja            | 6  |
| Proračun PS ventilatora               | 12 |
| Proračun donjeg nosača                | 16 |
| Elektromagnetski proračun             | 1  |
| Proračun statorskog paketa            | 4  |
| Proračun glava namota                 | 22 |
| Proračun naprave za nošenje rotora    | 17 |
| Proračun naprave za transport rotora  | 18 |
| Proračun vratila i prirubničkog spoja | 7  |
| Proračun zvijezde                     | 8  |
| Proračun gornjeg nosača               | 13 |
| Proračun kritičnih brzina             | 15 |
| Proračun naprave za nošenje statora   | 19 |
| Proračun naprave za transport statora | 20 |
| Proračun kućišta                      | 14 |
| Proračun sila na temelje              | 21 |

Nakon provedene analize, iz dobivenih rezultata prikazanih na slici 5.13 i tablici 5.1, možemo zaključiti da se dobiveni redoslijed proračuna razlikuje od početnog, a i da se dosta poklapa sa saznanjima dobivenima iz DSM-a proračuna, kao i da primjena ovog slijeda omogućuje manji broj potrebnih iteracija tijekom razvoja generatora.



Slika 5.13. DMM Parametara i proračuna prije (iznad) i nakon optimiranja (ispod)

Druga matrica povezuje parametre i dokumentaciju. Relacije u ovoj matrici identificirane su na način da se prolazio red po red, odgovarajući na pitanje koji parametar utječe na promatrani dokument. Nakon identifikacije relacija koju je napravio autor, istu su naknadno provjerila i doradila dva konstruktora. Identifikacija relacija u ovoj matrici je također znatno jednostavnija od identifikacije veza u matrici parametara i cijeli postupak je trajao znatno kraće. Matrica obuhvaća 42 sklopna nacrt, koji se obično rade u većini objekata. Obuhvaćeni nacrti su navedeni u nastavku, dok je početna DMM matrica dana na slici 5.14 lijevo, a optimirana desno.

Nakon optimiranja redosljeda DMM matrice, na način da se preslože redovi (tj. dokumenti) tako da su prvi dokumenti oni koji prema particioniranoj matrici parametara prvi dobiju sve parametre, a zadnji su oni koji trebaju parametre koji se dobiju na kraju. Način na koji je provedeno optimiranje, detaljnije je pokazan u sljedećem poglavlju s MDM matricom, ovdje ćemo se samo osvrnuti na dobivene rezultate. Usporedimo početni poredak dokumentacije napravljen nasumično (lijevo) i poredak nakon optimiranja prema particioniranoj matrici parametara (desno). Da ne bi bilo zabune, ovaj poredak ne označava početak izrade dokumenta, već mogući kraj izrade dokumenta (kada su definirani svi parametri koje taj dokument treba), a dokument se može početi izvoditi ranije.

Analizom matrice dobivene nakon prve iteracije optimiranja, moguće je zaključiti da ne prikazuje sliku postojećeg realnog procesa. Posebno možemo istaći da se montažni nacrt uvijek radi na samom kraju, kada su gotovi svi podsklopovi, poput statora komplet, rotora komplet, nosača, pokrova itd. Montažni je nacrt ovdje pozicioniran u sredini, prije izrade mjerne skice, nosača, paketa statora, vratila, rotora komplet itd. To upućuje na to da je potrebno dodati relacije koje će dodatno povezati dokumente i ispraviti poredak.

Analizom dobivene DMM matrice zaključeno je da nedostaju relacije koje povezuju sklopove i podsklopove. Naime, sklopovi ne ovise samo o karakterističnim parametrima sklopa, već i o parametrima podsklopova. Uvođenjem veza prema strukturi nacrt iz slike 2.4, uvedene su te, nove relacije. Treba naglasiti da su time identificirane i zabilježene veze koje su teško vidljive.

Za ilustraciju navedimo da se stator komplet konstruira kada su definirani nacrt paketa statora i nacrt kućišta statora, nacrt ugradnje namota i nacrt ugradnje termometara, stoga stator komplet mora obuhvaćati sve parametre kojima se koriste svi ti nacrti, jer u suprotnom on neće biti napravljen s ispravnim podacima i neće odgovarati stvarnom stanju. Samo na taj način moguće je dobiti ispravni slijed dokumentacije. Ovdje je bitno naglasiti da, osim strukture koja je prikazana na slici 2.4, ovdje postoje i skrivene veze koje su poznate samo konstruktorima (skriveno znanje eksperata). Navest ćemo samo dva primjera onih koji su ovdje uzeti u obzir. Kao primjer navedimo da se rasvjeta generatora definira tek nakon što je završen nacrt kape, donjeg nosača, kućišta i oplata (naravno ovisi o dizajnu generatora i mjestu na kojem se ugrađuje rasvjeta, ovdje je



pretpostavljeno da se svi ti nacrti mogu upotrebljavati u nacrtu rasvjete generatora). Drugi primjer nezapisanog znanja, a što smo uzeli u obzir pri izradi ove matrice su međupolne veze i zaklinjenje polova. Naime, zaklinjenje polova definira se tek kada se napravi nacrt pola, jer je nacrt pola osnova za daljnje crtanje međupolnih veza, a tako i zaklinjenja polova. Pokušalo se uzeti u obzir što je moguće više nepisanih, iskustvenih pravila. To je rezultiralo verzijom matrice prikazanom na slici 5.15. Dobiveni redosljed je u sljedećoj tablici, s desne strane, a redosljed je provjerio autor, te eksperti s dugogodišnjim iskustvom u konstruiranju. Zaključeno je da se predloženi redosljed, prema navedenoj tablici i DMM matrici na slici 5.15, može upotrebljavati za izradu dokumentacije. Nakon svih dorada, dobio se novi poredak, koji znatno bolje opisuje mogući slijed izrade dokumentacije.

**Tablica 5.2.** Lijevo je dokumentacija korištena u DMM matrici prije optimiranja, u sredini nakon prvog optimiranja, a desno konačna nakon dodatnih dorada veza

|                                   |    |                                   |    |                                   |    |
|-----------------------------------|----|-----------------------------------|----|-----------------------------------|----|
| Mjerna skica                      | 1  | Ventilator kliznih koluta         | 22 | Temeljni blok donjeg nosača       | 27 |
| Montažni nacrt                    | 2  | Rasvjeta generatora               | 40 | Temeljni blok statora             | 8  |
| Stator komplet                    | 3  | Nastavak vratila                  | 20 | Nastavak vratila                  | 20 |
| Kućište statora                   | 4  | Temeljni blok donjeg nosača       | 27 | Klizni koluti                     | 21 |
| Paket statora                     | 5  | Temeljni blok statora             | 8  | Ventilator kliznih koluta         | 22 |
| Ugradnja namota                   | 6  | Klizni koluti                     | 21 | Uređaj četkica                    | 31 |
| Ugradnja termometara              | 7  | Međupolne veze                    | 17 | Lamelirani prsten                 | 13 |
| Temeljni blok statora             | 8  | Uređaj četkica                    | 31 | Rotorski pol                      | 15 |
| Rotor komplet                     | 9  | Izvodi uzbude                     | 32 | Međupolne veze                    | 17 |
| Vratilo                           | 10 | Lamelirani prsten                 | 13 | Zaklinjenje polova                | 16 |
| Zvijezda rotora                   | 11 | Rotorski pol                      | 15 | Kočni prsten                      | 14 |
| Zaklinjenje i osiguranje zvijezde | 12 | Zaklinjenje polova                | 16 | Donji vodeći ležaj                | 28 |
| Lamelirani prsten                 | 13 | Balansiranje rotora               | 42 | Mjerna skica                      | 1  |
| Kočni prsten                      | 14 | Kočni prsten                      | 14 | Gornji kombinirani ležaj          | 24 |
| Rotorski pol                      | 15 | Uređaj za kočenje i dizanje       | 29 | Zvono GKLa komplet                | 25 |
| Zaklinjenje polova                | 16 | Donji pokrov                      | 37 | Generatorska kapa                 | 30 |
| Međupolne veze                    | 17 | Ugradnja grijača                  | 39 | Zvijezda rotora                   | 11 |
| Ventilatori                       | 18 | Donji vodeći ležaj                | 28 | Ventilatori                       | 18 |
| Dovodi struje polovima            | 19 | Gornji kombinirani ležaj          | 24 | Balansiranje rotora               | 42 |
| Nastavak vratila                  | 20 | Montažni nacrt                    | 2  | Donji nosač                       | 26 |
| Klizni koluti                     | 21 | Stator komplet                    | 3  | Uređaj za kočenje i dizanje       | 29 |
| Ventilator kliznih koluta         | 22 | Ugradnja termometara              | 7  | Ugradnja grijača                  | 39 |
| Gornji nosač                      | 23 | Gornji zaslon                     | 34 | Donji zaslon                      | 35 |
| Gornji kombinirani ležaj          | 24 | Donji zaslon                      | 35 | Donji pokrov                      | 37 |
| Zvono GKLa komplet                | 25 | Mjerna skica                      | 1  | Paket statora                     | 5  |
| Donji nosač                       | 26 | Rashladni uređaj generatora       | 33 | Ugradnja namota                   | 6  |
| Temeljni blok donjeg nosača       | 27 | Sustav uzemljenja                 | 38 | Vratilo                           | 10 |
| Donji vodeći ležaj                | 28 | Zaštita izvoda                    | 41 | Dovodi struje polovima            | 19 |
| Uređaj za kočenje i dizanje       | 29 | Dovodi struje polovima            | 19 | Zaklinjenje i osiguranje zvijezde | 12 |
| Generatorska kapa                 | 30 | Zvono GKLa komplet                | 25 | Rotor komplet                     | 9  |
| Uređaj četkica                    | 31 | Generatorska kapa                 | 30 | Kućište statora                   | 4  |
| Izvodi uzbude                     | 32 | Zvijezda rotora                   | 11 | Ugradnja termometara              | 7  |
| Rashladni uređaj generatora       | 33 | Ventilatori                       | 18 | Stator komplet                    | 3  |
| Gornji zaslon                     | 34 | Donji nosač                       | 26 | Rasvjeta generatora               | 40 |
| Donji zaslon                      | 35 | Paket statora                     | 5  | Rashladni uređaj generatora       | 33 |
| Gornji pokrov                     | 36 | Ugradnja namota                   | 6  | Sustav uzemljenja                 | 38 |
| Donji pokrov                      | 37 | Rotor komplet                     | 9  | Zaštita izvoda                    | 41 |
| Sustav uzemljenja                 | 38 | Vratilo                           | 10 | Gornji nosač                      | 23 |
| Ugradnja grijača                  | 39 | Zaklinjenje i osiguranje zvijezde | 12 | Izvodi uzbude                     | 32 |
| Rasvjeta generatora               | 40 | Gornji pokrov                     | 36 | Gornji zaslon                     | 34 |
| Zaštita izvoda                    | 41 | Kućište statora                   | 4  | Gornji pokrov                     | 36 |
| Balansiranje rotora               | 42 | Gornji nosač                      | 23 | Montažni nacrt                    | 2  |



Slika 5.14. DMM Parametara i dokumentacije, lijevo početna, desno nakon prve optimizacije



## 5.5. MDM parametara proračuna i nacрта

Već nakon izrade osnovne DSM matrice parametara generatora, pojavila se ideja da bi se na neki način mogli povezati parametri s dokumentacijom i s proračunima, te da bi se možda, u konačnici, na taj način mogao poboljšati slijed izrade konstrukcijske dokumentacije, s minimalnim potrebnim brojem iteracija, što bi u konačnici mogao biti doprinos industriji. Osim toga, tom matricom bi se jednostavno mogao pratiti utjecaj promjene nekog od parametra, što će biti pokazano u nastavku. Jedina mogućnost za to bila je upotrebljavati višedomensku matricu (zvanu MDM). U literaturi je moguće naći puno primjera korištenja MDM matrica koje povezuju razne domene, tako se u [147] povezuju komponente, funkcijski zahtjevi i parametri, u [148] autori preko MDM matrice povezuju komponente električnog bicikla sa zahtjevima. Drugi [149] autori modelirali su rizike pomoću MDM-a, dok su neki autori [150] pomoću istog modelirali dva ciklusa s parametrima. Osim toga, u [151] su modelirali rizike promjena za sušilo za kosu i Diesel motor pomoću MDM-a s tri domene, upotrebljavane su domene funkcija, ponašanje i struktura. U [152] predlažu proširenje MDM matrice s logičkim operacijama, a u [153] predlažu upotrebu triju domena - komponente, ljude i dokumente. Osim toga, može se naći još radova na bazi MDM-a, poput [62,66,68,70]. U dostupnoj literaturi nije nađena MDM matrica koja povezuje parametre s dokumentacijom i proračunima, što je izloženo u nastavku rada. Predložena MDM matrica sastoji se od tri matrice, matrica je prikazana na slici broj 5.16. Sačinjavaju je particionirani DSM parametara i matrice, koje povezuju dvije različite domene. Prva i glavna matrica je particionirana DSM matrica parametara generatora, dok je s desne strane DMM matrica između dvije domene, u ovom slučaju parametara i dokumentacije, koja se obično izrađuje na velikim hidrogeneratorima. Na donjoj lijevoj strani nalazi se treća matrica, koja je također DMM matrica i povezuje proračune i parametre. Kao što se vidi na donjoj slici, u četvrtom kvadrantu jedna matrica ostala je prazna, ista bi također mogla biti DMM matrica koja bi povezivala dokumentaciju i proračune, no za optimizaciju slijeda razvoja proizvoda, ovdje nije bilo potrebe za tim dijelom. U budućim istraživanjima mogao bi se iskoristiti i taj dio matrice. Izradom takve matrice su se pojavile nove mogućnosti i ideje. Postavilo se pitanje koji je to idealni slijed konstrukcijske dokumentacije ili izrade proračuna. Osim toga, pojavilo se pitanje, je li moguće prikazati kako promjena jednog parametra utječe na sve ostale parametre, dokumentaciju i proračune.

Napravljen je program u Excelu upotrebljavajući VBA, koji pokazuje kako odabrani parametar utječe na sve ostale parametre, te na proračune i dokumentaciju. Odabrani parametar prikazan je tirkiznom bojom, dok su crvenom pokazani svi parametri na koje isti utječe. Žutom je bojom

o bojena sva dokumentacija na koju taj parametar ima utjecaj, dok su zelenom označeni svi proračuni na koje utječe početni parametar. Na navedenoj slici je primjer gdje je odabran parametar 1, kao parametar koji se promijenio, te je vidljivo da on ima utjecaj na parametre 2, 3, 5, 6, 7, 8, na dokumente 2, 3, 7 i 10, te na proračune 3, 5 i 7. Vidljivo je da se na ovakav način može jednostavno vizualno pratiti kakav je utjecaj kojeg parametra na ostale parametre, dokumentaciju i proračune. Bez boja bi bilo znatno teže pratiti veze, odnosno što na što utječe, pogotovo u većim matricama. Ovo se pokazalo posebno korisnim kada se promatra velika matrica, što će se i vidjeti u nastavku.

| Partitioniran MDM | Parametar |   |   |   |   |   |   |   |   |    | Dokument |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|-------------------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|                   | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Parametar 1       | 1         | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 2       | 2         | 1 | 2 |   |   |   |   |   |   |    | 1        |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |
| Parametar 3       | 3         | 1 | 1 | 3 |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 4       | 4         |   |   | 4 |   |   |   |   |   |    |          |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 5       | 5         |   | 1 |   | 5 |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 6       | 6         |   |   |   | 1 | 6 |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |
| Parametar 7       | 7         |   |   | 1 |   |   | 7 |   |   |    |          | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 8       | 8         |   |   |   | 1 |   |   | 8 |   |    |          |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |
| Parametar 9       | 9         |   |   |   |   |   |   |   | 9 |    |          |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |
| Parametar 10      | 10        |   |   |   |   |   |   |   |   | 10 |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 1        | 1         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 2        | 2         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 3        | 3         | 1 |   |   |   |   |   | 1 |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 4        | 4         |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 5        | 5         |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 6        | 6         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 7        | 7         |   |   |   |   |   | 1 |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 8        | 8         |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 9        | 9         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Proračun 10       | 10        |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |

**Slika 5.16.** Primjer praćenja utjecaja odabranog parametra na ostale parametre, dokumentaciju i proračune

Osim toga, ako se pogleda gornja matrica, može se zaključiti da se proračuni mogu vrlo jednostavno sortirati, na način da se prvo stave proračuni koji se mogu izvoditi prvi, a kasnije oni koji trebaju parametre koji se dobiju kasnije. Ovo se preslagivanje izvodi promjenom redaka, tako da se pregleda matrica te se proračuni slažu u redove, na način da prvi ne upotrebljava parametre - ili upotrebljava parametre koji se u matrici parametara definiraju prvi, sve do zadnjeg proračuna koji upotrebljava parametre koji se zadnji definiraju. Nakon sortiranja se dobije lijeva donja matrica proračuna. Na tako složenoj matrici proračuna bi, čitanjem proračuna s gornje strane, trebao biti idealan slijed izvođenja proračuna (idealni prema matrici parametara). Prema sljedećem

primjeru ispada da se prvo mogu izvoditi proračuni 1, 2, 6 i 9, dok bi proračuni 8 i 10 bili zadnji proračuni. Redoslijed i izgled veza nakon sortiranja pokazuje crvena strelica.

| Partitioniran MDM | Parametar 1 | Parametar 2 | Parametar 3 | Parametar 4 | Parametar 5 | Parametar 6 | Parametar 7 | Parametar 8 | Parametar 9 | Parametar 10 | Dokument 1 | Dokument 2 | Dokument 3 | Dokument 4 | Dokument 5 | Dokument 6 | Dokument 7 | Dokument 8 | Dokument 9 | Dokument 10 |   |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|---|
|                   | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           | 6           | 7           | 8           | 9           | 10           | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10          |   |
| Parametar 1       | 1           | 1           |             |             |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 2       | 2           | 1           | 2           |             |             |             |             |             |             |              |            | 1          |            |            |            |            |            |            |            |             | 1 |
| Parametar 3       | 3           | 1           | 1           | 3           |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 4       | 4           |             |             |             | 4           |             |             |             |             |              |            |            |            | 1          |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 5       | 5           |             | 1           |             |             | 5           |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 6       | 6           |             |             |             |             | 1           | 6           |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             | 1 |
| Parametar 7       | 7           |             |             | 1           |             |             |             | 7           |             |              |            |            | 1          |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 8       | 8           |             |             |             |             | 1           |             |             | 8           |              |            |            |            |            |            |            | 1          |            |            |             |   |
| Parametar 9       | 9           |             |             |             | 1           |             |             |             |             | 9            |            |            |            | 1          |            |            |            |            |            |             |   |
| Parametar 10      | 10          |             |             |             |             |             |             |             |             | 1            | 10         |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 1        | 1           |             |             |             |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 2        | 2           |             |             |             |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 6        | 6           |             |             |             |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 9        | 9           |             |             |             |             |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 5        | 5           |             |             |             | 1           |             |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 4        | 4           |             |             |             |             | 1           |             |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 7        | 7           |             |             |             |             |             | 1           |             |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 3        | 3           | 1           |             |             |             |             |             | 1           |             |              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 8        | 8           |             |             |             |             |             |             |             |             | 1            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |
| Proračun 10       | 10          |             |             |             |             |             |             |             |             |              | 1          |            |            |            |            |            |            |            |            |             |   |

Slika 5.17. Primjer optimiranja slijeda izrade proračuna na temelju dostupnosti parametara

Ista se optimizacija može izvesti i na matrici dokumentacije. Kolone se preslaguju prema matrici parametara, na način da se s lijeve strane nalazi dokumentacija koja se može izvoditi prva, tj. ne treba parametre - ili treba, ali one koji se prvi definiraju, a na desnoj strani je dokumentacija koja treba parametre koji se dobiju u kasnijoj fazi. Prema tome, ako se gleda donja matrica dokumentacije s optimiranim slijedom izrade dokumentacije, dokumenti 1, 5, 6, 8, 9 mogu se izvoditi prvi, dok se dokument 4 mora raditi na kraju, kada se odrede svi parametri. Sam slijed izrade dokumentacije i izgled optimiranog oblika prikazan je crvenom strelicom.

| Partitioniran MDM | Parametar |   |   |   |   |   |   |   |   |    | Dokument |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
|-------------------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------|---|---|---|---|---|----|---|---|---|
|                   | 1         | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1        | 5 | 6 | 8 | 9 | 2 | 10 | 3 | 7 | 4 |
| Parametar 1       | 1         | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Parametar 2       | 2         | 1 | 2 |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   | 1 | 1  |   |   |   |
| Parametar 3       | 3         | 1 | 1 | 3 |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Parametar 4       | 4         |   |   |   | 4 |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   | 1 |
| Parametar 5       | 5         |   | 1 |   |   | 5 |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Parametar 6       | 6         |   |   |   | 1 | 6 |   |   |   |    |          |   |   |   |   | 1 |    |   |   |   |
| Parametar 7       | 7         |   | 1 |   |   |   | 7 |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   | 1 |   |
| Parametar 8       | 8         |   |   |   | 1 |   |   | 8 |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   | 1 |   |
| Parametar 9       | 9         |   |   | 1 |   |   |   |   | 9 |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   | 1 |
| Parametar 10      | 10        |   |   |   |   |   |   |   | 1 | 10 |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 1        | 1         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 2        | 2         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 6        | 6         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 9        | 9         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 5        | 5         |   |   | 1 |   |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 4        | 4         |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 7        | 7         |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 3        | 3         | 1 |   |   |   |   | 1 |   |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 8        | 8         |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |
| Proračun 10       | 10        |   |   |   |   |   |   |   | 1 |    |          |   |   |   |   |   |    |   |   |   |

**Slika 5.18.** Primjer optimiranja slijeda izrade dokumentacije na temelju dostupnosti parametara

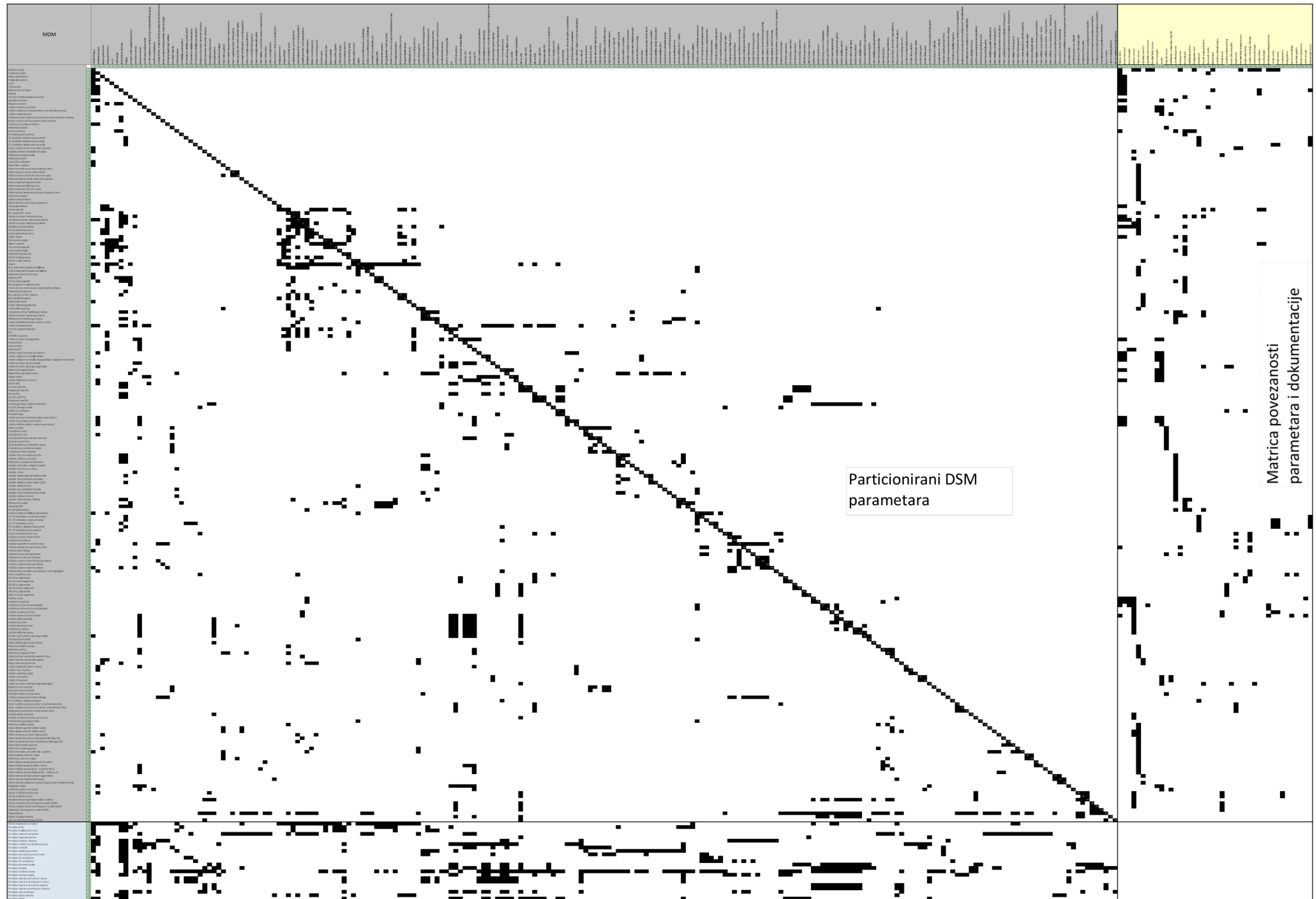
Ako se pokazano primijeni na napravljenoj matrici parametara, dobije se MDM matrica, kao na sljedećoj slici, 5.19. Ova matrica dobivena je spajanjem triju matrica. Osnova joj je partitionirana DSM matrica parametara generatora, a na nju su povezani - s desne strane dokumenti, a s donje strane proračuni. Ista matrica se jednostavno može proširivati na tehnološku dokumentaciju. Nakon prikazane optimizacije, dobije se matrica, prikazana na slici 5.20. Analogno razmatranju izloženom u poglavlju 5.4, rezultati prikazani na slici 5.20 nisu zadovoljavajući. Stoga je provedena dodatna analiza veza koje postoje u strukturi dokumenata. Nove veze proizašle su iz nezapisanog znanja stručnjaka s višegodišnjim iskustvom u konstruiranju generatora. Uključivanjem tih dodatnih veza, dobivena je nova struktura, prikazana na slici 5.21, koja je verificirana i prikazuje realno stanje.

Osim optimizacije, uočena je mogućnost da se bojama može dobiti dobra vizualna slika utjecaja nekog od parametara na ostale parametre, proračune i dokumentaciju, kao što je pokazano na prethodnim primjerima, a to je i jedan od doprinosa ove MDM matrice.

Naime, u praksi je efekt promjena pojedinih parametara često teško uočljiv. Upravo iz tog razloga, zamišljeno je da bi ovaj način praćenja utjecaja parametara prvenstveno trebao služiti menadžerima, inženjerima (pogotovo mladim inženjerima), ali i ostalima, da bi mogli shvatiti koliko posla može prouzročiti promjena samo jednog parametra. Osim toga, druga korist navedenoga je za potrebe revitalizacije ili servisa, kako bi se utjecaj promjene određenih parametara na količinu, a time i cijena rada projektnog i konstrukcijskog ureda, mogli točnije

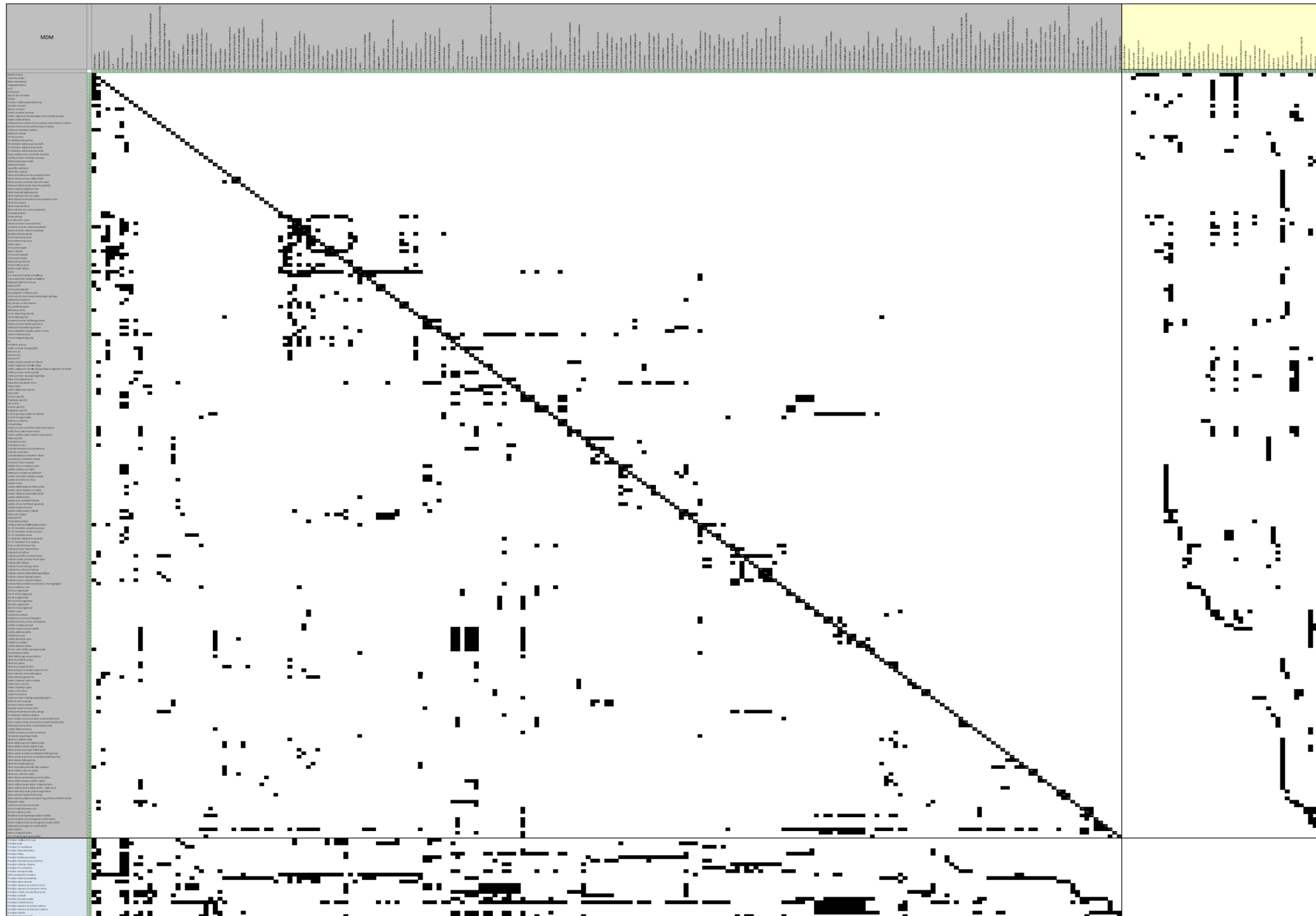
procijeniti. Na slici 5.22 prikazano je kako se bojom može pratiti utjecaj promjene jednog parametra na ostale elemente strukture.



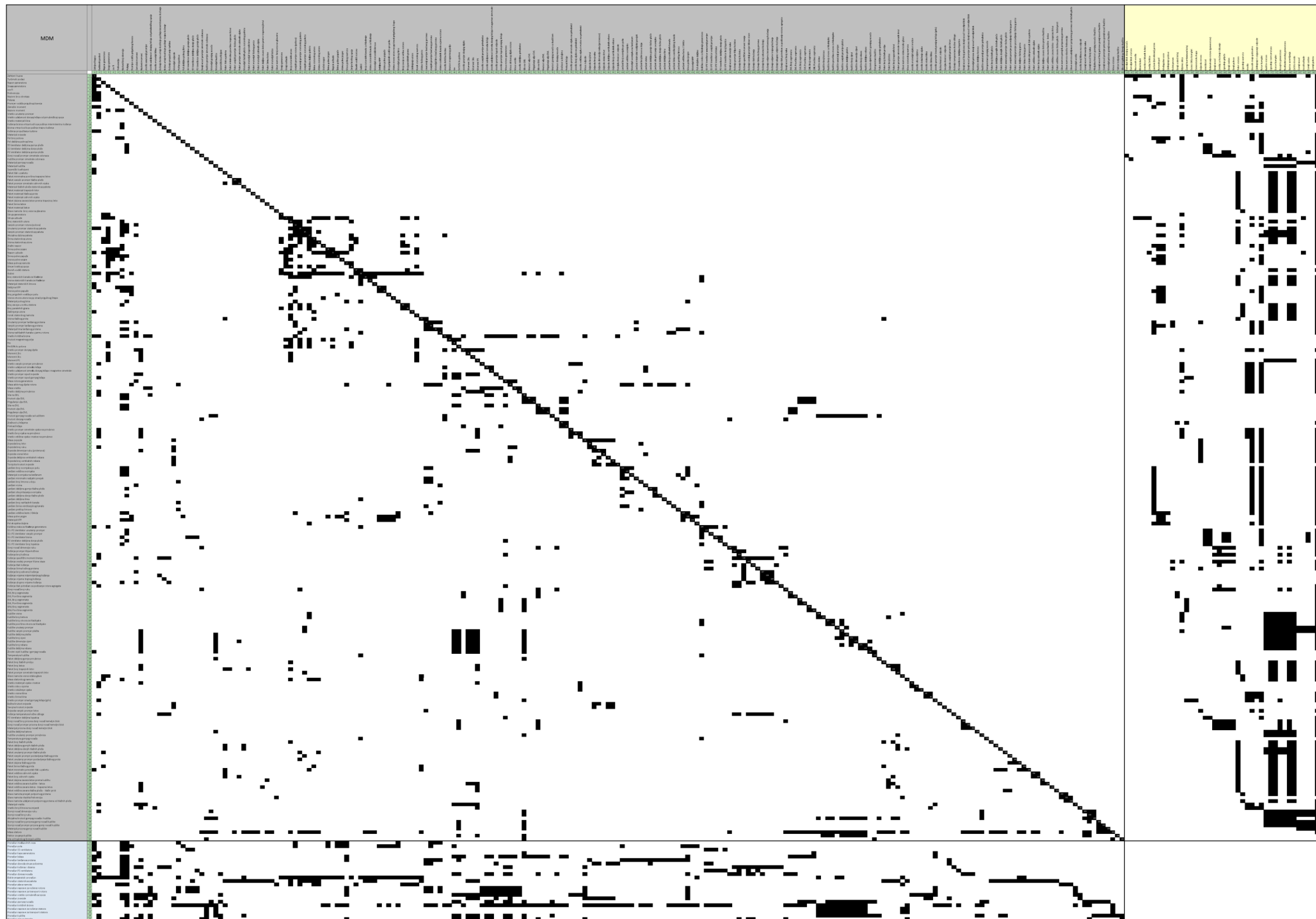


Matrica povezanosti parametara i proračuna

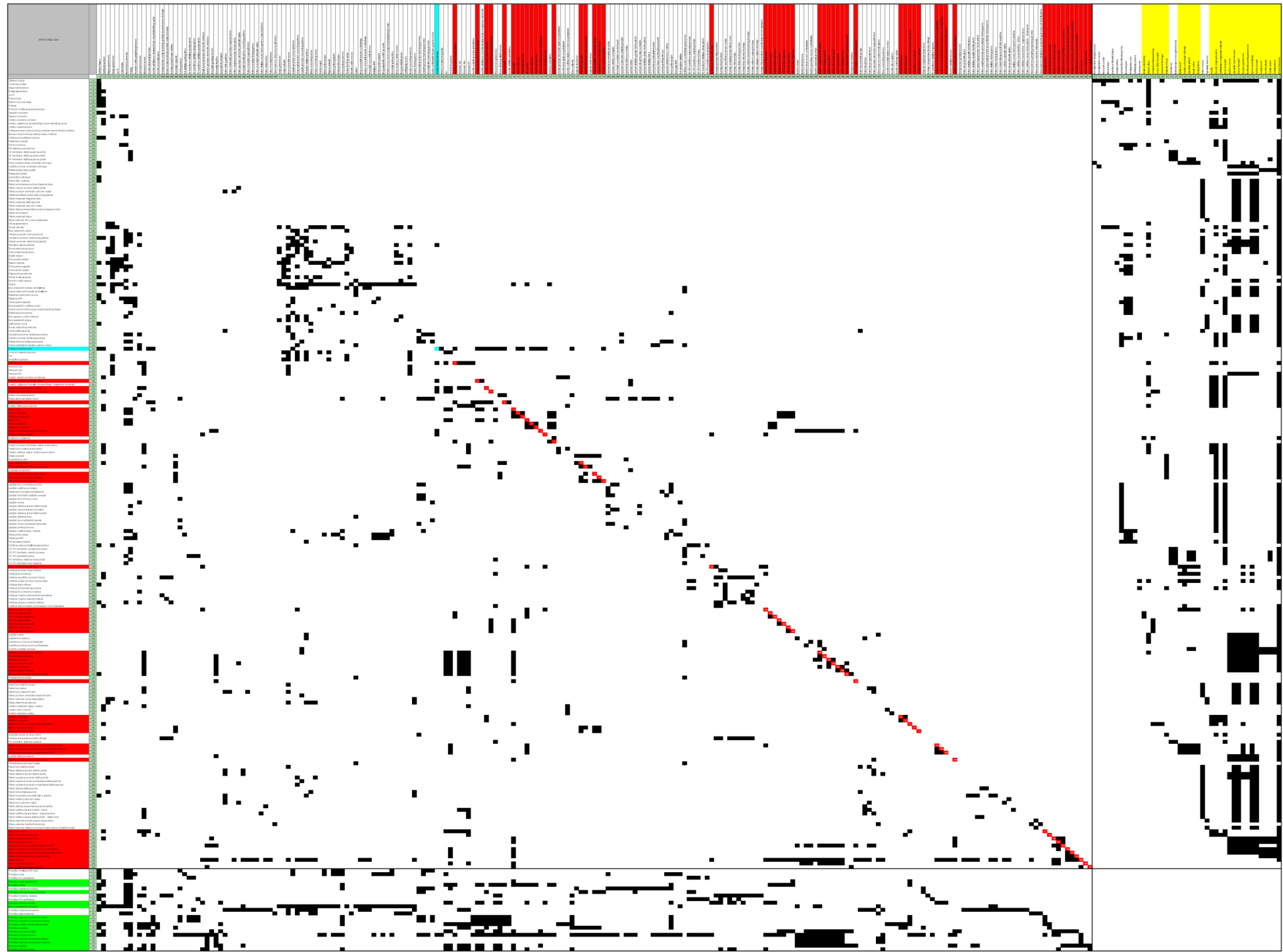
Slika 5.19. MDM parametara, proračuna i dokumentacije



Slika 5.20. MDM s optimiranim slijedom izrade dokumentacije i proračuna



Slika 5.21. Konačni MDM s optimiranim slijedom izrade dokumentacije i proračuna



Slika 5.22. MDM utjecaj određenog parametra na ostale parametre, proračune i dokumentaciju

## 6. Rasprava

---

Složeni uvjeti na svjetskom tržištu, prije svega pojačana konkurencija i stalni trend snižavanja cijene uz povećanje zahtjeva, zahtijevaju stalno poboljšavanje proizvoda tvrtke Končar - Generatori i motori d. d. Električni generator je i pored brojnih izvedbi relativno poznat proizvod, s dugim životnim vijekom. Veliki broj instaliranih generatora, razvijenih posljednjih sedamdesetak godina, označuje različite varijacije u izvedbama s ciljem poboljšanja konstrukcije i smanjenja troškova. Iako se proizvode dugi niz godina, nije poznato da je napravljen cjeloviti model razvoja i konstrukcije generatora koji bi omogućio uvid u odnose koji vladaju ovim složenim proizvodom. To je poglavito značajno kod rekonstrukcije postojećih strojeva za koje ne postoji odgovarajuća tehnička dokumentacija, a realiziraju je nove generacije inženjera. Nove metode proračuna konstrukcije i alati koji omogućuju simulacije fizikalnih stanja u proizvodu, iako doprinose boljem uvidu u ponašanje i svojstva proizvoda, istovremeno čine razvojni proces složenijim i zahtjevnijim.

Cjeloviti pristup razvoju modela generatora i njegovog razvojnog procesa, realiziran u okviru ovog doktorskog rada, omogućio je uvid u relacije i međuovisnosti koje do sada nisu bile vidljive, tj. omogućuje jednostavnije i bolje razumijevanje sustava. Boljim razumijevanjem relacija i interakcija unutar sustava otvorit će se nove mogućnosti poboljšanja razvojnog procesa i generatora [22,120].

S ovakvim pristupom analizi razvojnog procesa generatora može se prepoznati prostor za poboljšanje razvojnog procesa i same konstrukcije i time doprinijeti naporima kojima je cilj razvoj jeftinijeg proizvoda uz zadržavanje njegovih kvalitativnih značajki, kao što su, uz temeljne funkcionalne značajke, zadani vijek trajanja, vrijeme isporuke itd.

Samo istraživanje započelo je „eksperimentom“, tj. razvojem male probne DSM matrice proračuna generatora, koja je sadržavala dvadesetak proračuna koji se rade na gotovo svakom novom generatoru. Iz te analize vidjelo se da postoji mogućnost poboljšanja procesa, dodavanjem nekih novih preliminarnih proračuna koji bi se radili s pretpostavljenim podacima [69]. Rezultat provedene analize na mehaničkim proračunima i vizualni prikaz rezultata su ujedno bili motivacija za nastavak rada na DSM-u. Daljnje proširenje opsega rada na strukturu, parametre, i na kraju na višedomensku matricu koja je obuhvatila, povezala i učinila vidljivim odnose koji određuju

generator u cjelini, pripadnu dokumentaciju, mehaničke proračune i konstrukcijsko-projektne parametre generatora.

Razvijeni model omogućuje uvid u međuovisnosti elemenata modela, što je posebno važno pri rekonstrukcijama i modifikacijama generatora.

- **Cilj i svrha ovog istraživanja bili su stjecanje uvida u relacije i interakcije tijekom razvoja i arhitekture proizvoda i u konačnici, poboljšanje procesa razvoja električnog generatora, posebno u fazama projektiranja i konstruiranja generatora.**

U do sada iznesenom tekstu rada izložen je postupak, kao i rezultati istraživanja. Ishod istraživanja može se analizirati, s obzirom na ključne rezultate, na sljedeći način:

1. DSM matrica proračuna generatora [69]– realizacijom ove matrice započelo je istraživanje. Rezultat analize pokazao je da postoji mogućnost poboljšanja postojećih procesa i ukazao na neke potencijalne probleme. Jedan od uočenih problema je da veze na razini proračuna (tj. proračun se može gledati i kao skup parametara) nedovoljno opisuju stvarno stanje i zavisnosti. To je značajno kod promjene zahtjeva pri razvoju novog stroja, ali i kod modifikacija i rekonstrukcija postojećih. Ova matrica omogućuje uvid u efekte eventualnih promjena parametara proračuna koji se izvode u nizu unutar različitih disciplina i grupa razvojnog tima. Uvidom u međusobne utjecaje, kroz DSM matricu može se verificirati utjecaj promjene parametara na proračune u nastavku (više o tome u točki 4.). Razvoj ove matrice ipak daje ograničen uvid u stvarno stanje kakvo se obično nailazi u praksi, te ima određenih nedostataka na koje se ukazalo ranije. Osim toga, u praksi se često radi na znatno više projekata istovremeno, često postoje i rokovi za neke od proračuna i u takvim situacijama se slobodni kapaciteti preusmjeravaju prema prioritetima. U praksi se naime, često neke veličine u proračunima pretpostavljaju na temelju iskustva. Predloženim redoslijedom izvođenja, kao što je ranije istaknuto, proračuni će se manje oslanjati na pretpostavljene ulazne podatke. Iz ove matrice je naučeno da se, za bolju točnost i bolje opisivanje ponašanja razvojnog procesa, nužno spustiti na najnižu razinu (tj. na parametre), zato što proračuni, kao elementi matrice, nemaju dovoljnu granulaciju, tj. ne vide parametre proračuna. Upravo zato optimirani slijed izrade proračuna i dokumentacije iz matrice parametara opisuje situaciju najbližu realnom procesu razvoja.
2. DSM arhitekture generatora – obzirom na to da je na više mjesta uočeno da autori navode prednosti korištenja DSM-a za provjeru arhitekture proizvoda,

[25,41,138,139,140,141,142,154,155,156,157,158,159], napravljena je ova matrica, čiji cilj je bio vidjeti arhitekturu postojećih generatora, te postoji li mogućnost poboljšanja arhitekture. Analiza postojeće arhitekture je pokazala da je arhitektura dobra, suboptimalna, s minimalnim preklapanjem modula, te da nema nekih značajnih mogućnosti poboljšanja. Sam rezultat je možda logična posljedica višedesetljetnog razvoja generatora i akumuliranog znanja. Razvijeni DSM arhitekture generatora omogućuje novim inženjerima uvid u složene međuovisnosti koje do sada nisu bile vidljive i doprinosi lakšem shvaćanju arhitekture proizvoda, što je kao praktičan doprinos rada izuzetno važno.

3. DSM parametara generatora – razvoj ove matrice motiviran je rezultatima istraživanja različitih autora (npr. Avnet, Epinger, Browning, Rask & Sunnersjo, Clarkson, Deffrenne) koji su razvijali parametarski DSM proizvoda [25,38,40,45,93,113,143,144,145,146]. Obzirom na pozitivne strane istraživanja objavljene u radovima navedenih i drugih autora, odlučeno je napraviti matricu parametara koja bi povezala parametre generatora u razvojnom procesu, od projektiranja pa do konstruiranja i izrade dokumentacije. Razvijena je matrica obuhvatila sve parametre, no zbog veličine matrice i kompleksnosti proizvoda, tijekom intervjua (poglavlje 3.1) ustanovljeno je da nije moguće dobiti matricu koja će jednoznačno opisati relacije među parametrima. Kao što je istaknuto, kod verifikacije, odnosno ponavljanja intervjua, inženjeri su bili skloni mijenjati neke relacije u skladu s mogućim različitim varijantama rješenja problema, a time se mijenja i suboptimalno rješenje. Particioniranjem se dobio suboptimalni slijed koji kreće od zahtjeva kupca, turbinskih parametara, projektnih parametara koji se preklapaju s ustaljenim materijalima i standardnim dijelovima (koji se uvijek upotrebljavaju i ne mijenjaju dimenzije), te na kraju, konstrukcijskih parametara. Ovom analizom i prikazanom matricom dobili smo optimirani slijed elektromagnetskog i konstrukcijskog razvoja generatora. Dobiveni rezultat je suboptimalan, naime, obzirom na to da se radi o velikoj matrici, postoji mogućnost višestrukih suboptimuma. Za daljnje povećanje točnosti matrice potrebna su testiranja i korekcije iste, koja su izvan domene ovog istraživanja. Obzirom na ograničenja obrade tako velikih matrica, smatramo da se ovaj suboptimalni rezultat može upotrebljavati u višedomenskoj matrici (MDM). Iz ove matrice, te ishoda intervjua, može se zaključiti da razvoji ovako velikih matrica na ovako kompleksnim sustavima, nemaju jednoznačnu konačnu verziju, te iziskuju stalne dorade i dopune.

4. DMM parametara i proračuna – ova je matrica preduvjet za realizaciju MDM (točka 6) matrice. Njezin razvoj omogućio je definiranje veza i uvid u međuovisnosti između parametara i proračuna na generatoru u procesu razvoja generatora. Ova je matrica bila potrebna da bi se nakon particioniranja matrice parametara mogao dobiti suboptimalni slijed proračuna u MDM matrici, prema suboptimalnom slijedu parametara, kako je i opisano u prethodnom poglavlju. Iz dobivenih rezultata prikazanih na slici 5.13. i u tablici 5.1., može se zaključiti da se dobiveni redoslijed proračuna razlikuje od početnog i omogućuje manji broj potrebnih iteracija tijekom razvoja generatora, jer se optimiranje temelji na točnijem modelu, tj. na samim parametrima. Točnost ove matrice u konačnici ovisi i o točnosti matrice parametara, stoga je za daljnju primjenu potrebno daljnje utočnjavanje matrice parametara.
  
5. DMM parametara i dokumentacije – ova matrica je također preduvjet razvoja MDM matrice. Matrica je omogućila povezivanje parametara generatora i dokumentacije generatora. Ova matrica potrebna je da bi se nakon particioniranja matrice parametara mogao dobiti suboptimalni slijed u MDM matrici, prema suboptimalnom slijedu parametara, kako je i opisano u prethodnom poglavlju. Iz dobivenih rezultata prikazanih na slici 5.15. i u tablici 5.2., može se zaključiti da se dobiveni redoslijed dokumentacije razlikuje od početnog i da omogućuje manji broj potrebnih iteracija tijekom razvoja generatora, jer se optimiranje temelji na točnijem modelu, tj. na samim parametrima. Točnost ove matrice u konačnici ovisi i o točnosti matrice parametara, stoga je za daljnju primjenu potrebno daljnje utočnjavanje matrice parametara. S praktične strane, matrica omogućuje odgovarajući suboptimalni slijed kreiranja i obrade dokumentacije.
  
6. MDM parametara, proračuna i dokumentacije – razvoj ove matrice motiviran je rezultatima istraživanja različitih autora koji su razvijali MDM [62,66,68,70,147,148,149,150,151,152,153].  
Konačni cilj ovog rada bio je napraviti matricu koja će povezivati parametre, proračune i konstrukcijsku dokumentaciju, što je ovom matricom ujedno i realizirano. Ovom se matricom može pratiti utjecaj promjene određenog parametra na sve ostale parametre, a istovremeno je moguće pratiti utjecaj na dokumentaciju i proračune. Njezinim razvojem uočene su nove mogućnosti, poput mogućnosti optimiranja slijeda izrade



dokumentacije i slijeda proračuna. Uz navedene prednosti, (mogućnost vizualizacije utjecaja parametara i mogućnost optimizacije slijeda proračuna i dokumentacije), nedostatak je potreba za korištenjem zadnje verzije matrice prikazane u ovom radu i potreba za konstantnim dopunjavanjem/poboljšavanjem prema stvarnom stanju.

7. Novi program za particioniranje DSM matrica – slični programi koji se mogu naći u literaturi [94,122,123], nazivaju se WTM (eng. *Work Transformation Matrix*) i upotrebljavaju vrijeme za računanje na dijagonali, vjerojatnosti ponavljanja i krivulju učenja, ali fokusiraju se samo na jedno rješenje, koje u stvarnosti ovisi o tome koje će se povratne veze ostvariti, a koje ne, tj. ponavljanjima se unosi nesigurnost u sustav, pretpostavke su također rizik [30]. Za razliku od tih metoda, nova predložena metoda, u slučaju da su iteracije neophodne (tj. nema rješenja bez povratnih veza), osim što može isključivanjem dodatka za smanjenje vremena zbog paralelnog računanja ukazati na sva suboptimalna rješenja, slaže povratne veze u što manji broj kolona - kako iznad dijagonale, tako i ispod dijagonale. Time omogućuje da se što više aktivnosti mogu raditi paralelno, a tamo gdje su iteracije, brine da se jednom iteracijom omogući nova informacija za što više prethodnih aktivnosti. Ovdje se računa kao da se iteracija sigurno izvodi, a za ponavljanje rada služilo se time da je potrebno pola početnog vremena (ovo se može dopuniti krivuljom učenja u budućem istraživanju).

Po prvi put se iz rezultata može zamijetiti da je- osim što je kod particioniranja matrica cilj minimizirati udaljenost povratnih relacija od dijagonale kako bi se minimiziralo vrijeme iteracije, za optimiranje ukupnog vremena - potrebno optimirati i veze u dijelu matrice ispod dijagonale, s ciljem da se što više zadataka može izvoditi istovremeno. Ovaj program ima nedostatke, jedan od kojih je, ujedno i najveći nedostatak, ograničenje na veličinu matrice. Osim toga, nedostatak je u točnosti računanja povratnih iteracija. Bez obzira na nedostatke, program uvodi potpuno novi pristup particioniranju DSM matrica.

Predloženi program je zbog trenutnih mogućnosti računala ograničen na maksimalnu veličinu matrica do 12 x 12.

Pored već istaknutih, nedostaci provedenog istraživanja proizlaze iz pragmatičnih ograničenja. Naime, pored iskustva autora u konstruiranju generatora te opsežne DSM literature dane u osmom poglavlju, kao temelj prikupljanja znanja o generatoru i međuovisnostima između pojedinih elemenata razvijenog matričnog modela generatora, tj. konstrukcijskih parametara generatora,

proračuna, dokumentacije i komponenata, upotrebljavani su intervjui (opisani u poglavlju 3.2. rada). Intervjui su pripremani na temelju postojeće tehničke dokumentacije i procedura koje se upotrebljavaju tijekom razvoja generatora u tvrtki, te rezultatima DSM-a nastalima temeljem inicijalnih ili prethodnih intervjua s ekspertima iz pojedinih područja (elektromagnetni proračuni, vibracije, čvrstoća, materijali, tehnologija, propisi...). Različiti sudionici procesa imali su različita mišljenja o značaju pojedinih međuovisnosti, ili pak o slijedu procesa razvoja generatora. Ta višeznačnost dolazila je do značaja pri komentiranju rezultata razvijenih DSM matrica te je rezultirala promjenama stavova, koji su pak rezultirali korekcijama relacija u matricama i ponavljanju postupka. Kako sam proces razvoja generatora nije jednoznačan, ni u proceduri, pa tako niti u ishodu, svako je rješenje suboptimalno, pa se tako treba gledati i na rezultate postignute u ovom radu.

Završetkom DSM matrice, arhitekture konstrukcije i DSM matrice proračuna, dobio se uvid u beneficije proizašle iz rezultata tih matrica. Obzirom na dobivene rezultate i na zamijećeni nedostatak, odlučeno je da bi bilo dobro ići dalje i napraviti još opsežniju i dublju analizu na velikom vertikalnom hidrogenatoru, te se nakon toga nametnula ideja o izradi parametara generatora DSM-a. Pri samom početku izrade matrice već se naletjelo na jedan veliki problem, a to je broj parametara i određivanje granice, tj. odrediti što će sve tim parametrima biti obuhvaćeno. Kako je korišteni program bio ograničen na 255 parametara, a detaljnim raspisom parametara samo za kućište moguće je nabrojati njih 200-tinjak, bilo je potrebno iznaći način kojim će se obuhvatiti svi bitni parametri stroja, odnosno - modelom se obuhvatila cijela konstrukcija generatora, kao i cijeli elektromagnetski dio generatora. Kompromisom između projektnog ureda i konstrukcije, došlo se do konačnog broja parametara. Odabir parametara proizašao je iz stručnoga znanja osoba s dugogodišnjim radom na navedenom razvoju proizvoda. U okviru daljnjeg rada bi trebalo proći odabrane parametre, te po potrebi proširiti njihov broj, kako bi sva dokumentacija imala potrebne parametre. Ukoliko nekoj dokumentaciji nedostaje neki od parametara, utoliko će i redosljed tog dokumenta biti drugačiji od „idealnog“, a to dovodi i do krivog idealnog slijeda dokumentacije. Isto vrijedi i za proračune. U ovom radu se nisu razmatrali drugi alati koji postoje za analizu MDM matrica, poput *Cambridge Advance Modeller*, zatim *Loomeo*, *Soley Studio*, *Lattix* itd., jer cilj rada bio je napraviti program koji će biti jednostavan i intuitivan, namijenjen prvenstveno tvrtki Končar, kako bi se tamo što jednostavnije mogao implementirati i upotrebljavati.

Jedan od koraka ovog istraživanja, prema metodologiji, obuhvaća procjenu hipoteze te na kraju slijedi prihvaćanje ili odbijanje hipoteze. Hipoteza ovog rada glasi:

**Moguće je razviti model koji obuhvaća konstrukcijski proces, parametre konstrukcije i proračune koji će doprinijeti razvoju novih i revitaliziranih električnih generatora velike snage.**

Razvijenom MDM matricom koja obuhvaća parametre, konstrukcijski proces u obliku dokumentacije i proračune, može se doprinijeti razvoju novih generatora, time što već u početku postoji neki redoslijed dokumentacije i proračuna koji je suboptimalan, dok je arhitektura za promatranu izvedbu generatora stabilna, stoga se time može utjecati na smanjenje nepotrebnih iteracija i uštedjeti na vremenu. Osim toga, MDM kod razvoja novih proizvoda također može doprinijeti smanjenju nepotrebnih promjena ili određivanju utjecaja promjena nekog parametra koji traži kupac ili neka treća strana.

Također MDM može pomoći i kod revitalizacija starih objekata, na način da se jednostavno može vidjeti kakav je utjecaj promjene nekog od parametra. Tu se prvenstveno misli na mogućnost da kupac kod revitalizacije ima zahtjev za promjenom nekog od parametra, sada se jednostavno može vidjeti koliko promjena određenog parametra zahtijeva rada, te se jednostavnije i točnije mogu odrediti troškovi zahtijevanih promjena. Iz ovoga se može zaključiti da je hipoteza dokazana.

Osvrnimo se na pitanja uz hipotezu, koja glase:

1. Može li se razvojem predloženog modela steći bolji uvid u relacije unutar sustava?

Kao što je rečeno u poglavlju 5.3., razvojem modela parametara, dobio se uvid u razvojni proces, gdje se jako dobro može vidjeti priroda relacija, te je vidljivo da je to djelomično iterativan proces, većina iteracija je u dijelu elektromagnetskog dizajna, dok je dio iteracija između projekta i konstrukcije. Iz viđenog se može zaključiti da se razvojem modela parametara, dokumentacije i proračuna, može steći uvid u relacije unutar sustava.

2. Mogu li se analizom modela razviti preporuke za rekonstrukciju generatora, obzirom na međusobne utjecaje konstrukcijskih parametara unutar sustava?

Kao što je rečeno u poglavljima 5.3., 5.5. i ovom poglavlju, preporuka je kod novih i rekonstruiranih generatora slijediti optimirane sljedove dokumentacije i proračuna, dok je za slučaj rekonstrukcije, preporuka provjeriti utjecaje promijenjenih parametara na razvojni proces, kako bi se dobio uvid u potrebnu količinu rada. Analizom modela su razvijene preporuke, tako da je ujedno odgovor na postavljeno pitanje potvrđan.

Ova matrica u doktorskom radu napravljena je u kompromisu između desetak glavnih konstruktora i projekatanta te dosljedno opisuje stvarni proces razvoja generatora koji se trenutno primjenjuje. Bilo bi poželjno da se u slijedećem periodu dorađuje i dopunjuje, kako bi bolje opisivala stvarni proces, te kako bi u konačnici mogla znatno bolje optimirati proces razvoja proizvoda. Bilo da se radi o novom proizvodu ili rekonstrukciji (gdje nema dokumentacije), ova matrica može pomoći mladim inženjerima da budu upoznati sa strukturom razvojnog procesa, te da i oni mogu znati utjecaj promjene određenih parametara na ostale parametre, kao i na proračune i dokumentaciju.

Na početku rada, postavljena su tri istraživačka pitanja, na koje je dan odgovor u nastavku.

1. Je li moguće i kako smanjiti broj iteracija tijekom konstruiranja i projektiranja generatora?

Sam proces elektromagnetskog i konstrukcijskog dizajna visoko je iterativan postupak, što se može vidjeti i iz DSM matrice parametara. To znači da je iteracije potrebno raditi često, no iteracije kod određivanja parametara nisu loše [121], jer doprinose robusnosti ukupnog procesa [91]. Broj iteracija može se smanjiti samo na način da se slijede preporuke iz ovog rada, tj. da se upotrebljavaju optimirani sljedovi izrade dokumentacije i proračuna. Korištenje optimiranih sljedova ne garantira da neće biti iteracija i ponavljanja poslova, no barem omogućava držanje broja iteracija minimalnim, što je također u skladu i s preporukama Phala & Beitz, prema [3].

2. Koje su mogućnosti daljnjeg poboljšavanja razvoja generatora?

Istaknimo neke mogućnosti daljnjeg poboljšavanja razvoja generatora: za budući razvoj tvrtke najpotrebnije bi bilo najprije nastaviti s verifikacijom i dopunom MDM matrice, kako bi najtočnije opisivala stvarni razvojni proces. Završetkom toga, otvaraju se mogućnosti, no to ovisi o potrebi i želji zainteresiranih. Može se nastaviti proširivanjem matrice na druge domene, poput tehnologije, prodaje, nabave, pripreme, timova itd., kako bi se i rad drugih odjela uskladio s istim razvojnim procesom. Ako se odluči ići na proširivanje matrice s odjelom pripreme, obavezno treba razmišljati o uvođenju slobodnih kapaciteta i modelu s više projekata paralelno (ali da ne počinju u isto vrijeme). Osim toga, kod ovako kompleksnih proizvoda može se razmisliti o razvijanju metodologije za izradu matrice parametara, a ako bi se to moglo napraviti, time bi se znatno olakšala promjena matrice za druge izvedbe generatora, te bi se tako mogao pokriti cijeli proizvodni program.

3. Mogu li se na temelju razvijenog modela konstrukcije generatora uočiti potencijalna poboljšanja konstrukcije?

Na temelju razvijenog modela konstrukcije generatora ne vide se očite mogućnosti poboljšanja konstrukcije generatora, što je posljedica, kao što je ranije rečeno,

dugogodišnjeg razvoja stroja. No moguće je uočiti potencijalna poboljšanja, najprije poboljšanje redoslijeda izvođenja proračuna i dokumentacije, čime se minimiziraju nepotrebne iteracije (točka 2).

Napravljeni su modeli i analize cjelovitog pristupa razvoju generatora, koji znatno povećavaju znanje i razumijevanje razvojnog procesa generatora, do sada je bilo jasno da je razvojni proces iterativan, ali nije se znalo točno koji dio procesa je iterativan i koliko. Iz napravljenog je modela sada jasno da se većina iteracija radi unutar elektromagnetnog proračuna (tj. unutar odjela projekta), dok je drugi dio iteracija sprega konstrukcije i projekta. Ostale iteracije mogu se svesti na minimum. U stvarnosti, te iteracije unutar projekta i između projekt-konstrukcija, utječu na ukupno vrijeme procesa razvoja generatora. S druge strane, kao što je i u literaturi [91] spomenuto, ovdje nije cilj eliminirati iteracije, a greška u odjelu projekta je najskuplja greška i potrebno je minimizirati mogućnost iste u fazi projekta. U svrhu minimiziranja mogućnosti pogreške, iteracije su poželjne, jer se njima stalno kontrolira napravljeno te se lakše otkriju greške. Sve skupa utječe na razvojni proces, koji je zbog iteracija robusniji. Ako bi bilo moguće, za cijeli razvojni proces bi najveća korist bila napraviti elektromagnetski dizajn spregnut s konstrukcijskim dizajnom i zaključati ga (da nakon te točke nema promjena), a tek nakon te točke krenuti s daljnjim konstrukcijskim dizajnom. Često se u početku radi daljnja razrada, a nakon par tjedana ili mjeseci dođe promjena u projektom dizajnu, koja zahtijeva doradu kompletne konstrukcijske dokumentacije, a ljudi toga nisu svjesni. Ovaj rad bi ljudima trebao pomoći da budu svjesniji toga što kasnija promjena nekog parametra znači za daljnji razvojni proces. Predložene promjene u redoslijedu izrade dokumentacije i proračuna ne utječu znatno na proces, niti ga mijenjaju temeljito, to je više inkrementalna promjena procesa, u smislu da se tim novim, točno definiranim redoslijedom, može očekivati skraćenje ukupnog vremena razvojnog procesa.

Za kraj, osvrnimo se na doprinose ovog rada. U slučaju da bi se implementirao i upotrebljavao u tvrtki Končar, ovaj bi rad mogao imati praktični doprinos, tj. implementacija predloženog modela omogućit će konstruktorima, projektantima i voditeljima razvoja učinkovitije upravljanje, razvojem novih i revitaliziranih generatora. Također, ovaj model je baza (znanja) koja bi se godinama trebala dopunjavati i proširivati, s ciljem poboljšanja razvojnog procesa i daljnjeg napretka tvrtke.

Osim praktičnog doprinosa, teorijski doprinos je razvoj integralnog modela razvojnog procesa vertikalnog električnog generatora velike snage, koji povezuje parametre, dokumentaciju

i proračune, optimizacija slijeda proračuna i dokumentacije, praćenje utjecaja parametara na druge domene te razvoj nove metode za particioniranje matrice.

## 7. Zaključak

---

Temeljem u raspravi izloženih rezultata istraživanja, pored iznesenih i obrazloženih nedorečenosti istraživanja, može se zaključiti da rad sadrži znanstveni i praktični doprinos.

Predloženi integralni model - koji obuhvaća dokumentaciju, proračune i parametre konstrukcije - pomaže konstruktorima, projektantima i menadžerima tijekom razvoja novih i revitaliziranih generatora, što je pragmatični, inženjerski doprinos istraživanja.

Najveći značaj ovog rada za industriju je u višedomenskoj matrici, koja povezuje parametre, proračune i nacрте, optimira redoslјed proračuna i redoslјed nacрте u ovisnosti o redoslјedu parametara (koji su u suboptimalnom slijedu). Veliki značaj industriji od MDM matrice je mogućnost vizualnog prikaza utjecaja promjene parametara, a ta MDM matrica tvrtki stvara intelektualno vlasništvo, kroz pohranjenu bazu znanja.

Osim praktičnog doprinosa za industriju, originalni rezultati ovog istraživanja su:

1. Razvoj DSM matrice proračuna generatora.
2. Razvoj DSM matrice arhitekture generatora.
3. Razvoj DSM matrice parametara generatora.
4. Razvoj DMM (višedomenske) matrice koja povezuje parametre i proračune.
5. Razvoj DMM (višedomenske) matrice koja povezuje parametre i dokumentaciju.
6. Razvoj MDM (višedomenske) matrice koja povezuje proračune, parametre i dokumentaciju.
7. Razvoj novog načina optimiranja redoslјeda izrade dokumentacije i proračuna iz MDM matrice.
8. Razvoj programa za praćenje utjecaja promjene parametra u MDM matrici.
9. Razvoj prijedloga novog programa za particioniranje.

U radu predložene matrice, proizašle su nakon tri revizije stručnjaka u konstrukcijskom i projektnom odjelu tvrtke. Kao što je već istaknuto, kod određivanja nekih veza postojala je neusklađenost u mišljenju različitih stručnjaka, a takve nesuglasice su se rješavale na način da je prevladalo mišljenje većine.

Zanimljivo je da matrica ove veličine ne može biti jednoznačno definirana. Različiti sudionici razvojnog procesa imaju različite, često subjektivne vizije, veza kakve bi one trebale biti i svoj slijed kako izvode proračune ili generiraju dokumentaciju. Drugim riječima, postignuta su rješenja i prikazana matrica jest suboptimalna.

Fokus ovog rada nije bio razvoj novog programa za particioniranje, no ideja za razvoj nove metode pojavila se tijekom analize literature, odnosno proučavanja u literaturi prikazanih metoda za particioniranje.

Predložena metoda, za razliku od drugih metoda, u slučaju da su iteracije neophodne (tj. nema rješenja bez povratnih veza), može:

- ukazati na sva suboptimalna rješenja
- optimirati povratne veze u što manji broj kolona
- optimirati veze ispod dijagonale u što manji broj kolona.

Predloženi program može u budućim istraživanjima omogućiti razvoj učinkovitijih sustava koji će biti znatno pouzdaniji i da se daljnjim doradama i unaprjeđenjima, ovoj metodi pruži prilika da se pokaže na većim matricama, čime bi postala korisna i za industriju.

Zaključno istaknut ćemo znanstvene doprinose ovog istraživanja:

- Razvoj integralnog modela razvojnog procesa vertikalnog električnog generatora velike snage, koji povezuje parametre, dokumentaciju i proračune.
- Optimizacija slijeda proračuna i dokumentacije, temeljenja na suboptimalnom slijedu parametara.
- Praćenje utjecaja parametra na druge domene (u ovom slučaju dokumentaciju i proračune).
- Razvoj nove metode za particioniranje matrice, koja ukazuje na više suboptimalnih rješenja i koja optimira veze ispod i iznad dijagonale.

Metoda razvoja modela razvojnog procesa vertikalnog električnog generatora velike snage može se primijeniti i na druge slične proizvode. Iako razvijeni model ima ograničenja koja su istaknuta u razmatranjima, omogućio je stjecanje novih uvida u razvojni proces generatora, te je koristan alat u razvoju novih i revitalizaciji starih strojeva. Stoga citirajmo na kraju misao profesora Cullya: „Svi modeli su krivi, ali samo neki su korisni.“ [6].



## 8. Literatura

---

- [1] Cooper R.G., Kleinschmidt J.E., *New Product Processes at Leading Industrial Firms*, Industrial Marketing Management, 20, 137–147, 1991.
- [2] Herstatt C., Verworn B., *The "Fuzzy Front End" of Innovation*, Working paper No.4, Hamburg, 2001.
- [3] Pahl, G. & Beitz, W., *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer, 2007.
- [4] Howard T., Culley S., et.al., *Idea generation in conceptual design*, Design 2008, Dubrovnik, Croatia, 2008.
- [5] Glassman B., *Improving idea generation and idea management in order to better manage the fuzzy front end of innovation*, West Lafayette, Indiana: Purdue university, Dissertation, 2009.
- [6] Alves J., Marques M.J., et.al., *Building creative ideas for successful new product development*, 9th European conference on creativity and innovation, Lodz, Polonia, 2005.
- [7] Kannengiesser U., Gero J., *Can Pahl and Beitz' systematic approach be a predictive model of designing?*, Cambridge University Press, vol 3, ed24, 2017, DOI: 10.1017/dsj.2017.24
- [8] Pektas S., Pultar M., *Modelling detailed information flows in building design with the parameter-based design structure matrix*, Elsevier, 2005, DOI: 10.1016/j.destud.2005.07.004
- [9] Pultar M., *Progress based construction scheduling*, Journal of Construction Engineering and Management, 1990, Vol 116, No 4, pp 670-688
- [10] Wakefield R.R., Damrianant J., *Petri net modelling – a simulation tool for use in construction process re-engineering*, International Journal of IT in Architecture, Engineering and Construction, 1999, Vol 1, No 2, pp 20-34
- [11] Baldwin A.N., Austin S., Hassan T.M., Thorpe A., *Modelling information flow during the conceptual and schematic stages of building design*, Construction Management and Economics, 1999, Vol 17, pp 155-167
- [12] Sanvido V.E., Norton K.J., *Integrated design process model*, Journal of Management in Engineering, 1994, Vol 5, pp 55-62
- [13] Karhu V., *Proposed new method for construction process modelling*, International Journal of Computer Integrated Design and Construction, 2000, Vol 2, No 3, pp 166-182
- [14] Browning T.R., *Modelling and analyzing cost, schedule, and performance in complex system product development*, Ph.D. Dissertation, MIT, 1998.
- [15] Browning T.R., *Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities*, IEEE, 2015, DOI: 10.1109/TEM.2015.2491283

- [16] Hornby A.S., Kavanagh K., Ashby M., *Oxford advanced learner's English dictionary 5<sup>th</sup> edition*, Oxford University Press, 1995, UK.
- [17] Rotheroe K., *A vision for parametric design*, Architecture Week, 2002, [http://www.architectureweek.com/2002/0710/tools\\_1-1.html](http://www.architectureweek.com/2002/0710/tools_1-1.html)
- [18] Rundell R.L., *Parametrics in building design*, Online Resource for the CAD Community, 2002, <http://www.cadserver.co.uk/common/viewer/archive/2002/Apr/9/feature.htm>
- [19] Rouibah K., Caskey K.R., *Change management in concurrent engineering from a parameter perspective*, Computers in Industry, 2003, Vol 50, pp 15-34.
- [20] de la Garza J., Alcantara P., *Using parameter dependency network to represent design rationale*, Journal of Computing in Civil Engineering, 1997, Vol 11, No 2, pp 102-112
- [21] Clarkson P.J., Hamilton J.R. "*Signposting*", a parameter-driven task-based model of the design process, Research in Engineering Design, 2000, Vol 12, pp 18-38.
- [22] Browning T.R., *Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A review and New Directions*, IEEE, 2001, Vol 48, No 3 DOI: [10.1109/17.946528](https://doi.org/10.1109/17.946528)
- [23] Erat S., Kavadias S., *Sequential testing of Product designs: implications for learning*, Management Science, 54 (5), 956–968, 2008.
- [24] Smith P.G., Reinertsen D.G., *Shortening the product development cycle*, Research-Technology Management, 35 (3), 44–49, 1992.
- [25] Eppinger S., Browning T., *Design Structure Matrix Methods and Applications*, The MIT Press, London, England, 2012.
- [26] Maheswari U., Varghese K., *A Structured Approach to Form Dependency Structure Matrix for Construction Projects*, International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC, Italy, 2005.
- [27] MacCormack A., *Towards a contingent model of the new product development process: a comparative empirical study*, Harvard Business School Working Paper Series, 00-077, 2000.
- [28] Lindemann U., Maurer M., Braun T., *Structural Complexity Management: An Approach for the Field of Product Design*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [29] Bonelli S., Gonzalez A., *Application of the Design Structure Matrix (DSM) to the Real Estate Development Process using Modular Construction Methods*, Degree of Master of Science, MIT, 2012.
- [30] Steward D.V., *DSM Foundations and Applications, and an Update on the Explainer*, 17th International Dependency and Structure Modeling Conference, DSM 2015, 2015

- [31] Steward D., *The design structure system - A method for managing the design of complex systems*, IEEE, Vol. 28, No 3. 1981a
- [32] Steward D., *Systems Analysis and Management: Structure, Strategy and Design*, Petrocelli Books Inc., 1981b
- [33] Cooper R.G., Edgett S., *Maximizing productivity in product innovation*, Research-Technology Management, 51 (2), 47–58, 2008.
- [34] Ho Y., Lin C., *A concurrent function deployment-based and concurrent engineering-based product development method for original design manufacturing companies*, Journal of Engineering Design, 20 (1), 21–55, 2009.
- [35] Eppinger S., Salminen V., *Patterns of product development interactions*, International Conference on Engineering Design, ICED 01 Glasgow, 2001.
- [36] Sharon A., de Weck O., Dori D., *Project Management vs. Systems Engineering Management: A Practitioners View on Integrating the Project and Product Domains*, System Engineering, 2011, Vol 14, No 4, DOI: 10.1002/sys.20187
- [37] Farooq M.A., Araújo A., Tavares S.M.O., Nóvoa H., *Evaluation of a non-conformity matrix complexity using components modularity metrics*, 15 International DSM conference, 2013.
- [38] Avnet M.S., Weigel A.L., *An application of the Design Structure Matrix to Integrated Concurrent Engineering*, Acta Astronautica, Vol. 66, 2010.
- [39] Konstantinidis E., Katsavounis S., Botsaris P., *Design structure matrix (DSM) method application to issue of modeling and analyzing the fault tree of a wind energy asset*, Wind energy, 2019, DOI: 10.1002/we.2454
- [40] Talić A., *DSM Method - design structure matrix*, 17th International Research conference, Istanbul, Turkey, 2013.
- [41] Tilstra A., Seepersad C., Wood K., *DeA high-definition design structure matrix (HDDSM) for the quantitative assessment of product architecture*, Journal of Engineering Design, London, England, 2012
- [42] Farooq M.A., Tavares S.M.O., Nóvoa H. Araújo A., *An application of Knowledge Management in Design Structure Matrix for a process improvement phase*, 16 International dependency and structure modelling conference, DSM 2014.
- [43] Tavares S.M.O., Farooq M.A., Araújo A., Nóvoa H., *Application of non-conformity matrix to predict system interactions in complex quality problems*, Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Springer, 2013.
- [44] D.C. Wynn, D.F. Wyatt, S.M.T. Nair and P.J. Clarkson: *An Introduction to the Cambridge Advanced Modeller*, Proceedings of MMEP 2010, Cambridge, UK, 2010."

- [45] Oloufa A.A., Hosni Y.A., Fayez M., Axelsson P., *Using DSM for modeling information flow in construction design projects*, Civil Engineering and Environmental Systems, 2004.
- [46] Carrascosa M., Eppinger S., Whitney D., *Using the design structure matrix to estimate product development time*, ASME, 1998.
- [47] Farsad M., Malaek S.M.-B., *Application of Dependency Structure Matrix to Airspace Sectorization and Improving the Distribution of the Workload Among Controllers*, Journal of Modern Project Management, vol. 3, pp. 94-99, 2015
- [48] Yao-Tsung Ko, *An Innovative Matrix-Based Approach for Designing Product Variety*, International Journal of Systematic Innovation, 2010.
- [49] Danilovic M., Browning T., *Managing complex product development projects with design structure matrices and domain mapping matrices*, International Journal of Project Management, Vol. 25, 2007.
- [50] Flanagan, T.L., C.M. Eckert, J. Smith, T. Eger, and P.J. Clarkson, *A Functional Analysis of Change Propagation*, 14th International Conference on Engineering Design (ICED), Stockholm, Sweden, 2003.
- [51] Kang, Y. and D. Tang, *Matrix-based Computational Conceptual Design with Ant Colony Optimisation*, Journal of Engineering Design, vol. 24, pp. 429-452, 2013.
- [52] Deubzer, F., M. Kreimeyer, U. Herfeld, and U. Lindemann, *A Strategy for Efficient Collaboration in Virtual Product Development Environments*, 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, Aug 28-31, 2007.
- [53] Bonjour, E., S. Deniaud, and J.-P. Micaelli, *A Method for Jointly Drawing Up the Functional and Design Architectures of Complex Systems during the Preliminary System-Definition Phase*, Journal of Engineering Design, vol. 24, pp. 305-319, 2013.
- [54] Jankovic, M., V. Holley, and B. Yannou, *Multiple-domain Design Scorecards: A Method for Architecture Generation and Evaluation through Interface Characterisation*, Journal of Engineering Design, vol. 23, pp. 743-763, 2012
- [55] Bonjour, E., S. Deniaud, M. Dulmet, and G. Harmel, *A Fuzzy Method for Propagating Functional Architecture Constraints to Physical Architecture*, Journal of Mechanical Design, vol. 131, 2009.
- [56] Tang, D., G. Zhang, and S. Dai, *Design as Integration of Axiomatic Design and Design Structure Matrix*, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, vol. 25, pp. 610-619, 2009
- [57] Tang, D., R. Zhu, S. Dai, and G. Zhang, *Enhancing Axiomatic Design with Design Structure Matrix*, Concurrent Engineering: Research & Applications, vol. 17, pp. 129-137, 2009.

- [58] Dong, Q., *Predicting and Managing System Interactions at Early Phase of the Product Development Process*, Ph.D., M.E., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2002.
- [59] Maier, J.R.A. and G.M. Fadel, *Affordance-based Design Methods for Innovative Design, Redesign and Reverse Engineering*, Research in Engineering Design, vol. 20, pp. 225-239, 2009.
- [60] Brown, N., R.L. Nord, I. Ozkaya, and M. Pais, *Analysis and Management of Architectural Dependencies in Iterative Release Planning*, 9th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA), Boulder, CO, 2011.
- [61] Browning T., Deyst J., Eppinger S., Whitney D., *Adding Value in Product Development by Creating Information and Reducing Risk*, IEEE, Vol. 49, NO. 4, 2002, DOI: 10.1109/TEM.2002.806710
- [62] Hurst K.B., *Applying the Engineering Systems Multiple-Domain Matrix Framework to Nanosatellite Space Systems*, MIT, 2017
- [63] Sosa M., *A structured approach to predicting and managing technical interactions in software development*, Research Engineering Design, 2008, DOI 10.1007/s00163-007-0039-5
- [64] Kreimeyer M., Lindemann U., *Complexity Metrics in Engineering Design*, Springer-Verlag, Berlin, 2011.
- [65] Kherbachi S., Yang Q., Hong Y.S., *Multi-Domain Matrix as a Framework for Global Product Development Project Process*, Journal of Modern Project Management, vol. 3, pp. 108-113, 2015.
- [66] Manojkumar M., Vimal K.E.K., Hammed A.Z., Jayakrishna K., *Investigations on Interrelations Between Design for X-Guidelines and Product Life cycle Phases-An MDM Based Approach*, Proceedings of ICDMC 2019, 2019.
- [67] Wilschut T., Etman L.F.P., Rooda J.E., Vogel J.A., *Generation of a function-component-parameter multi-domain matrix from structured textual function specifications*, Research in Engineering Design, 2018, DOI: 10.1007/s00163-018-0284-9
- [68] Bartolomei J.E., Hastings D.E., Neufville R., Rhodes D.H., *Engineering Systems Multiple-Domain Matrix: An Organizing Framework for Modeling Large-Scale Complex Systems*, MIT, 2011, DOI 10.1002/sys.20193
- [69] Triplat I., Vukšić M., Marjanović D., *Application of DSM to mechanical calculations of vertical Hydrogenerator*, International Design Conference, Design 2016, Dubrovnik, Croatia.

- [70] Triplat I., Marjanović D., Stamać L., *MDM Matrix of the Vertical Hydrogenerator*, Tehnički vjesnik, Vol 24, pp 201-205, Croatia, 2017.
- [71] Reich Y., *The Study of Design Research Methodology*, Journal of Mechanical Design, 1995, Vol 117
- [72] Kikuchi R., Amaral P.B., *Conceptual schematic for capture of biomethane released from hydroelectric power facilities*, Bioresource Technology 99, 2007, pp 5967-5971
- [73] Dursun B., Gokol C., *The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey*, Renewable Energy 36, 2011, pp 1227-1235
- [74] Al-Zubaidy S., Rigit A., *Performance investigation of a hydroelectric power station at Batang AI-SARAWAK*, International Journal of Energy Research, 1997, Vol 21, pp 1405-1412
- [75] Zhong Y., Power G., *Environmental impacts of Hydroelectric projects on fish resources in China*, Regulated Rivers: Research & Management, 1996, Vol 12, pp 81-98
- [76] Millet C., Nguyen D.N., Lépine L., Bélec M., Lessard-Déziel D., and Guddem C., *Case Study - High Ozone Concentration in Hydro Generators*, IEEE Electrical Insulation Conference, 2009
- [77] Pereira B.S.A, Sobrinho P.M., Silveira J.L., *The use of LINGO programming language to develop a computer tool to provide a technical and economic analysis of a hydraulic potential that allows the application of Francis turbines and Kaplan turbines*, The XI Latin Congress Electricity Generation and Transmission, 2015
- [78] Macintyre, A. J., *Máquinas motrizes hidráulicas*, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983, pp 649."
- [79] Končar *Interni propisi, nacrti i dokumenti*
- [80] Walker J.H., *Large Synchronous Machines Design, Manufacture, and Operation*, Clarendon Press Oxford, New York, 1981.
- [81] Kirkpatrick J., *Hydrogenerator Design Manual*, Bureau of Reclamation, 1992
- [82] Decker Kerl-Heinz, *Elementi Strojeva*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [83] Wiedemann E., Kellenberger W., *Konstruktion elektrischer Maschinen*, Springer-Verlag, New York, 1967.
- [84] Brady T.K., *Utilization of Dependency Structure Matrix Analysis to Assess Implementation of NASA's Complex Technical Projects*, MIT, 2002
- [85] Steward D., *On an Approach to Techniques for the Analysis of the Structure of Large Systems of Equations*, SIAM, Vol. 4, No 4., 1962.
- [86] Steward D., *Partitioning and Tearing Systems of Equations*, SIAM, Vol. 2, No 2., 1965.

- [87] Karniel A., Reich Y., *Managing the Dynamics of New Product Development Processes - A New Product Lifecycle Management Paradigm*, Springer-Verlag, 2011.
- [88] Yassine A., Braha D., *Complex Concurrent Engineering and the Design Structure Matrix Method*, Concurrent Engineering: Research and Applications, 2003, Vol 11, No 3, DOI: 11.1177/106329303034503
- [89] Cho S.H., Eppinger S., *Product development process modeling using advanced Simulation*, Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.
- [90] Lévárdy V., *Model-based Framework for the Adaptive Development of Engineering Systems*, Dissertation, Technischen Universität München, 2006
- [91] Yassine A., *Investigating product development process reliability and robustness using simulation*, Journal of Engineering Design, 2007, DOI: 11.1080/09544820601011690
- [92] Maurer M., *Structural Awareness in Complex Product Design*, Dissertation, 2007
- [93] Abdelsalam H.M.E., Bao H.P., *A Simulation-Based Optimization Framework for Product Development Cycle Time Reduction*, IEEE Transactions on Engineering Management, 2006, Vol 53, No 1
- [94] Smith R.P., Eppinger S.D., *Identifying Controlling Features of Engineering Design Iteration*, Management Science, 43 (3), 276–293, 1997.
- [95] Eckert C.M., Keller E., Chris, Clarkson J., *Supporting change processes in design: Complexity prediction and reliability*, Reliability Engineering and System Safety, 2006, pp 1521-1534, DOI: 10.1016/j.ress.2006.01.012
- [96] Browning T.R., Fricke E., Negele H., *Key Concepts in Modeling Product Development Processes*, Systems Engineering, Vol. 9, No 2, 2006.
- [97] Browning T., Eppinger S., *Modeling Impacts of Process Architecture on Cost and Schedule Risk in Product Development*, IEEE, Vol. 49, NO. 4, 2002, DOI: 10.1109/TEM.2002.806709
- [98] Huberman B., Wilkinson D.M., *Performance Variability and Project Dynamics*, Computational & Mathematical Organization Theory, 2006.
- [99] Sered Y., Reich Y., *Standardization and modularization driven by minimizing overall process effort*, Computer-Aided Design, 2006, DOI: 10.1016/j.cad.2005.11.005
- [100] Schilcher C., *Implizite Dimensionen des Wissens und ihre Bedeutung für betriebliches Wissensmanagement*, Darmstadt, 2006.
- [101] Haase T., Termath W., Martsch M., *How to Save Expert Knowledge for the Organization: Methods for Collecting and Documenting Expert Knowledge Using Virtual Reality Based Learning Environments*, Procedia Computer Science. 25:236 – 246, 2013.

- [102] Kolarić S., Beck J., Stolterman E., *On the hierarchical levels of design knowledge*, Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, Volume 1, pp. 51 – 60, 2020.
- [103] Lynch, C. et al., *Concepts, Structures, and Goals: Redefining Ill-Definedness*, International Journal of Artificial Intelligence in Education, Vol. 19 No. 3, pp. 253-266, 2009.
- [104] Cross, N., *Designerly ways of knowing: Design discipline versus design science*, Design Issues, Vol. 17 No. 3, pp. 49-55.,2001, <https://doi.org/10.1162/074793601750357196>
- [105] Le Masson P., Dorst K., *Design theory: history, state of the art and advancements*, Research Engineering Design, 2013, DOI: 10.1007/s00163-013-0154-4
- [106] Hatchuel A., Masson P., Weil B., *C-K Theory: Modelling Creative Thinking and Its Impact on Research*, Creativity, Design Thinking and Interdisciplinarity, pp. 169-183., 2017, DOI: 10.1007/978-981-10-7524-7\_11
- [107] Dick M, Braun M, Eggers I, Hildebrandt N. *Wissenstransfer per Triadengespräch. Eine Methode für Praktiker*. Zeitschrift Führung + Organisation 2010; 79(6):375–383, 2013
- [108] Sherman D.M., Yassine A.A., *Characterizing Complex Products Architectures*, Characterizing complex product architectures. System Engineering, 2003, DOI: 10.1002/sys.10056
- [109] Lano R.J., *A technique for software and systems design (TRW series on software technology)*, Elsevier, 1979
- [110] Hauser J., *How Puritan-Bennet Used the House of Quality*, Sloan Management, 1993, Vol 34, No 3
- [111] Pimmler T.U., Eppinger S.D., *Integration Analysis of Product Decompositions*, ASME Design Theory and Methodology Conference, Minneapolis, 1994
- [112] Sosa M.E., Eppinger S.D., Rowles C.M., *Identifying Modular and Integrative Systems and Their Impact on Design Team Interactions*, Journal of Mechanical Design, 2003, Vol 125, DOI: 10.1115/1.1564074
- [113] Yassine A., *An Introduction to Modeling and Analyzing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method*, University of Illinois,
- [114] George V.P., Allen T.J., *Relational Data in Organizational Settings: An Introductory Note for Using AGNI and Netgraphs to Analyze Nodes, Relationships, Partitions and Boundaries*, MIT, 1993.
- [115] McCord K.R., Eppinger S.D., *Managing the Integration Problem in Concurrent Engineering*, 1993.
- [116] Gannt H.L., *Influence of Executives*, Modern Manufacturing A partnership of Idealism and Common Sense, 1919, pp 257-263.



- [117] Browning T.R., Ramasesh R.V., *A Survey of Activity Network-Based Process Models for Managing Product Development Projects*, Production and Operations Management, 2007, pp 217-240.
- [118] Browning T.R., *On Customer Value and Improvement in Product Development Processes*, System Engineering, 2003, DOI: 10.1002/sys.10034
- [119] Browning T.R., Heath R.D., *Reconceptualizing the effects of lean on production costs with evidence from the F-22 program*, Journal of Operations Management, 2009, DOI: 10.1016/j.jom.2008.03.009
- [120] Eppinger S., Whitney D., Smith R., Gebala D., *A model-based method for organizing tasks in product development*, Research in Engineering Design, Springer, London, England, 1994.
- [121] Lévárdy V., Browning T.R. *An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management*, IEEE Transactions on Engineering Management, Vol56, No 4, 2009
- [122] Smith P.R., Eppinger S., *A Predictive Model of Sequential Iteration in Engineering Design*, Management Science, 1997
- [123] Wynn D., Clarkson P.J., *Process models in design and development*, Research Engineering Design, 2017.
- [124] Cook I., Coates G., *Optimising the time-based design structure matrix using a divide and hybridise algorithm*, Journal of Engineering Design, 2016, DOI:10.1080/09544828.2016.1146236
- [125] Maier, J.F., D.C. Wynn, W. Biedermann, U. Lindemann, and P.J. Clarkson, *Simulating Progressive Iteration, Rework and Change Propagation to Prioritise Design Tasks*, Research in Engineering Design, vol. 25, pp. 283-307, 2014.
- [126] Yang, Q., T. Yao, T. Lu, and B. Zhang, *The Impact of Uncertainty and Ambiguity Related to Iteration and Overlapping on Schedule of Product Development Projects*, Int. J. of Project Management, vol. 32, pp. 827-837, 2014.
- [127] Li, W. and Y.B. Moon, *Modeling and Managing Engineering Changes in a Complex Product Development Process*, Winter Simulation Conference, Phoenix, AZ, Dec 11-14, 2011.
- [128] Yang, Q., Zhang X., Yao T., *An Overlapping-based process model for managing schedule and cost risk in product development*, Concurrent Engineering, 2012, DOI: 10.1177/1063293X12438701.
- [129] Srour, I.M., M.-A.U. Abdul-Malak, A.A. Yassine, and M. Ramadan, *A Methodology for Scheduling Overlapped Design Activities Based on Dependency Information*, Automation in Construction, vol. 29, pp. 1-11, 2013.

- [130] Xiao R., Si S., *Research on the process model of product development with uncertainty based on activity overlapping*, Integrated Manufacturing Systems, 2003, DOI:10.1108/09576060310491928
- [131] Lin J., Chai K.H., Wong Y.S., Brombacher A.C., *A dynamic model for managing overlapped iterative product development*, European Journal of Operational Research, 2007, DOI:10.1016/j.ejor.2006.12.022
- [132] Campos Silva, D.D., L.P. Santiago, and P.M.S. Silva, *Impact of Premature Information Transfer on Cost and Development Time of Projects*, IEEE Trans. on Eng. Mgmt., vol. 59, pp. 692-704, 2012.
- [133] Yassine A., Falkenburg D., Chelst K., *Engineering design management: an information structure approach*, International Journal of Production Research, 1999, Vol 37, No 13
- [134] Ko Y.-T., *A dynamic planning method for new product development management*, Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2010, Vol 27, No 2, DOI:10.1080/10170660903526063
- [135] Karniel, A. and Y. Reich, *Formalizing a Workflow-Net Implementation of Design-Structure-Matrix-Based Process Planning for New Product Development*, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, vol. 41, pp. 476-491, 2011.
- [136] Karniel, A. and Y. Reich, *Multi-level Modelling and Simulation of New Product Development Processes*, Journal of Engineering Design, vol. 24, pp. 185-210, 2013.
- [137] Kusiak A., Larson T.N., WanJ65:J152g J., *Reengineering of Design and Manufacturing Processes*, Computer & Industrial Engineering, 1994, 26(3), 521-536.
- [138] Chiriac, N., K. Hölttä-Otto, D. Lysy, and E.S. Suh, *Level of Modularity and Different Levels of System Granularity*, Journal of Mechanical Design, vol. 133, 2011.
- [139] Suh, E.S., N. Chiriac, and K. Hölttä-Otto, *Seeing Complex System through Different Lenses: Impact of Decomposition Perspective on System Architecture Analysis*, Systems Engineering, vol. 18, pp. 229-240, 2015.
- [140] Helmer, R., A. Yassine, and C. Meier, *Systematic Module and Interface Definition using Component Design Structure Matrix*, Journal of Engineering Design, vol. 21, pp. 647-675, 2010.
- [141] Selva, D. and E.F. Crawley, *Exploring Packaging Architectures for the Earth Science Decadal Survey*, IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, Mar 5-12, 2011.
- [142] Alizon, F., S.K. Moon, S.B. Shooter, and T.W. Simpson, *Three Dimensional Design Structure Matrix with Cross-Module and Cross-Interface Analyses*, ASME International

- Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Las Vegas, NV, Sep 4-7, 2007.
- [143] Kalligeros K., de Weck O., de Neufville R. *Platform identification using Design Structure Matrices*, INCOSE, 2006
- [144] Čamber A., *Završni rad*, 2008, Zagreb
- [145] Blomberg K., Eriksson J., Svensson J., *Mapping of relations and dependencies using DSM-DMM analysis*, Bachelor's thesis, 2005.
- [146] Sunnersjö, S., M. Cederfeldt, F. Elgh, and I. Rask, *A Transparent Design System for Iterative Product Development*, Journal of Computing and Information Science in Engineering, vol. 6, pp. 300-307, 2006.
- [147] Bauer W., Daniilidis C., Lindemann U., *Approach for a Modularization Driven System Definition Using Multiple Domains*, 13th International dependency and Structure Modelling Conference, DSM 2011, Cambridge, 2011
- [148] Maisenbacher S., Kernschmidt K., Kasperek D., VogelHeuser b., Maurer M., *Using DSM and MDM Methodologies to Analyse Structural SysML Models*, IEEE, 2013
- [149] Pointurier C., Marle F., Jaber H., *Managing a Complex Project Using a Risk-Risk Multiple Domain Matrix*, Journal of Modern Project Management, vol. 3, pp. 32-37, 2015.
- [150] Alfariš A., Siddiqi A., Rizk C., O. de Weck, Svetinovic D., *Hierarchical Decomposition and Multidomain Formulation for the Design of Complex Sustainable Systems*, Journal of Mechanical Design, vol. 132, pp. 1-13, 2010.
- [151] Hamraz B., Caldwell N.H.M., Clarkson P.J., *A Multidomain Engineering Change Propagation Model to Support Uncertainty Reduction and Risk Management in Design*, Journal of Mechanical Design, vol. 134, 2012.
- [152] Kreimeyer M., Braun S., Gürtler M., Lindemann U., *Extending Multiple Domain Matrices to Allow for the Modeling of Boolean Operators in Process Models*, International Conference on Engineering Design, Stanford, CA, Aug 24-27, 2009.
- [153] Maurer M., Lindemann U., *The Application of the Multiple-Domain Matrix*, IEEE, 2008
- [154] Tran J., Stowe M., Plattner M., Zimmermann M., *Using the Design Structure Matrix for Space System Design*, 21st International dependency and Structure Modeling Conference, DSM 2019, Monterey, 2019
- [155] Sunnersjo S., *Intelligent Computer Systems in Engineering Design Principles and Applications*, Springer, 2016, DOI 10.1007/978-3-319-28125-4

- [156] Danilovic M., Sandkull B., *The use of dependence structure matrix and domain mapping matrix in managing uncertainty in multiple project situations*, International Journal of Project Management, Vol. 23, 2005.
- [157] Yassine A., Whitney D., Lavine J., Zambito T., *DO-IT-RIGHT-FIRST-TIME Approach to Design Structure Matrix (DSM) Restructuring*, Proceedings of the 12th International Conference on Design Theory and Methodology, 2000, Maryland, USA.
- [158] Lin, M-C., Chen, K., Chang, W. and Chen, C-H. *A DSM-based project-scheduling system for collaborative product development*, Int. J. Simulation and Process Modelling, Vol. 3, No. 4, pp.183–194., 2007
- [159] Qian, Y., J. Lin, T.N. Goh, and M. Xie, *A Novel Approach to DSM-Based Activity Sequencing Problem*, IEEE Trans. on Eng. Mgmt., vol. 58, pp. 688-705, 2011.
- [160] Kusiak A., He D.W., *Design for agile assembly: An operational perspective*, International Journal of Production Research, 1997.
- [161] Warfield J., *Binary Matrices in System Modeling*, IEEE, Vol 3, No. 5, 1973.
- [162] Hoare C.A.R., Quicksort, *Communications of the ACM*, 1961, Vol. 4, p. 321, DOI:10.1093/comjnl/5.1.10

## 9. Životopis

---

**Ivan Triplat, mag. ing. stroj.**

Rođen je 14. travnja 1985. godine u Zagrebu. Pohađao je Osnovnu školu Rudeš, zatim srednju elektrotehničku školu, smjer elektrostrojarstvo. Nakon završetka, upisuje Fakultet strojarstva i brodogradnje, smjer strojarstvo, usmjerenje inženjersko modeliranje i računalne simulacije. Tijekom studija radi honorarno preko student servisa u privatnoj tvrtki Dominelektro d. o .o., na poslovima montaže, ožičenja i ispitivanja. Preddiplomski studij završava 2008. godine, s temom preddiplomskog rada *Analiza čvrstoće i vlastitih frekvencija ventilatorske lopatice*, te 2009. godine završava diplomski studij, s temom diplomskog rada *Analiza uzroka loma ventilatorske lopatice*. Tijekom treće godine studija, na fakultetu dobiva Končarovu stipendiju te nakon završetka studija nastavlja raditi u tvrtki Končar - Generatori i motori. Iste godine, uz rad upisuje postdiplomski studij smjer teorija konstrukcija.

Od zaposlenja do ljeta 2018. godine radi u tvrtki Končar - Generatori i Motori na mjestu konstruktora, tj. na mehaničkim proračunima generatora i motora. Od ljeta 2018. do danas, radi kao voditelj kompaktnih generatora. Pridruženi je član HRO CIGRÉ-a, član grupe CroFToMM-a, te član Hrvatskog društva za elemente strojeva i konstruiranje (HDESK). Osim navedenog, sudjeluje u razvojnoj grupi unaprjeđenja kotrljajućih ležaja, sudjeluje u razvoju novog generatora s permanentnim magnetima, a bio je i voditelj grupe za razvoj proračuna glava namota hidrogenatora.

## 10. Biography

---

Born in Zagreb on 14<sup>th</sup> April 1985. He completed his primary school in 1999 and secondary school of Electrical Engineering, specialization Electro-mechanics in 2003. The same year he enrolled Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, specialization Engineering Modelling and Computer Simulations. He completed his undergraduate study in 2008 with the final graduate assignment *Strength and Natural Frequency Analysis of Fan Blade*. During next year he completed his graduate study with the theme of his master work: *Analysis of Fan Blade Breakdown Cause*. During the study, as a student, worked part time in the company Dominelektro Inc. on assembly, wiring and testing of electrical devices.

During the third year of a study he received scholarship from company Končar-Generators and Motors Inc. and after graduation was employed by that company. The same year he started, in paralel with employment, his postgraduate study, specialization Theory of construction.

From the time of employment till summer 2018 he was engaged as a mechanical design engineer with specialization of mechanic calculations of generators and motors. From summer 2018 till nowadays he was appointed as a head of mechanical design of compact generators and motors.

He is affiliated member of CRO CIGRE, member of the group CroFToMM and member of Croatian association for machine elements and mechanical design (HDESK). Besides these membership he participate in group for development and improvement of rolling bearings as well as development of new generator with permanent magnets. He was a head of group for development of hydro generator end-windings calculation.

# 11. Popis objavljenih radova

---

## Znanstveni radovi u časopisima

1.) Triplat, Ivan; Marjanović, Dorian; Stamać, Lucijan: **Multi domain matrix (MDM) of the vertical hydrogenerator** // *Tehnički vjesnik*, Technical Gazette 26, 4 (2019). (International review, published, scientific), DOI: 10.17559/TV-20180618231334

2.) Pehlivan, Ahmet, Selim; Kraljević, Dario; Triplat, Ivan; Bahçeci, Beste: **Critical speed calculation of a refurbishment of 11MW hydro power plant unit** // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, (2021). (International review, published, scientific), DOI: 10.3906/elk-2104-54

## Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom

1.) Bonačić, Filip; Triplat, Ivan; Kraljević, Dario: **Impact of bearing clearance changes and stiffness change on vibratory state of a 35MVA hydrogenerator** // *11. Conference CIGRE-CIRED*, 2013. (Lecture, international review, published, scientific)

2.) Triplat, Ivan; Vukšić, Mario; Turković, Slavko: **Influence of connection between generator and pedestal to critical speeds of vertical compact generator** // *12. Conference CIGRE-CIRED*, 2015. (Lecture, international review, published, scientific)

3.) Triplat, Ivan; Vukšić, Mario; Marjanović, Dorian: **Application of design structure matrix to mechanical calculations of vertical hydro-generator** // *14. International design conference*, 2016. (Lecture, international review, published, scientific)

4.) Vukšić, Mario; Triplat, Ivan; Marjanović, Dorian: **Evolution of rotor spider design for vertical hydro-generators** // *14. International design conference*, 2016. (Lecture, international review, published, scientific)

5.) Bonačić, Filip; Triplat, Ivan; Kraljević, Dario: **Numerical calculation of hydrogenerator braking system heat transfer** // *13. Conference CIGRE-CIRED*, 2017. (Lecture, international review, published, scientific)

## Znanstveni radovi u zbornicima skupova s domaćom recenzijom

1.) Triplat, Ivan; Bonačić, Filip; Šćap, Dragutin: **Utjecaj prednaprezanja vijaka na krutost konstrukcije** // *10. Savjetovanje HRO CIGRÉ*, 2011. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

- 2.) Bonačić, Filip; Triplat, Ivan; Kraljević, Dario: **Utjecaj promjene zračnosti u ležajevima i promjene krutosti na vibracijsko stanje hidrogeneratora 35MVA // 10. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2011. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 3.) Triplat, Ivan; Kraljević, Dario; Stegić, Milenko: **Razvoj novog kućišta kompaktnog generatora // 11. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2013. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 4.) Kraljević, Dario; Jagunić, Petra; Bonačić, Filip; Triplat, Ivan; Horvatić, Željko; Cvrtila, Tomislav: **Proračun rotorske kape turbogeneratorske i sanacija oštećenja // 11. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2013. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, stručni)
- 5.) Triplat, Ivan; Kraljević, Dario; Đaković, Siniša: **Horizontalni kompakt generatori s velikim aksijalnim silama // 12. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2015. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 6.) Bonačić, Filip; Kraljević, Dario; Jagunić, Petra; Triplat, Ivan: **Numerički proračun zagrijavanja kočionog sustava hidrogeneratorske // 12. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2015. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 7.) Kraljević, Dario; Jagunić, Petra; Triplat, Ivan; Bonačić, Filip; Antonovski, Filip: **Procjena životnog vijeka vitalnih dijelova kod revitalizacije hidrogeneratorske // 12. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2015. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, stručni)
- 8.) Triplat, Ivan; Đureš, Anka; Bogut, Marijan; Krnjić, Vladimir; Bonačić, Filip; Kraljević, Dario: **Vlastite frekvencije i utjecaj temperature na glave statorskog namota hidrogeneratorske // 13. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2017. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 9.) Kraljević, Dario; Gruičić, Kristian; Triplat, Ivan; Šeremet, Darko: **Snižavanje vibracija statora hidrogeneratorske pri pokretanju iz hladnog stanja // 14. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2019. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)
- 10.) Triplat, Ivan; Kraljević, Dario; Tišljar, Tomislav; Skala, Nenad: **Mjere za smanjenje buke na kompakt generatoru // 14. Savjetovanje HRO CIGRÉ**, 2019. (predavanje, domaća recenzija, objavljeni rad, znanstveni)

#### **Doktorati, magisteriji i diplomski radovi**

- 1.) Ivan Triplat: **Analiza čvrstoće i vlastitih frekvencija ventilatorske lopatice / preddiplomski rad**, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008. 67 str. Voditelj: Tonković Zdenko
- 2.) Ivan Triplat: **Analiza uzorka loma ventilatorske lopatice / diplomski rad**, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009. 71 str. Voditelj: Zdravko Virag, Tonković Zdenko



## 12. Dodatak

### I. Teorijske osnove, particioniranje

Jedna od metoda analiziranja matrica je particioniranje. Particioniranje je preslagivanje redaka i kolona, na način da se u konačnici smanji broj i dužina iteracija, te broj elemenata koji se nalaze iznad dijagonale. Ukoliko bi se sve veze nalazile ispod dijagonale, utoliko bismo dobili optimalni proces bez iteracija [31,94,160].

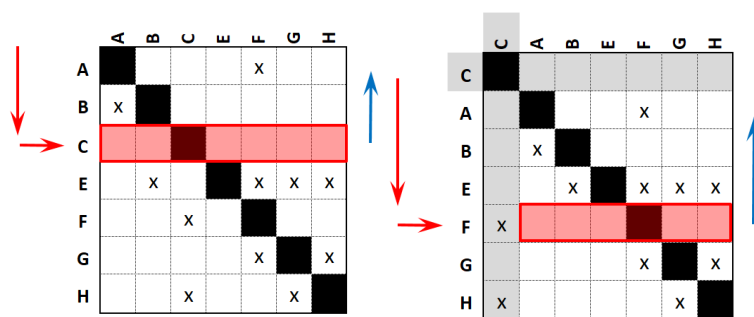
Obzirom na to da je kod kompleksnih strojarskih/menadžerskih zadataka nemoguće dobiti donje trokutastu matricu, postavlja se zadatak pomaknuti povratne veze što je bliže moguće dijagonali (*block triangular*), jer se smanjenjem udaljenosti povratnih petlji od dijagonale utječe na ukupno vrijeme ponavljanja, tj. ako je povratna veza blizu dijagonale tijekom ponavljanja nekog zadatka, bit će potrebno ponoviti manji broj zadataka.

Metode za izvršavanje particioniranja sadrže *Path Searching* metodu Steward [86], *Reachability Matrix* metodu, Warfield [161], *Triangulation algoritam* Kusiak i *Powers of the Adjacency Matrix* Noreman, Ledet i Himmelblau.

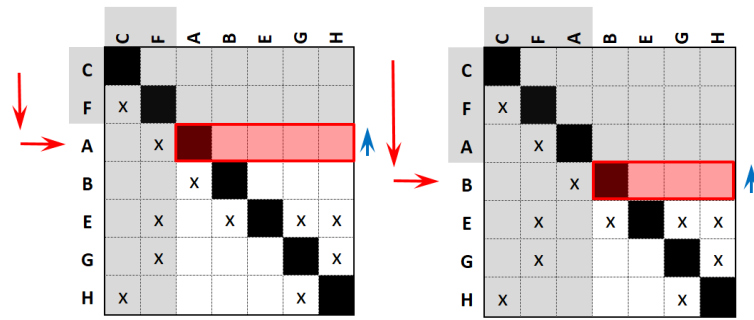
Sama procedura particioniranja sastoji se od topološkog particioniranja koje je prikazano u nastavku:

**Korak 1:** Prođi kroz listu elemenata

**Korak 2:** Ako neki element nema ulaza od drugih elemenata (prazni red), tada premjesti element (red i kolonu) na vrh matrice, makni element s liste elemenata i zanemari ga, idi na točku 1.

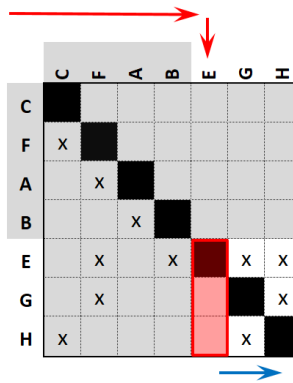


Slika I.II 1. korak topološkog particioniranja



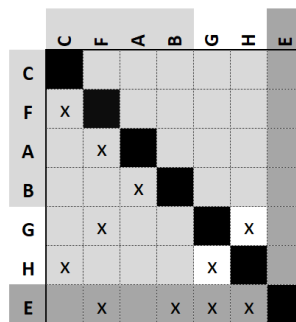
Slika I.II 2. korak topološkog particioniranja

**Korak 3:** Ako element nema izlaza prema drugim elementima (prazna kolona), tada premjesti element (red i kolonu) na dno matrice, makni element s liste elemenata i zanemari ga, idi na točku 1.



Slika I.III. 3. korak topološkog particioniranja

**Korak 4:** Ako više nema elemenata, idi na točku 6 (matrica je particionirana) - u suprotnom slijedi točka 5.



Slika I.IV. 4. korak topološkog particioniranja

**Korak 5:** Odredi petlje (pomoću jedne od navedenih metoda npr. *Path search* metode) i uruši/spoji elemente iz petlje u jedan element. Vрати se u točku 1.

**Korak 6:** Proširi spojene petlje.

Osim toga, spajanje se vrši na sljedeći način:

**Korak 1:** Zbroji sve kolone i sve retke elementa unutar kruga.

**Korak 2:** Izbriši sve retke i kolone od drugih elemenata u petlji.

**Korak 3:** Upiši 1 za svaki broj veći od 1.

**Korak 4:** Zamijeni brojeve na dijagonali sa 0.

Postoji više metoda pomoću kojih se može dobiti strukturni karakter mreže [22]. Većina algoritama odnosi se direktno na matični prikaz mreže. Prednost takvih pristupa je da za preslagivanje malih matrica nije obavezan softverski alat, međutim, radi bolje učinkovitosti potrebna je tablica. Pozitivna je strana ta da korisnici mogu već pri izvođenju procedure poboljšati svoje razumijevanje o promatranom sustavu [28]. Neke od češćih metoda koje se upotrebljavaju za traženje povratnih petlji u matrici, bit će obrađene u nastavku, a pokazane su zato što se u samom radu također koristi jednom od tih metoda i zato da bi se vidjelo kako rade postojeće metode i kako bi se mogle usporediti s novopredloženom metodom.

### ***1.1. Analiza povratnih petlji pretraživanjem matrice***

Ova metoda neučinkovita je i nije preporučljiva za primjenu u velikim problemima s puno elemenata i ovisnosti, no relativno je jednostavna za primjenu, pa je se isplati spomenuti. Ova se procedura može implementirati, na primjer kao makro u nekom predlošku, matrica se upotrebljava kao dvodimenzijsko spremište podataka. Algoritam ove procedure slijedi sve ovisnosti u lancu pretraživanjem redaka i kolona. Ako se tom pretragom ponovno dođe u početnu točku, to znači da je otkrivena petlja.

Procedura je sljedeća:

**Korak 1:** Odaberi prvi redak u matrici.

**Korak 2:** Traži vezu u odabranom retku.

**Korak 3:** Traži vezu u redcima koji odgovaraju nađenim vezama.

**Korak 4:** Ako postoje veze, ta veza na elementu koji odgovara odabranom retku, ima povratnu petlju.

**Korak 5:** Vrti se na korak 3, sve dok se ne uspiju naći nove povratne veze.

**Korak 6:** Odaberi sljedeći redak (dok se ne dođe do kraja matrice) i vrti se na korak 2.

Navedeno predstavlja metakod, koji se uz nešto znanja o programiranju može jednostavno implementirati u neki od programskih paketa. Algoritam sistemski pretražuje matične retke i kolone i na taj način traži povratne petlje. Povratna petlja otkrivena je ako se ponovno dođe na

početni element. Ova metoda radi pravilno, ali je neučinkovita i nije primjenjiva na velike strukture s puno veza.

### I.II. Analiza povratnih petlji opisom skupova ovisnosti

Učinkovitija metoda od prethodno pokazane prezentirana je u nastavku, a bazira se na opisivanju skupova ovisnosti. Ova je metoda učinkovitija, jer nema (gubitka vremena) prebacivanja između redaka i kolona te se poznate putanje ne ponavljaju iterativno.

Prvo se traže veze elementa, a kreće se od elementa A. Ova grupa ovisnosti sadrži veze prema elementu D (što se može vidjeti na sljedećoj slici), međutim grupa veza u elementu D prazna je. Stoga, elementi A i D ne mogu stvarati povratnu petlju. Ova se informacija može primijeniti kasnije u proceduri, u slučaju da se istražuju ostale veze elemenata A i D. Set elemenata koji se odnosi na element B prazan je (nema veza koje idu s elementa B), pa se potom razmatra element C. Element C veže se na element A, no ova veza može biti zanemarena, s obzirom na to da skupovi veza prolaze kroz element A i već su određeni kao nevažni za povratne petlje. Ovisnost elementa C prema elementu B također može biti zanemarena, jer je već prolaskom kroz element B otkriveno da nema veza. Nastavljajući proceduru u 13 koraka, pretražuje se cijela struktura i mogu se pouzdano naći postojeće povratne petlje.

$$\begin{array}{l}
 s(A) = \{D\} \\
 s(D) = \{ \} \\
 s(B) = \{ \} \\
 s(C) = \{A, B, G\} \\
 s(A) \rightarrow (1) \\
 s(B) \rightarrow \{ \} \\
 s(G) \rightarrow \{E, F\} \\
 s(E) \rightarrow \{C, D\} \\
 s(D) \rightarrow \{ \} \\
 s(F) \rightarrow \{ \} \\
 s(D) = \{ \} \\
 s(E) = (2) \\
 s(F) = \{ \} \\
 s(G) = (3)
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \Rightarrow C - G - E \text{ feedbackloop} \\
 \\
 \end{array} \right\} (2) \left. \begin{array}{l}
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array} \right\} (3)$$

Struktura pretraživanja jednadžbama nije najučinkovitija metoda i nije prikladna za direktnu implementaciju u programskom alatu, međutim, omogućuje pretraživanje matrice u 13 koraka - ako se to uspoređi s prvom metodom, gdje je prolaskom kroz retke i kolone napravljeno 53 koraka dok se ne nađu sve petlje.

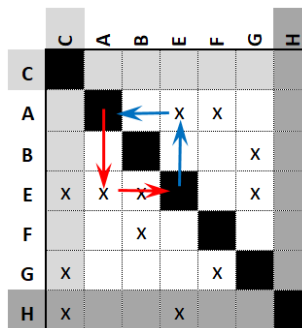
### I.III. Analiza povratnih petlji traženjem puta (eng. Path searching)

Ova metoda prati tijek informacija unaprijed ili unazad, dok se ne dođe nazad do istog elementa. Svi elementi između prvog i drugog pojavljivanja istog elementa ili zadatka, tvore ciklus tijekom informacija. Kada se identificiraju svi ciklusi i kada su svi elementi raspoređeni, program završava. U aktivnim matricama postoji barem jedan ciklus, a isti se može tražiti na način da se počne iz bilo koje točke, tj. elementa. Zbog toga se ovaj algoritam upotrebljava za identifikaciju ciklusa, tj. petlji.

Procedura je sljedeća:

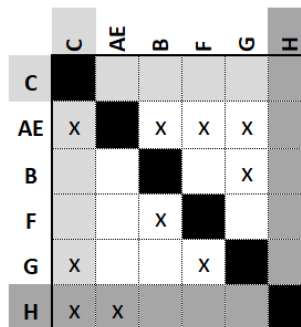
**Korak 1:** Topološko sortiranje.

**Korak 2:** Odaberi element u matrici i prati njegove veze sve dok se ne ponovi isti element.



Slika I.V. 2. korak particioniranja analizom traženja puta

**Korak 3:** Spoji sve pređene elemente u jedinstveni element.



Slika I.VI. 3. korak particioniranja analizom traženja puta

**Korak 4:** Ponovi topološko sortiranje na novoj aktivnoj matrici.

|    | C | AE | B | F | G | H |
|----|---|----|---|---|---|---|
| C  |   |    |   |   |   |   |
| AE | X |    | X | X | X |   |
| B  |   |    |   |   | X |   |
| F  |   |    | X |   |   |   |
| G  | X |    |   | X |   |   |
| H  | X | X  |   |   |   |   |

→

**Slika I.VII.** 4. korak particioniranja analizom traženja puta

**Korak 5:** Ponavljaj korak 3 sve dok postoje elementi u aktivnoj matrici.

**Korak 6:** Vrati se na korak 3 sve dok se ne uspiju naći nove povratne veze.

**Korak 7:** Odaberi sljedeći redak (dok se ne dođe do kraja matrice) i vrati se na korak 2 (spojeni elementi predstavljaju blokove i rezultatna matrica je particionirana matrica).

|    | C | B | F | G | AE | H |
|----|---|---|---|---|----|---|
| C  |   |   |   |   |    |   |
| B  |   |   |   | X |    |   |
| F  |   | X |   |   |    |   |
| G  | X |   | X |   |    |   |
| AE | X | X | X | X |    |   |
| H  | X |   |   |   | X  |   |

**Slika I.VIII.** 7. korak particioniranja analizom traženja puta

#### I.IV. Analiza povratnih petlji potenciranjem matrice (eng. Powers of the Adjacency Matrix)

Kod ove je metode potrebno pretvoriti osnovnu DSM matricu u binarnu matricu, na način da se zamijene prazna polja s nulom i veze (x) s brojem jedan. Potenciranje matrice na n-tu potenciju pokazuje koji element se može doseći iz n koraka. Elementi koji su u petlji, pokažu se na način da se na dijagonali pojavi broj. Tako se na primjeru u nastavku, iz druge slike, vidi da se kvadriranjem matrice dobiju dva elementa (B i H) koji su u dvokoračnoj petlji, dok se podizanjem potencije na treću vidi da su elementi A, B i F u trokoračnoj petlji itd.. U nastavku su prikazane matrice do pete potencije.

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A |   |   |   |   | x | x |   |
| B | x |   |   |   |   |   | x |
| C |   |   |   |   |   | x | x |
| E | x |   |   |   | x |   |   |
| F |   | x |   |   |   | x |   |
| G |   |   | x |   |   |   | x |
| H |   | x | x |   |   |   |   |

→  $A =$ 

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| B | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| E | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| F | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| G | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| H | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Slika I.IX. Pretvaranje matrice u binarnu

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| B | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| C | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| E | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| F | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| G | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| H | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

 $A^2 =$ 

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| B | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| C | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| E | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| F | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| G | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 |
| H | 0 | 2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 0 |

 $A^3 =$ 

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| B | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 4 | 3 |
| C | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 |
| E | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 4 |
| F | 4 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 4 |
| G | 2 | 3 | 0 | 2 | 3 | 4 | 2 |
| H | 3 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 | 5 |

 $A^4 =$ 

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 6 | 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 6 |
| B | 5 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 8 |
| C | 5 | 5 | 3 | 2 | 4 | 6 | 7 |
| E | 6 | 5 | 3 | 4 | 4 | 3 | 7 |
| F | 3 | 6 | 1 | 4 | 5 | 8 | 5 |
| G | 5 | 5 | 4 | 2 | 4 | 5 | 7 |
| H | 2 | 6 | 2 | 5 | 3 | 7 | 7 |

 $A^5 =$ 

Slika I.X. Analiza potenciranjem - dizanje potencije DSM matrici

Općenita procedura za identifikaciju ciklusa potenciranjem matrica je sljedeća:

**Korak 1:** Pretvaranje matrice u binarnu matricu.

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A |   |   |   |   | x | x |   |
| B | x |   |   |   |   |   | x |
| C |   |   |   |   |   | x | x |
| E | x |   |   |   | x |   |   |
| F |   | x |   |   |   | x |   |
| G |   |   | x |   |   |   | x |
| H | x |   | x |   |   |   |   |

→  $A =$ 

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| B | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| C | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| E | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| F | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| G | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| H | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

**Slika I.XI.** Analiza potenciranjem, 1. korak

**Korak 2:** Dizanje potencije dok se na dijagonali ne pojave brojevi različiti od nule.

$$A^2 =$$

|   | A | B | C | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| B | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| C | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| E | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| F | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| G | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| H | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

**Slika I.XII.** Analiza potenciranjem, 2. korak

**Korak 3:** Spajanje tih elemenata u jedan i formiranje nove matrice.

|      | A | BCGH | E | F |
|------|---|------|---|---|
| A    | 0 | 1    | 0 | 1 |
| BCGH | 1 | 0    | 1 | 0 |
| E    | 1 | 0    | 0 | 1 |
| F    | 0 | 1    | 0 | 0 |

**Slika I.XIII.** Analiza potenciranjem, 3. korak

**Korak 4:** Ponavljanje topološkog sortiranja, a ako ostane elemenata, slijedi **korak 2**, u slučaju da elemenata više nema, spojeni elementi predstavljaju blokove i dobivena je particionirana matrica.



|      |   |   |      |   |   |
|------|---|---|------|---|---|
|      |   | A | BCGH | E | F |
| A    | 1 | 1 | 1    | 0 |   |
| BCGH | 1 | 1 | 0    | 2 |   |
| E    | 0 | 2 | 0    | 1 |   |
| F    | 1 | 0 | 1    | 0 |   |

|      |   |      |   |   |
|------|---|------|---|---|
|      |   | BCGH | E | F |
| BCGH | 0 | 1    | 1 |   |
| E    | 1 | 0    | 1 |   |
| F    | 1 | 0    | 0 |   |

|      |   |      |   |   |
|------|---|------|---|---|
|      |   | BCGH | E | F |
| BCGH | 2 | 0    | 1 |   |
| E    | 1 | 1    | 1 |   |
| F    | 0 | 1    | 1 |   |

Slika I.XIV. Analiza potenciranjem, 4. korak

Na odabranom se primjeru vidi da su svi elementi spregnuti. Ova je metoda dosta ograničena, zato što je kod velikih matrica nemoguće razdvojiti sve elemente koji su u vezi ili uopće primijetiti jesu li svi elementi u vezi, prema tome, ako pogledamo matricu s četvrtom potencijom, vidimo da su na dijagonali svi brojevi različiti od nule, tj. vidimo da su svi elementi u vezama, ali nismo sigurni jesu li svi zajedno spregnuti ili postoji više manjih grupa. Povratne petlje za veće matrice ne mogu biti analizirane ovim pristupom, jer povratne petlje koje sadrže isti element ne mogu biti točno praćene.

Ako pogledamo još jedan primjer u nastavku, preuzet sa strane DSM internet Page 2007, vidimo da se kod kvadriranja matrice dobiva da element A i element B formiraju petlju, kubiranjem matrice dobije se da su elementi A, B i C u petlji, ali glavni se nedostatak ove metode može vidjeti kada se matrica stavi na četvrtu potenciju, jer su tada svi elementi spregnuti, međutim, elementi A i B sadrže vrijednost 2 na dijagonali - što ukazuje da ta dva elementa sadrže vlastitu povratnu petlju koja se sastoji od ta dva elementa. Ovo pokazuje da se kod većih struktura na ovaj način ne može napraviti opsežna provjera povratnih petlji, jer je nemoguće povratno pratiti koji su elementi spregnuti. Ukoliko je u matrici potrebno identificirati povratne petlje koje obuhvaćaju šest elemenata, utoliko se povratne petlje koje uključuju dva elementa obrađuju tri puta, a povratne petlje sastavljene od tri elementa obrađuju se dva puta - kada se matrica stavi na šestu potenciju. Sve ove povratne petlje dodaju se na rezultat na dijagonali i time otežavaju, možda i onemogućuju točnu identifikaciju povratnih petlji.

Zbog ovog ograničenja, ova se metoda može upotrebljavati uglavnom za određivanje postojanja povratnih petlji.

|            |   |   |   |   |
|------------|---|---|---|---|
| <i>DSM</i> |   |   |   |   |
|            | A | B | C | D |
| A          | 0 | 1 | 0 | 0 |
| B          | 1 | 0 | 1 | 0 |
| C          | 1 | 0 | 0 | 1 |
| D          | 1 | 0 | 0 | 0 |

|                        |   |   |   |   |
|------------------------|---|---|---|---|
| <i>DSM<sup>2</sup></i> |   |   |   |   |
|                        | A | B | C | D |
| A                      | 1 | 0 | 1 | 0 |
| B                      | 1 | 1 | 0 | 1 |
| C                      | 1 | 1 | 0 | 0 |
| D                      | 0 | 1 | 0 | 0 |

|                        |   |   |   |   |
|------------------------|---|---|---|---|
| <i>DSM<sup>3</sup></i> |   |   |   |   |
|                        | A | B | C | D |
| A                      | 1 | 1 | 0 | 1 |
| B                      | 2 | 1 | 1 | 0 |
| C                      | 1 | 1 | 1 | 0 |
| D                      | 1 | 0 | 1 | 0 |

|                        |   |   |   |   |
|------------------------|---|---|---|---|
| <i>DSM<sup>4</sup></i> |   |   |   |   |
|                        | A | B | C | D |
| A                      | 2 | 1 | 1 | 0 |
| B                      | 2 | 2 | 1 | 1 |
| C                      | 2 | 1 | 1 | 1 |
| D                      | 1 | 1 | 0 | 1 |

Slika I.XV. Identifikacija petlji

### I.V. Triangularizacija (eng. Triangularization)

Većina današnjih algoritama nije praktična za velike matrice. Da bi se izbjegao taj problem, predložen je algoritam zvan „brza trokutna matrica“ (*Quick Triangular Matrix*). Cilj je bio značajno minimizirati vrijeme izvođenja particioniranja bez gubitka na analizi. Ova se metoda sastoji od dva dijela. Prvi dio je općenito sortiranje sumiranja stupnja ovisnosti redaka i kolona u matrici, dok je u drugom dijelu napravljeno poboljšanje redosljeda redaka i kolona, uspoređujući elemente u parovima i zamjenjujući ih ako je potrebno. U nastavku je prezentiran opis rada ovog algoritma.

Veze su označene brojem 1, iako algoritam podržava i veći stupanj ovisnosti, a može se postići i „izolacija“ iznad dijagonale za elemente koji pripadaju ciklusima s više od 2 elementa.

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   | x |   | x | x |   | x |
| 2 |   |   |   |   | x |   |   |
| 3 | x | x |   |   | x |   | x |
| 4 | x | x | x |   | x | x |   |
| 5 | x | x | x |   |   |   |   |
| 6 |   | x | x |   | x |   | x |
| 7 | x |   |   |   | x |   |   |

Slika I.XVI. Triangularizacija početni DSM

#### PRVI DIO:

1. Dopiši dvije liste s elementima, (vidi sliku) upotrebljavajući *Quick Sort*, Hoare [162] pomoću kriterija:
  - a. ukupna vrijednost stupnja ovisnosti u smislu davanja informacija (kolone)
  - b. ukupna vrijednost stupnja ovisnosti u smislu primanja informacija (redci).

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   | x |   | x | x |   | x | 4 |
| 2 |   |   |   |   | x |   |   | 1 |
| 3 | x | x |   |   | x |   | x | 4 |
| 4 | x | x | x |   | x | x |   | 5 |
| 5 | x | x | x |   |   |   |   | 3 |
| 6 |   | x | x |   | x |   | x | 4 |
| 7 | x |   |   |   | x |   |   | 2 |
|   | 4 | 5 | 3 | 1 | 6 | 1 | 3 |   |

Slika I.XVII. Triangularizacija 1. korak

$$\begin{aligned}
 \text{Lista kolona} &= \begin{array}{l} \text{Broj kolone} \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \\ \text{Broj veza} \ 4 \ 5 \ 3 \ 1 \ 6 \ 1 \ 3 \end{array} \\
 \text{Lista kolona (sortirana)} &= \begin{array}{l} \text{Broj kolone} \ 4 \ 6 \ 3 \ 7 \ 1 \ 2 \ 5 \\ \text{Broj veza} \ 1 \ 1 \ 3 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \end{array}
 \end{aligned}$$

Isto se radi i za retke:

$$\begin{aligned}
 \text{Lista retka} &= \begin{array}{l} \text{Broj retka} \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \\ \text{Broj veza} \ 4 \ 1 \ 4 \ 5 \ 3 \ 4 \ 2 \end{array} \\
 \text{Lista retka (sortirana)} &= \begin{array}{l} \text{Broj retka} \ 2 \ 7 \ 5 \ 1 \ 3 \ 6 \ 4 \\ \text{Broj veza} \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4 \ 4 \ 5 \end{array}
 \end{aligned}$$

2. Kreiraj novo sortiranje izmjenjujući liste, na način da se iz donje liste redaka umetne 2 na početak matrice, pa se iz gornje liste umetne 4 na kraj matrice, zatim 7 iz liste redaka na početak matrice itd., sve dok ima elemenata.
3. Kreiranje matrice s tim redoslijedom sortiranja.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 2 | 7 | 5 | 1 | 3 | 6 | 4 |
| 2 |   |   | x |   |   |   |   |
| 7 |   |   | x | x |   |   |   |
| 5 | x |   |   | x | x |   |   |
| 1 | x | x | x |   |   |   | x |
| 3 | x | x | x |   |   |   |   |
| 6 | x | x | x |   | x |   |   |
| 4 | x |   | x | x | x | x |   |

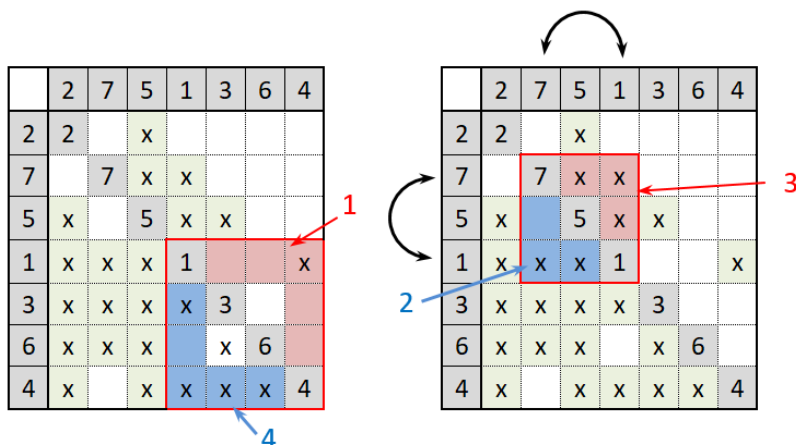
**Slika I.XVIII.** Triangularizacija, 3. korak

**DRUGI DIO:**

4. Prođi kroz kolone unazad (od N do 1) i kroz retke od kraja do početka (od N do 1) i traži ovisnosti iznad dijagonale.
5. Ako se nađe veza na mjestu (i, j), napravi kvadrat formiran sa svim mjestima između (i, j) i (j, i).
  - a. Suma rubova trokuta iznad (elementi (i, (i+1 do j)) „i“ ((j+1 do j-1), j) i donjeg trokuta (elementi ((i+1 do j), i) „i“ (j, (i+1 do j-1))), gdje „i“ predstavlja element koji je u vezi (redak), a „j“ predstavlja element nađen u vezi (kolona).

- b. Ako je suma gornjeg ruba trokuta veća od sume donjeg ruba trokuta, izmijeni (i, j) u redcima i kolonama

Slika u nastavku prikazuje primjer u kojem će biti zamjena između elemenata 7 i 1, dok između elemenata 1 i 4 neće biti zamjene.



**Slika I.XIX.** Triangularizacija, 5. korak

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 2 | 1 | 5 | 7 | 3 | 6 | 4 |
| 2 | 2 |   | x |   |   |   |   |
| 1 | x | 1 | x | x |   |   | x |
| 5 | x | x | 5 |   | x |   |   |
| 7 |   | x | x | 7 |   |   |   |
| 3 | x | x | x | x | 3 |   |   |
| 6 | x |   | x | x | x | 6 |   |
| 4 | x | x | x |   | x | x | 4 |

**Slika I.XX.** Triangularizacija, rezultat

Moguće je promatrati sve elemente iznad dijagonale, ciklusi su tada jednostavni,  $X \rightarrow Y \rightarrow X$ . Ove elemente korisnik mora pregledati i odlučiti jesu li stvarno potrebni za projekt. U slučaju da model sadrži veze sa stupnjem većim od 1, elementi svakog ciklusa koji će najvjerojatnije ostati iznad dijagonale, bit će elementi s manjom vrijednosti i stoga je korisniku lakše odlučiti maknuti tu vezu.

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | 2 | 1 | 5 | 7 | 3 | 6 | 4 |
| 2 | 2 |   | x |   |   |   |   |
| 1 | x | 1 | x | x |   |   | x |
| 5 | x | x | 5 |   | x |   |   |
| 7 |   | x | x | 7 |   |   |   |
| 3 | x | x | x | x | 3 |   |   |
| 6 | x |   | x | x | x | 6 |   |
| 4 | x | x | x |   | x | x | 4 |

**Slika I.XXI.** Triangularizacija, mogućnost prikaza veza i elemenata u petlji

### ***I.VI. Analiza korištenjem matrice dostupnosti (eng. Reachability Matrix Method)***

Matrica dostupnosti je binarna matrica s dijagonalnim elementima jednakim 1. Jedinica na dijagonali ne utječe na rezultat, ali je potrebna zbog algoritma. Gornja razina u ovoj hijerarhiji sastoji se od svih elemenata koji ne zahtijevaju ulaz, ili su nezavisni od drugih elemenata u matrici. Bilo koja dva elementa iste razine hijerarhije - ili nisu međusobno povezani, ili su dio istog kruga na toj razini. Jednom kada se odredi gornja razina elemenata, elementi u toj gornjoj razini, kao i njihove odgovarajuće veze, brišu se iz matrice ostavljajući pod-matricu s novom gornjom razinom elemenata. Gornja će razina elemenata u ovoj pod-matrici biti druga razina u originalnoj matrici, i tako se ponavlja sve dok se ne odrede sve razine.

#### ***Korak 1:***

- (a) U prvoj koloni ispiši sve elemente u matrici.
- (b) U drugoj koloni ispiši set svih ulaznih elemenata za svaki redak u tablici. Ovaj se set se može odrediti jednostavno, pretraživanjem jedinica u tom odgovarajućem retku DSM-a.
- (c) U trećoj koloni ispiši set svih izlaznih elemenata za svaki redak u tablici. Ovaj se set može odrediti jednostavno, pretraživanjem jedinica u toj odgovarajućoj koloni DSM-a.
- (d) U četvrtoj koloni ispiši presijecanje setova ulaza i izlaza za svaki element u tablici.

***Korak 2:*** Identificiraj gornju razinu elemenata i izbriši je iz tablice. Elementi su u gornjoj razini hijerarhije matrice ako su ulazni set u presijecanju.

***Korak 3:*** Ponovi prva dva koraka, sve dok se ne dobije potpuno particionirana matrica.

|    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1  | 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 2  |   | 1 |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 3  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |
| 4  | 1 | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   | 1 |    |    |    |    |    |    |
| 5  |   | 1 |   |   | 1 |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 6  |   | 1 |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| 7  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1 | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |
| 8  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   | 1 | 1 |    |    |    |    |    |    |
| 9  | 1 | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   | 1 |    |    |    |    |    |    |
| 10 |   | 1 |   |   | 1 | 1 |   |   |   | 1  |    |    |    |    |    |
| 11 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1 | 1 | 1 |    | 1  |    |    |    |    |
| 12 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   | 1 | 1 | 1 |    | 1  | 1  |    |    |    |
| 13 | 1 | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   | 1 |    |    |    |    | 1  |    |
| 14 |   | 1 |   |   | 1 | 1 |   |   |   | 1  |    |    |    |    | 1  |
| 15 |   | 1 |   |   | 1 | 1 |   |   |   | 1  |    |    |    |    | 1  |

| Element | Veze u redcima                 | Veze u stupcima                                | Umnožak |
|---------|--------------------------------|--|---------|
| 1       | 1                              | 1, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                   | 1       |
| 2       | 2                              | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 | 2       |
| 3       | 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                                | 3, 8    |
| 4       | 1, 2, 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                      | 4, 9    |
| 5       | 2, 5                           | 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15       | 5       |
| 6       | 2, 6                           | 6, 10, 14, 15                                  | 6       |
| 7       | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9         | 7, 11, 12                                      | 7       |
| 8       | 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                                | 3, 8    |
| 9       | 1, 2, 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                      | 4, 9    |
| 10      | 2, 5, 6, 10                    | 10, 14, 15                                     | 10      |
| 11      | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11     | 11, 12   | 11      |
| 12      | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12 | 12   | 12      |
| 13      | 1, 2, 4, 5, 9, 13              | 13   | 13      |
| 14      | 2, 5, 6, 10, 14                | 14   | 14      |
| 15      | 2, 5, 6, 10, 15                | 15   | 15      |

**Slika I.XXII.** Lijevo je slika početne DSM matrice, desno je tablični ispis

**1. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz)          | Veze u stupcima (izlaz)                        | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|--------------------------------|--|------------------------|-------|
| 1       | 1                              | 1, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                   | 1                      | I     |
| 2       | 2                              | 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 | 2                      | I     |
| 3       | 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                                | 3, 8                   |       |
| 4       | 1, 2, 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                      | 4, 9                   |       |
| 5       | 2, 5                           | 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15       | 5                      |       |
| 6       | 2, 6                           | 6, 10, 14, 15                                  | 6                      |       |
| 7       | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9         | 7, 11, 12                                      | 7                      |       |
| 8       | 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                                | 3, 8                   |       |
| 9       | 1, 2, 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                      | 4, 9                   |       |
| 10      | 2, 5, 6, 10                    | 10, 14, 15                                     | 10                     |       |
| 11      | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11     | 11, 12   | 11                     |       |
| 12      | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12 | 12   | 12                     |       |
| 13      | 1, 2, 4, 5, 9, 13              | 13   | 13                     |       |
| 14      | 2, 5, 6, 10, 14                | 14   | 14                     |       |
| 15      | 2, 5, 6, 10, 15                | 15   | 15                     |       |

**2. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz)    | Veze u stupcima (izlaz)                  | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|--------------------------|--|------------------------|-------|
| 3       | 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                          | 3, 8                   |       |
| 4       | 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                | 4, 9                   |       |
| 5       | 5                        | 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 | 5                      | II    |
| 6       | 6                        | 6, 10, 14, 15                            | 6                      | II    |
| 7       | 3, 4, 5, 7, 8, 9         | 7, 11, 12                                | 7                      |       |
| 8       | 3, 4, 5, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12                          | 3, 8                   |       |
| 9       | 4, 5, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13                | 4, 9                   |       |
| 10      | 5, 6, 10                 | 10, 14, 15                               | 10                     |       |
| 11      | 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11     | 11, 12                                   | 11                     |       |
| 12      | 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12 | 12                                       | 12                     |       |
| 13      | 4, 5, 9, 13              | 13                                       | 13                     |       |
| 14      | 5, 6, 10, 14             | 14                                       | 14                     |       |
| 15      | 5, 6, 10, 15             | 15                                       | 15                     |       |

**Slika I.XXIII.** Lijevo je slika prve iteracije, desno je slika druge iteracije

**3. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz) | Veze u stupcima (izlaz)   | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|-----------------------|---------------------------|------------------------|-------|
| 3       | 3, 4, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12           | 3, 8                   |       |
| 4       | 4, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13 | 4, 9                   | III   |
| 7       | 3, 4, 7, 8, 9         | 7, 11, 12                 | 7                      |       |
| 8       | 3, 4, 8, 9            | 3, 7, 8, 11, 12           | 3, 8                   |       |
| 9       | 4, 9                  | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13 | 4, 9                   | III   |
| 10      | 10                    | 10, 14, 15                | 10                     | III   |
| 11      | 3, 4, 7, 8, 9, 11     | 11, 12                    | 11                     |       |
| 12      | 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12 | 12                        | 12                     |       |
| 13      | 4, 9, 13              | 13                        | 13                     |       |
| 14      | 10, 14                | 14                        | 14                     |       |
| 15      | 10, 15                | 15                        | 15                     |       |

**4. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz) | Veze u stupcima (izlaz) | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 3       | 3, 8                  | 3, 7, 8, 11, 12         | 3, 8                   | IV    |
| 7       | 3, 7, 8               | 7, 11, 12               | 7                      |       |
| 8       | 3, 8                  | 3, 7, 8, 11, 12         | 3, 8                   | IV    |
| 11      | 3, 7, 8, 11           | 11, 12                  | 11                     |       |
| 12      | 3, 7, 8, 11, 12       | 12                      | 12                     |       |
| 13      | 13                    | 13                      | 13                     | IV    |
| 14      | 14                    | 14                      | 14                     | IV    |
| 15      | 15                    | 15                      | 15                     | IV    |

**Slika I.XXIV.** Lijevo je slika treće iteracije, desno je slika četvrte iteracije

**5. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz) | Veze u stupcima (izlaz) | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 7       | 7                     | 7, 11, 12               | 7                      | V     |
| 11      | 7, 11                 | 11, 12                  | 11                     |       |
| 12      | 7, 11, 12             | 12                      | 12                     |       |

**6. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz) | Veze u stupcima (izlaz) | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 11      | 11                    | 11, 12                  | 11                     | VI    |
| 12      | 11, 12                | 12                      | 12                     |       |

**Slika I.XXV.** Lijevo je slika pete iteracije, desno je slika šeste iteracije

**7. ITERACIJA**

| Element | Veze u redcima (ulaz) | Veze u stupcima (izlaz) | Presjecište ulaz/izlaz | Level |
|---------|-----------------------|-------------------------|------------------------|-------|
| 12      | 12                    | 12                      | 12                     | VII   |

**Slika I.XXVI.** Sedma iteracija



|    | 2 | 1 | 5 | 6 | 10 | 9 | 4 | 14 | 15 | 13 | 3 | 8 | 7 | 11 | 12 |
|----|---|---|---|---|----|---|---|----|----|----|---|---|---|----|----|
| 2  | 1 |   |   |   |    |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 1  |   | 1 |   |   |    |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 5  | 1 |   | 1 |   |    |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 6  | 1 |   |   | 1 |    |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 10 | 1 |   | 1 | 1 | 1  |   |   |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 9  | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 4  | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    |    |   |   |   |    |    |
| 14 | 1 |   | 1 | 1 | 1  |   |   | 1  |    |    |   |   |   |    |    |
| 15 | 1 |   | 1 | 1 | 1  |   |   |    | 1  |    |   |   |   |    |    |
| 13 | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  |   |   |   |    |    |
| 3  | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 |   |   |    |    |
| 8  | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 |   |   |    |    |
| 7  | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 | 1 |   |    |    |
| 11 | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 | 1 | 1 |    |    |
| 12 | 1 | 1 | 1 |   |    | 1 | 1 |    |    | 1  | 1 | 1 | 1 | 1  |    |

Slika I.XXVII. Particionirana matrica

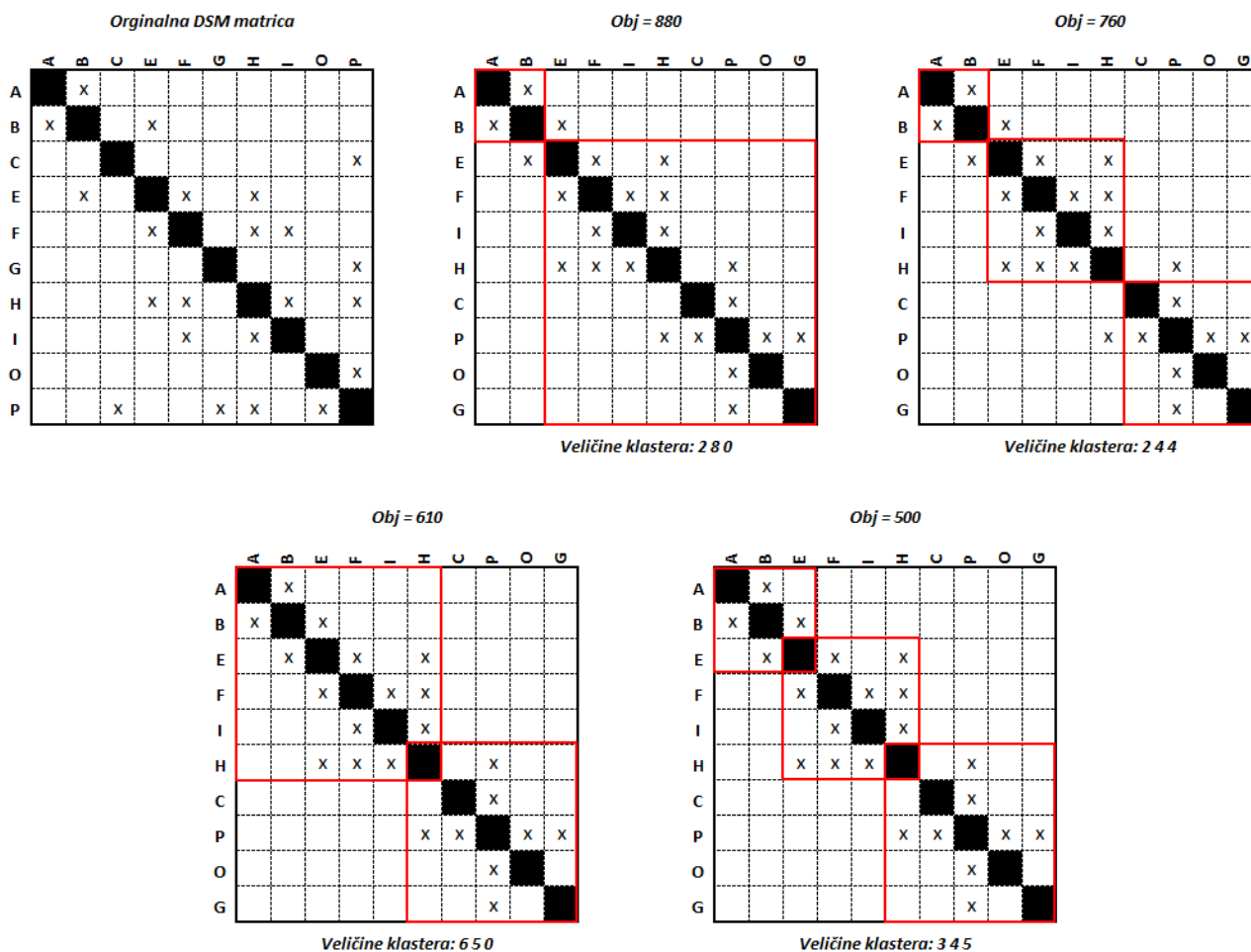
### II.I. Teorijske osnove, klasteriranje

Klasteriranje je oblik analize particioniranja, koji razmješta retke i kolone prema zadanom cilju koji obično sadrži i jakost interakcije [25]. Algoritmi za klasteriranje imaju brojne primjene poput podjele tržišta i postoji velik raspon algoritama (Hartigan 1975). Ciljna funkcija kod klasteriranja je u konfliktu dva cilja. Prvi cilj jest minimiziranje interakcija van klastera i drugi je minimiziranje veličine klastera. Kao što je prikazano na donjoj slici, za ilustraciju su prikazana četiri moguća rješenja s dva ili tri klastera - sa i bez preklapanja. Ciljna funkcija koja se minimizira, sadrži veličinu klastera ( $C_i$ ) i broj interakcija izvan klastera ( $I_o$ ) prema jednadžbi:

$$\text{Obj} = \alpha \sum_{i=1}^M C_i^2 + \beta \cdot I_o$$

$$\alpha = 10$$

$$\beta = 100$$



**Slika II.I.** Klasteriranje

Postavlja se pitanje koji je broj klastera optimalan, je li bolje da cijela matrica bude jedan klaster - tj.  $M = 1$ , ili je bolje da svaka komponenta bude klaster za sebe - tj.  $M = N$ ? Nijedno od navedenih rješenja nije poželjno, već ovisi o promatranom problemu. Pri analizi treba pratiti i tako odrediti optimum, obzirom na način da se variraju konstante i prate rezultati.

Osim toga, potrebno je odrediti treba li i kako ograničiti veličinu klastera. Donja granica veličine klastera ujedno je i jedan element u matrici, međutim, potrebno je ograničiti maksimalni broj komponenata u klasteru.

Na prethodnoj slici 3.9.6. pokazani su klasteri koji se preklapaju. Otkrivanje i označavanje takvih veznih komponenata osigurava važan uvid u arhitekturu proizvoda. Klasteriranje DSM-a, bazirano na bilo kojem tipu interakcija odvojeno, vjerojatno predlaže drukčiji raspored klastera. Stoga se postavlja pitanje koji određeni tipovi veza imaju veću važnost - ili težinu - u odnosu na druge. Korisnik može dobiti uvid u prihvatljivije rješenje, na način da usporedi različita optimalna rješenja razmatrajući različite tipove interakcija.

Neki sustavi imaju više elemenata koji nisu, niti ne mogu biti, dio klastera - jer imaju veze sa skoro svim elementima. Stoga neki algoritmi za klasteriranje imaju sabirnički prag („bus threshold“), gdje korisnik definira broj sabirničkih elemenata i korisnik bi sam trebao provesti analizu osjetljivosti i odrediti sabirnički prag.

DSM matrice mogu biti i direktno analizirane pomicanjem redaka i kolona ručno (ili programiranim makroima). Ručno podešavanje također može biti korisno za analizu osjetljivosti. To je važno primijetiti na vrijeme, kako bi se moglo pristupiti traženju optimalnog rješenja.

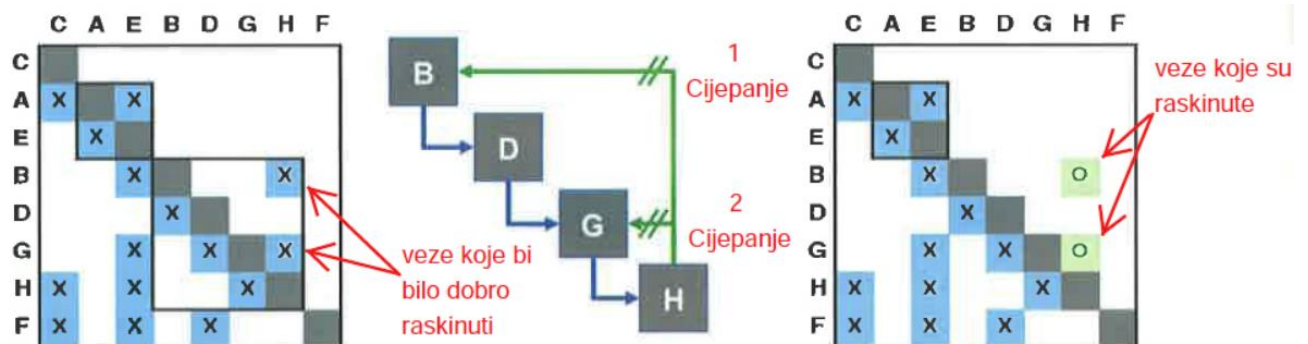
## II.II. Teorijske osnove, analiza cijepanja

Cijepanje [31,86] je proces micanja povratnih veza (ili zadataka manjeg prioriteta). Cijepanje može utjecati na modularizaciju ili standardizaciju komponenata [99]. U parametarskom DSM-u, cijepanje može utjecati na pouzdanost početne pretpostavke vrijednosti parametra [90].

Proces cijepanja se obično radi ručno i ovisi o poznavanju značenja micanja povratnih veza. Ne postoji optimalna metoda, ali preporuča se koristiti dvama kriterijima:

1. Minimalnim brojem rascjepa: potrebno je minimizirati broj rascjepa, jer predstavljaju uvođenje inicijalnih pretpostavki.
2. Ograničenjem rascjepa na najmanje blokove uz dijagonalu.

Sama procedura cijepanja izgleda kao ova u nastavku.



Slika II.II. Analiza cijepanja prema [25]

Procedura se može opisati na sljedeći način:

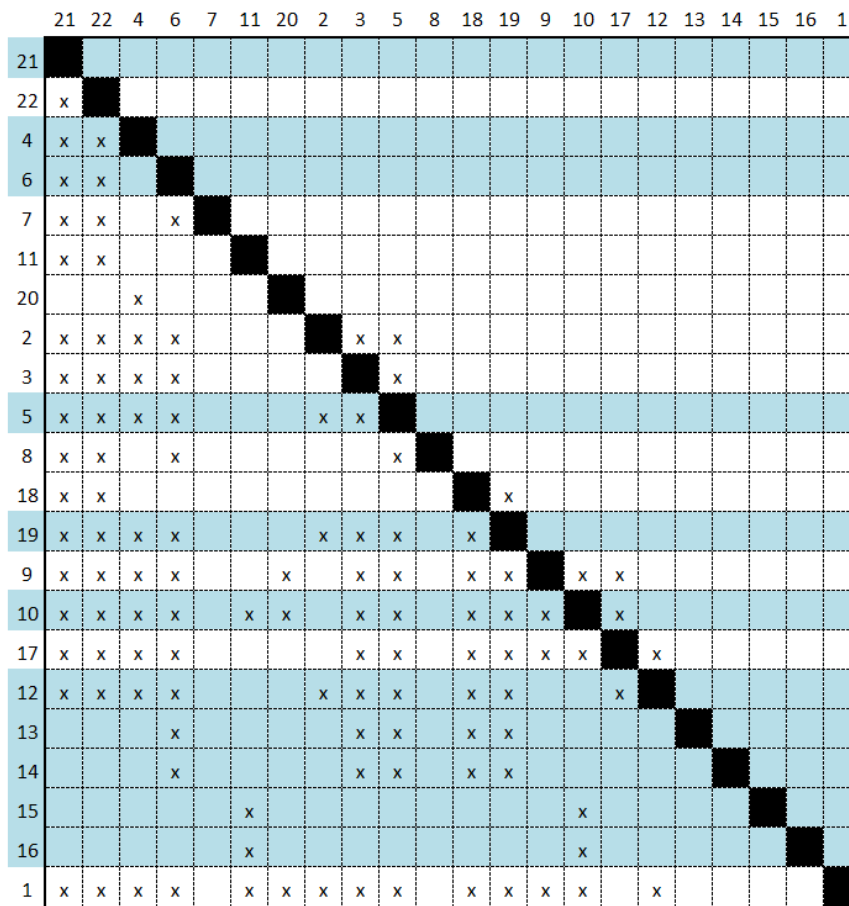
1. Nađi jednu ili više veza koje bi prekinuo, kako bi se najučinkovitije smanjila povezanost u bloku. Steward [31] je objasnio kako naći mjesto cijepanja. Najbolja veza

- za cijepanje ona je koja prekida najviše i najduže krugove. To bi na gornjoj slici bilo cijepanje 1.
2. Predložena cijepanja moraju biti prihvaćena ili odbijena, bazirano na znanju o procesu. Prekinute oznake postaju pretpostavke za izvođenje povezanih procesa s minimalnim iteracijama. Predloženo se cijepanje može prihvatiti samo ako korisnik procesa vjeruje da se neophodni ulazni podatak može pretpostaviti s dovoljnom točnošću. Ukoliko se neki ulazni podatak ne može pretpostaviti, utoliko se može predložiti sljedeće cijepanje od koraka 1.
  3. Povezani blokovi su sada particionirani izbjegavajući isprekidane oznake. To bi trebalo prekinuti blok u jedan ili više manjih blokova i pojedinačne aktivnosti - eventualno na set potpuno sekvencijalnih ili paralelnih aktivnosti.
  4. Isprekidana oznaka se mora zamijeniti u DSM-u, da bi služila kao podsjetnik pretpostavke dok se izvodi proces i da bi se pretpostavka provjerila.
  5. Zbog isprekidane oznake, bilo koja pretpostavka koja ispadne kriva, najvjerojatnije će dovesti do ponavljanja, tj. povratne petlje (iteracije).
  6. Više cijepanja može se omogućiti s jednom pretpostavkom. Na slici, pretpostavka rezultata H može omogućiti da budu napravljeni B i G.

Mnogi primjeri procesa DSM-a u primjeni upotrebljavaju analizu sekvenciranja te, nakon toga, analizu cijepanja.

### **II.III. Teorijske osnove, analiza ulančavanja**

Ulančavanje je postupak dodavanja izmjenjujuće tamne i svijetle boje u redcima - particioniranoj ili neparticioniranoj matrici - koje označavaju nezavisne, tj. paralelne aktivnosti (*concurrent*). Jedan element unutar jednog pojasa predstavlja usko grlo, stoga je, kako bi se poboljšala konkurentnost projekta i smanjilo ukupno vrijeme izvođenja, cilj imati manje pojasa tj. više paralelnih aktivnosti. Analiza ulančavanja ne upotrebljava povratne petlje (iteracije), što se može vidjeti i na donjoj slici. Korištenjem analize ulančavanja na sljedećem problemu, može se vidjeti da se aktivnosti 4 i 6 mogu izvoditi paralelno, a isto tako aktivnosti 7, 11, 20, 2 i 3, poslije aktivnosti 8 i 18, i na kraju aktivnosti 12, 13, 14, 15, 16.



Slika II.III. Analiza ulančavanja prema [25]

### III.I. Matlab kod za novi predloženi program

```
%%
%   Napravio: Ivan Triplat
%           Zagreb
%
%   Datum: 12.2016
%%
clc
clear
DSM_size = 8;           % definiranje velicine matrice
n = 1.00001
format short
%% Ulazni podaci za konstruiranje DSM matrice
DSM = [ 3 1 1 1 1 1 0 0 ;... %1 redak
        0 5 1 1 1 1 0 0 ;... %2 redak
        0 0 8 1 1 1 0 0 ;... %3 redak
        0 0 0 2 0 0 0 0 ;... %4 redak
        0 1 1 1 4 1 0 0 ;... %5 redak
        0 0 0 0 0 6 0 0 ;... %6 redak
        0 0 0 0 0 1 2 0 ;... %7 redak
        0 0 0 0 1 1 0 10 ] %8 redak
% Nazivi zadataka
DSMLABEL = cell(DSM_size,1);
DSMLABEL{1,1} = 'Pro 1';
DSMLABEL{2,1} = 'Pro 2';
DSMLABEL{3,1} = 'Pro 3';
DSMLABEL{4,1} = 'Pro 4';
DSMLABEL{5,1} = 'Pro 5';
DSMLABEL{6,1} = 'Pro 6';
DSMLABEL{7,1} = 'Pro 7';
DSMLABEL{8,1} = 'Pro 8';
DSM;
%% IZRADA OSNOVNE MATRICE
% DSM = tril(DSM,-1) + triu(DSM,1) + diag(zeros(length(DSM),1));
disp('Originalna DSM matrica')
DSM
DSM_size = size(DSM,2); %velicina matrice
l=zeros(1,DSM_size); %postavljanje vektora l s duljinom velicine matrice
%% CRTANJE POCETNE MATRICE
plDSM= eye(DSM_size);
```

```

figure(1)
imagesc(plDSM);
mymap = [0 1 1
         1 1 1];
colormap(flipud(mymap));
[x,y] = meshgrid(1:length(DSM));
% ISCRTAVANJE X VEZA IZMEĐU ELEMENATA
for i=1:DSM_size
    for j=1:DSM_size
        if DSM(i,j)==1
            yt=i;
            xt=j;
text(xt,yt,'X','Color','red','FontSize',20,'horizontalAlignment','center','verticalAlignment','middle')
        elseif DSM(i,j)>1
            yt=i;
            xt=j;
text(xt,yt,num2str(DSM(i,j)),'Color','red','FontSize',20,'horizontalAlignment','center','verticalAlignment','middle')
        end
    end
end
% ISCRTAVANJE NAZIVA ELEMENATA NA X OSI
for j=1:DSM_size
    yt=zeros(1,DSM_size)+0.5 ;
    xt(1,j)= j-0 ;
end
text(xt,yt,DSMLABEL,'Color','black','FontSize',14,'horizontalAlignment','center','verticalAlignment','bottom')
% ISCRTAVANJE NAZIVA ELEMENATA NA y OSI
for j=1:DSM_size
    xt=zeros(1,DSM_size)+0.4;
    yt(1,j)= j-0 ;
end
text(xt,yt,DSMLABEL,'Color','black','FontSize',14,'horizontalAlignment','right','verticalAlignment','middle')

midValue = mean(get(gca,'CLim'));           %# Get the middle value of the
color range
textColors = repmat(DSM(:) > midValue,2,3); %# Choose white or black for the

```

```

                                                    %# text color of the strings so
                                                    %# they can be easily seen over
                                                    %# the background color
set(gca,'XTick',0.5:(length(DSM)),...          %# Change the axes tick marks
    'XTickLabel',{''},...
    'YTick',0.5:(length(DSM)),...
    'YTickLabel',{''},...
    'TickLength',[0.5 0.5]);

%% PERMUTIRANJE MATRICE I RACUNANJE VREMENA
% % %% MATRICA PERMUTACIJA DSM MATRICE

v = 1:1:DSM_size;

%%permutirana matrica
% function [p,s]=permutes(n)
% PERMUTES All N! permutations of 1:N + signatures [P,S]=(N)
% The output P is a matrix of size (N!,N) where each row
% contains a permutation of the numbers 1:N. The rows are in
% lexically sorted order.
% To permute the elements of an arbitrary vector V use
% V(PERMUTES(LENGTH(V))).
% PERMUTES(N) is the same as SORTROWS(PERMS(1:N)) but much faster.
% Thanks to Peter J Acklam for several improvements.

% Copyright (c) 1998 Mike Brookes, mike.brookes@ic.ac.uk
% Version: $Id: permutes.m 713 2011-10-16 14:45:43Z dmb $
%
% VOICEBOX is a MATLAB toolbox for speech processing.
% Home page: http://www.ee.ic.ac.uk/hp/staff/dmb/voicebox/voicebox.html
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%
% This program is free software; you can redistribute it and/or modify
% it under the terms of the GNU General Public License as published by
% the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or
% (at your option) any later version.
%
% This program is distributed in the hope that it will be useful,
% but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of

```



```

% MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
% GNU General Public License for more details.
%
% You can obtain a copy of the GNU General Public License from
% http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html or by writing to
% Free Software Foundation, Inc., 675 Mass Ave, Cambridge, MA 02139, USA.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
% p=1;
% m=1;
% if n>1
%   for a=2:n
%     q=zeros(a*m,a);
%     r=2:a+1;
%     ix=1:m;
%     for b=1:a
%       q(ix,1)=b;
%       q(ix,2:a)=r(p);
%       r(b)=b;
%       ix=ix+m;
%     end
%     m=m*a;
%     p=q;
%   end
% end
% if nargout>1 s=1-2*rem(fix((1:m)'/2),2); end
%
% [p,K]=permutes(v)

P = perms(v);
px = size(P,2); % ovih je 5 - raspored elemenata u permutaciji
pz = size(P,1); % ovih je 120 - broj permutacija u vertikalnom smjeru
PE_DSM = zeros(DSM_size);
for i=1 : pz % samo privremeno dok se ne uklju?i prva petlja
% %
% % for i=1:DSM_size
PE_DSM = zeros(DSM_size);
v = P(i,:); % vektor permutacije po kojem se slaže probna matrica
%% SLAGANJE PERMUTIRANE MATRICE
for j=1:DSM_size

```

```

for k=1:DSM_size
    if DSM(j,k)==1
        for m = 1:px
            if v(m)== j
                jp = m;
            end
        end
        for m = 1:px
            if v(m)== k
                kp = m;
            end
        end
        PE_DSM(jp,kp)= DSM(j,k);
    elseif DSM(j,k)>1
        for m = 1:px
            if v(m)== j
                jp = m;
            end
        end
        for m = 1:px
            if v(m)== k
                kp = m;
            end
        end
        PE_DSM(jp,kp)= DSM(j,k);
    end
end
end
end
PE_DSM;
% KRAJ SLAGANJA PERMUTIRANE MATRICE
%% RA?UNANJE VREMENA ZA ODRE?ENU PERMUTACIJU
u = 0;
t = 0;
while u < DSM_size
    u = u+1;
    t = t + PE_DSM(u,u);
    for o = 1 : u-1
        if PE_DSM(o,u) > 0
            for p = o : u
                t = t + 0.5 * PE_DSM(p,p);
            end
        end
    end
end

```

```

        break
    end
end
end
%% smanjenje vremena za paralelno izvođenje zadataka
u = 1;
o = 0;
paralelno = zeros(DSM_size,1);
while u < DSM_size
    u = u+1 ;
    a = 0;
    for o = 1 : u-1;
        a=a+1;
        if PE_DSM(u,u-o) == 0;
            paralelno(u) = a;
        else
            break
        end
    end
end
end
u=0;
e=0;
r=0;
w=0;
d=0;
t;
while r < DSM_size;
    if paralelno(DSM_size - r) > 0;
        w = paralelno(DSM_size - r);
        d = zeros(w+1,1);
        for e = 0 : w;
            d(e+1) = PE_DSM(DSM_size - r-e,DSM_size - r-e);
        end
        if max(d) == d(1);
            t = t - min(d);
        r=r+1;
        else
            t = t - d(1);
        r=r+1;
        end
    else

```

```

        r=r+1;
    end
end
tu(i) = t;
end
%% Crtanje vremena
figure(2)
l=1:1:pz;
plot(l,tu,'-o')
axis([0 pz 0 max(tu)])
%% Minimalno vrijeme je u permutaciji I
[M,I] = min(tu(:));
%% Traženje svih minimuma u vektoru vremena
min = min(tu)
broj = size(tu,2)
e=1;
for a=1:1:broj;
    if min == tu(a)
        vecmin(e) = a
        e = e + 1;
    end
end
end
%% Ispis svih minimuma prema vektoru s brojevima minimuma
for m = 1:1:size(vecmin,2);
    n = m + 2;
    min_DSM = zeros(DSM_size);
    i = vecmin(m);
    v = P(i,:); % Vektor permutacije po kojem se slaže probna matrica
    for j=1:DSM_size
        for k=1:DSM_size
            if DSM(j,k)==1
                for m = 1:px
                    if v(m)== j
                        jp = m;
                    end
                end
                for m = 1:px
                    if v(m)== k
                        kp = m;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

        min_DSM(jp, kp) = DSM(j, k);
    elseif DSM(j, k) > 1
        for m = 1:px
            if v(m) == j
                jp = m;
            end
        end
        for m = 1:px
            if v(m) == k
                kp = m;
            end
        end
        min_DSM(jp, kp) = DSM(j, k);
        optDSMLABEL(jp, 1) = DSMLABEL(j, 1);
    end
end
end
min_DSM
%% CRTANJE OPTIMIRANE MATRICE
plDSM = eye(DSM_size);
figure(n)
imagesc(plDSM); %# Create a colored plot of the matrix values
mymap = [0 1 1
         1 1 1];
colormap(flipud(mymap)); %# Change the colormap to gray (so higher values are
[x, y] = meshgrid(1:length(DSM)); %# Create x and y coordinates for the strings
% ISCRTAVANJE X VEZA IZMEĐU ELEMENATA
    for i = 1:DSM_size
        for j = 1:DSM_size
            if min_DSM(i, j) == 1
                yt = i;
                xt = j;
                text(xt, yt, 'X', 'Color', 'red', 'FontSize', 20, 'horizontalAlignment', 'center', 'verticalAlignment', 'middle')
            elseif min_DSM(i, j) > 1
                yt = i;
                xt = j;
                text(xt, yt, num2str(min_DSM(i, j)), 'Color', 'red', 'FontSize', 20, 'horizontalAlignment', 'center', 'verticalAlignment', 'middle')
            end
        end
    end
end
end

```

```

end
% ISCRTAVANJE NAZIVA ELEMENATA NA X OSI
for j=1:DSM_size
    yt=zeros(1,DSM_size)+0.5 ;
    xt(1,j)= j-0 ;
end
text(xt,yt,optDSMLABEL,'Color','black','FontSize',14,'horizontalAlignment','center','verticalAlignment','bottom')
% ISCRTAVANJE NAZIVA ELEMENATA NA y OSI
for j=1:DSM_size
    xt=zeros(1,DSM_size)+0.4;
    yt(1,j)= j-0 ;
end
text(xt,yt,optDSMLABEL,'Color','black','FontSize',14,'horizontalAlignment','right','verticalAlignment','middle')

midValue = mean(get(gca,'CLim'));           %# Get the middle value of the
color range
textColors = repmat(DSM(:) > midValue,2,3); %# Choose white or black for the
                                             %# text color of the strings so
                                             %# they can be easily seen over
                                             %# the background color

set(gca,'XTick',0.5:(length(DSM)),...      %# Change the axes tick marks
      'XTickLabel',{''},...              %# and tick labels
      'YTick',0.5:(length(DSM)),...
      'YTickLabel',{''},...
      'TickLength',[0.5 0.5]);
end

```