Optimiranje u projektiranju industrijskih transformatora

Žičkar, Roman

Scientific master's theses / Magistarski rad

2011

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:338048

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OPTIMIRANJE U PROJEKTIRANJU INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA

Magistarski rad

ROMAN ŽIČKAR

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

OPTIMIRANJE U PROJEKTIRANJU INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA

Magistarski rad

Mentor:

Dr.sc. DRAGUTIN ŠČAP, red.prof.

ROMAN ŽIČKAR

Zagreb, 2011.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 621.314.228: 519.161.172.1

Ključne riječi: optimiranje, dimenzioniranje industrijskih transformatora, pećni i ispravljački transformatori, kombinatorička geometrija, egzaktna metoda, heuristike, 2D pakiranje i izrezivanje.

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: Strojarstvo i elektrotehnika

Institucija u kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: Dr.sc. Dragutin Ščap, red.prof.

Broj stranica: 117

Broj slika: 66

Broj tablica: 16

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 30

Datum obrane:_____

Povjerenstvo: Dr.sc. Zvonko Herold, izv.prof.

Dr.sc. Dragutin Ščap, red.prof.

Dr.sc. Zvonimir Valković, red.prof.

Institucija u kojoj je rad pohranjen:

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Poslijediplomski znanstveni studij
Smjer **TEORIJA KONSTRUKCIJA**

Zagreb, 27. rujna 2010.

Zadatak za magistarski rad

Kandidat: Žičkar Roman, dipl. ing. strojarstva

Naslov zadatka: **OPTIMIRANJE U PROJEKTIRANJU INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA**

Sadržaj zadatka:

Kod optimalnog projektiranja transformatora postoje dvije osnovne zadaće: zahtjev minimizacije volumena proizvoda uz istovremeno optimalni funkcionalni raspored komponenata. Optimalno projektiranja takvog proizvoda zahtijeva stoga temeljito poznavanje njegove strukture te svojstva i funkcionalnu povezanost komponenata.
U radu je potrebno predložiti metodu optimalnog projektiranja industrijskih transformatora kojom bi se uvele smjernice i usavršio postupak odlučivanja u projektiranju, pri čemu treba na optimalan način ispuniti spomenute kriterijske funkcije.
Konačni prijedlog treba biti prikladan za primjenu u suvremenim uvjetima projektiranja.

Rad treba sadržavati:
- uvodni dio o projektnim osnovama industrijskih transformatora, njihovim značajkama, komponentama i njihovoj funkcionalnoj povezanosti, o dosadašnjim metodama projektiranja;
- analizu i formulaciju optimizacijskog problema, izbor prikladnih metoda optimizacije;
- prijedlog metode optimalnog projektiranja s pripadnim postupkom odlučivanja;
- prikaz primjene predložene metode na odabranom primjeru;
- sintezu i diskusiju rezultata;
- zaključak.

Zadatak zadan: 19. 10. 2010. Rad predan:

Mentor:	Predsjednik Odbora za poslijediplomske studije:	Voditelj smjera:
Dr.sc. Dragutin Ščap, red. prof.	Dr.sc. Tomislav Filetin, red. prof.	Dr.sc. Jurica Sorić, red. prof.

Koristim ovu priliku da se zahvalim prof.dr.sc. Dragutinu Ščapu, prof.dr.sc. Zvonimiru Valkoviću i gosp. Zvonimiru Antoleku dipl.ing. koji su mi svojim korisnim savjetima pomogli pri izradi ovog magistarskog rada.

Zahvaljujem se tvrtki SIEMENS AG (PTD Dresden) koja mi je omogućila završetak poslijediplomskog studija.

Posebna zahvala mojoj prijateljici Aniti na logistici.

Ovom prilikom izjavljujem da sam ovaj magistarski rad izradio samostalno uz pomoć navedene stručne literature.

U Dresdenu, 28.04.2011.

Roman Žičkar, dipl. ing.

_____

„Što je konstrukcija jednostavnija, to je ona genijalnija. Komplicirano konstruirati može svatko.“

S.P. Koroljov, pionir ruskog svemirskog programa

Mojim sinovima

Andreju i Janu

SADRŽAJ:

SAŽETAK I
SUMMARY II
ZUSAMMENFASSUNG II
POPIS OZNAKA III
POPIS KRATICA XI
POPIS SLIKA XIII
POPIS TABLICA XV
1 UVOD 1
1.1 OSNOVNI POJMOVI 2
1.2 INDUSTRIJSKI TRANSFORMATORI 3
1.2.1 Pećni transformatori (PT) 3
1.2.2 Ispravljački transformatori (IsT) 5
2 PROJEKTNA OSNOVA INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA 7
2.1 PRORAČUN I OSNOVE (ELEKTRO-MAGNETIZAM) 7
2.1.1 Način rada transformatora 7
2.1.2 Pećni transformatori (osnove) 9
2.1.2.1 Proračun pećnog transformatora (Električni dio) 10
2.1.2.2 Izrada početnog rješenja (osnivanje) 11
2.1.2.3 Proračun komponenata aktivnog dijela 13
2.1.2.4 Model aktivnog dijela 14
2.1.2.5 Optimiranje aktivnog dijela 15
2.1.2.6 Kontrola proračuna 16
2.1.3 Ispravljački transformator (osnove) 17
2.1.3.1 Spojevi ispravljačkih transformatora 17
2.1.3.2 Broj impulsa i valovitost napona (struje) 21
2.1.3.3 Određivanje faznog pomaka za kut α 23
2.1.3.4 Spoj produženi trokut 24
2.1.3.5 Regulacija napona 26
2.1.3.6 Proračun ispravljačkog transformatora (električni dio) 26
2.2 OSNOVE KONSTRUKCIJE 27
2.2.1 Osnovni dijelovi transformatora 27
2.2.1.1 Jezgra 27
2.2.1.2 Namoti 29
2.2.1.3 Stupanj izolacije i izolacija namota 30
2.2.1.4 Priključci i elementi priključaka 32
2.2.1.5 Provodnici 36
2.2.1.6 Nemagnetske ploče za provodnike sekundara 38
2.2.1.7 Kotao (Kućište transformatora) 39
2.2.1.8 Poklopac kotla 42

2.2.1.9 Konzervator i izolacijsko ulje ... 43
2.2.1.10 Hlađenje transformatora ... 44
2.2.1.11 Rezime projektne osnove industrijskih transformatora ... 48
2.3 FUNKCIONALNE VEZE KOMPONENTI ... 49
2.3.1 Komponente industrijskih transformatora ... 49
2.3.2 Pećni transformatori s direktnom regulacijom ... 50
2.3.3 Pećni transformatori (regulacija ulaznim naponom) ... 51
2.3.4 Dijagram toka odlučivanja u projektiranju pećnih transformatora ... 52
2.3.5 Ispravljački transformatori (6-pulsna izvedba) ... 53
2.3.6 Ispravljački transformatori (12-pulsna izvedba) ... 54
2.3.7 Dijagram toka odlučivanja u projektiranju ispravljačkih transformatora ... 55
2.3.8 Primjeri industrijskih transformatora ... 58
3 METODE OPTIMALNOG PROJEKTIRANJA ... 59
3.1 UVOD ... 59
3.1.1 Strukturalna sinteza ... 59
3.1.2 Cilj projektiranja ... 59
3.1.3 Proces projektiranja ... 60
3.1.4 Metode rješavanja ... 62
3.1.5 Višeciljno optimiranje ... 62
3.2 OSNOVNE FAZE INŽENJERSKE OPTIMIZACIJE ... 63
3.2.1 Definicija problema ... 63
3.2.2 Fizikalni model ... 63
3.2.3 Matematički model ... 63
3.2.4 Algoritam ... 63
3.2.5 Programski alat ... 64
3.2.6 Rješavanje (optimiranje) ... 64
3.2.7 Analiza i testiranje ... 64
4 PROBLEM IZREZIVANJA I PAKIRANJA ... 66
4.1 UVOD U PROBLEM IZREZIVANJA I PAKIRANJA ... 66
4.2 DVODIMENZIONALNO IZREZIVANJE I PAKIRANJE ... 67
4.2.1 Heurističke metode određivanja položaja ... 68
4.2.2 Heurističke metode lokalnih pretraživanja ... 70
4.2.3 Opće heurističke metode ... 71
4.2.4 Egzaktne metode ... 74
4.3 ODABIR METODE ... 75
5 OPTIMIZACIJSKI MODEL INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA ... 76
5.1 PRIMJER IZRADE PEĆNOG TRANSFORMATORA ... 76
5.1.1 Tehnička specifikacija pećnog postrojenja i transformatora ... 76
5.1.2 Proračun pećnog transformatora ... 76
5.2 KRUŽNI DIJAGRAM ELEKTROLUČNE PEĆI ... 81
5.2.1 Pećni transformator (bez prigušnice) ... 81

5.2.2 Prigušnica (spojena u seriju unutar trokuta (fazna struja)) ... 81
5.2.3 Elektrolučna peć ... 82
5.2.4 Konstrukcija kružnog dijagrama ... 83
5.2.4.1 Koordinatni sistem kružnog dijagrama ... 83
5.2.4.2 Određivanje jalove i nazivne snage ... 83
5.3 KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE PEĆNOG TRANSFORMATORA ... 85
5.3.1 Regulacija prigušnice u naponskom stanju ... 85
5.3.2 Regulacija prigušnice u beznaponskom stanju ... 85
5.4 PRIMJER IZRADE ISPRAVLJAČKOG TRANSFORMATORA ... 86
5.4.1 Tehnička specifikacija ispravljačkog postrojenja ... 86
5.4.2 Ispravljački transformator (IsT ili GT) ... 87
5.4.3 Regulacijski transformator (RT) ... 90
5.4.4 Dimenzioniranje glavnih komponenti ... 97
5.4.4.1 Regulacijski transformator (RT) ... 97
5.4.4.2 Ispravljački transformator s transduktorima (GT+T) ... 98
5.4.4.3 Usisna prigušnica (UP) ... 100
5.4.4.4 Položaj komponenti u kućištu ... 101
5.4.4.5 Položaj usisne prigušnice (UP) ... 101
5.4.4.6 Položaj ispravljačkog transformatora (GT1+T1) ... 102
5.4.4.7 Položaj ispravljačkog transformatora (GT2+T2) ... 102
5.4.4.8 Položaj regulacijskog transformatora (RT) ... 102
5.4.5 Projektno-konstrukcijsko rješenje ... 102
5.5 FIZIKALNI MODEL ... 103
5.5.1 Model aktivnog dijela ... 103
5.5.2 Model kućišta transformatora ... 103
5.5.3 Model industrijskog transformatora ... 104
5.6 EGZAKTNA METODA ... 105
5.7 PRIJEDLOG RJEŠENJA 2SP|R(O)|G PROBLEMA ... 109
5.7.1 Matematički model i algoritam ... 109
5.8 O PRIMJENI KOMERCIJALNIH PROGRAMA ... 111
6. ZAKLJUČAK ... 112
LITERATURA* ... 113
KRATKI ŽIVOTOPIS ... 115
SHORT BIOGRAPHY ... 116
LEBENSLAUF ... 117

SAŽETAK

U radu je predložena metoda optimalnog projektiranja industrijskih transformatora kojom se utvrđuju smjernice i postupci odlučivanja u projektiranju. Projektiranje industrijskih transformatora je multidisciplinaran inženjerski posao koji povezuje znanja iz nekoliko grana tehnike, nedovoljno analiziran sa znanstvenog gledišta.

Utvrđeno je da za projektiranje optimalne konstrukcije transformatora ne postoji jedinstveni model i „najbolja“ metoda. Za razvoj metoda optimiranja mjerodavno je praktično iskustvo, koje je potrebno potkrijepiti znanstveno postavljenim modelom.

Znanstveno utemeljenim pristupom i uz primjenu odgovarajućeg matematičkog modela može se unaprijediti pozicioniranje aktivnih dijelova u kućištu (kotlu) industrijskih transformatora.

Rad je podijeljen u dva glavna dijela: definiranje projektne baze s opisom značajki industrijskih transformatora te utvrđivanje i provedba postupka optimalnog projektiranja.

Rezultati rada mogu pomoći u razvoju budućih metoda i algoritama u projektiranju industrijskih transformatora.

Ključne riječi: optimiranje, dimenzioniranje industrijskih transformatora, pećni i ispravljački transformatori, kombinatorička geometrija, egzaktna metoda, heuristike, 2D pakiranje i izrezivanje.

SUMMARY

This thesis suggests a method for optimum design of industrial transformers, which defines the design guidelines and decision procedures. Designing industrial transformers is a multidisciplinary engineering work, connecting the knowledge of several technical branches, and is not sufficiently analysed from a scientific standpoint.

It was established that there is no unique model and "the best" method for achieving the optimum transformer design. For the development of optimisation methods, practical experience is relevant, which has to be supported by a scientifically posited model.

Using a scientifically based approach and applying the adequate mathematical model it is possible to improve the positioning of active parts within the housing (tank) of transformers.

The thesis consists of two main parts: defining the design basis and characteristics of industrial transformers, and the definition and implementation of the optimum design procedure.

Results of this work can help in further development of methods and algorithms applied in designing industrial transformers.

Keywords: optimization, dimensioning of industrial transformers,
furnace and rectifire transformers, combinatorial geometry,
exact method, heuristics, 2D cutting and packing.

ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit schlägt ein Verfahren zur optimalen Auslegung von Industrietransformatoren vor, die die Auslegung Richtlinien und Entscheidungsverfahren definiert. Die Projektierung von Transformatoren ist ein multidisziplinäres Bauwerk, das die Kenntnisse der verschiedenen technischen Bereiche verbindet, jedoch nicht ausreichend aus wissenschaftlicher Sicht analysiert ist.

Es wurde festgestellt, dass es kein einheitliches Model und eine "beste" Methode zur Erreichung der optimalen Auslegung gibt. Für die Entwicklung von Optimierungsverfahren, ist praktische Erfahrung relevant, die mit der Unterstützung durch ein wissenschaftlich gesetztes Model verwerdet werden soll.

Mit einem wissenschaftlich fundierten Konzept und unter Anwendung des adäquaten mathematischen Models ist es möglich, die Positionierung der aktiven Teile innerhalb des Gehäuses (Kessel) von Transformatoren zu verbessern.

Die Arbeit besteht aus zwei Hauptteilen: Definition der Projektierungsbasis mit einer Beschreibung der Merkmale von Industrietransformatoren, sowie die Definition und Umsetzung der optimalen Projektierungsverfahren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können bei der Weiterentwicklung von Methoden und Algorithmen in der Projektierung von Industrietransformatoren weiter helfen.

Stichwörter: Optimierung, Dimensionierung von Industrietransformatoren,
Ofen- und Gleichrichter Transformatoren, kombinatorische Geometrie,
Exakte Methode, Heuristiken, 2D Schneiden und Verpacken.

POPIS OZNAKA

Oznaka	Naziv (opis)	Mjerna jedinica
a	broj istosmjernih grupa postrojenja	-
A_{Fe}	presjek jezgre	cm^2
$A_{B(GT)}$	prostor za ugradnju aktivnog dijela (po širini)	mm
$A_{L(GT)}$	prostor za ugradnju aktivnog dijela (po duljini)	mm
$A_{L(RT)}$	prostor za priključke i ugradnju aktivnog dijela RT-a	mm
A_{AL-S}	razmak između magnetskog zaslona i priključaka	mm
A_{J-R}	udaljenost jezgra - namot regulacije (u prozoru)	mm
A_{ON}	udaljenost sekundara od gornjeg jarma	mm
A_{OV}	udaljenost primara od gornjeg jarma	mm
A_{PT}	širina prozora u jezgri potrebnu za ugradnju bakrenih šina	mm
A_{S-S}	razmak između dviju bakrenih šina	mm
A_{T-N}	potrebni ugradbeni razmak između transduktora (šina) i namota	mm
$A_{TS(GT)}$	potrebni ugradbeni razmak između dva transponirana vodića	mm
A_{T-T}	potrebni ugradbeni razmak između dva transduktora	mm
$A_{U(GT)}$	potrebni ugradbeni razmak između bakrenih šina i trans. vodića (transduktora)	mm
A_{UN}	udaljenost sekundara od donjeg jarma	mm
A_{UR}	udaljenost regulacije od donjeg jarma	mm
A_{UV}	udaljenost primara od donjeg jarma	mm
A_{N-N}	udaljenost namota dviju faza	mm
A_{R-V}	udaljenost namot reg. - namot primara (u prozoru)	mm
A_{V-N}	udaljenost namot prim. - namot sekundara (u prozoru)	mm
A_{OR}	udaljenost regulacije od gornjeg jarma	mm
b	broj istosmjernih grupa DSS spoja	-
B	magnetska indukcija	T
B_J	visina najvećeg paketa	mm
B_{NN}	širina namota sekundara	mm
B_{NR}	širina namota regulacije	mm
B_{NV}	širina namota primara	mm
B_{GT}	širina glavnog transformatora	mm
B_{PT}	širina prozora u jezgri potrebnu za ugradnju bakrenih šina	mm
BR	širina povratnog jarma UP-a	mm

B_{RT}	širina regulacijskog transformatora	mm
B_S	debljina bakrene ploče priključaka	mm
BS	širina jarma UP-a	mm
BSJ	širina međujarma (izmedu dva 6-pulsna sistema) UP-a	mm
$BS_{(UP)}$	širina bakrenih šina UP-a	mm
$B_{S,J(RT)}$	visina najvećeg paketa jezgre RT-a	mm
$B_{S,J(GT)}$	visina najvećeg paketa jezgre GT-a	mm
B_{SS}	debljina bakrenih šina priključaka	mm
B_T	širina transduktorske jezgre	mm
B_{TEH1}	ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer x) UP-a	mm
B_{TEH2}	ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer y) UP-a	mm
B_{TEH3}	ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer y) UP-a	mm
B_{TEH4}	ugradbeni razmak između paketa jezgre (smjer z)	mm
$B_{TS(GT)}$	širina transponiranog vodića namota sekundara GT-a	mm
B_{UT}	širina usisne prigušnice	mm
C_{Fe}	konstanta jezgre	$cm^2(VAs)^{½}$
C_{PK}	konstanta grupe spoja i izvedbe priključaka sek.	-
C_{PT}	debljina transduktorske jezgre	mm
C_{UK}	konstanta grupe spoja i izvedbe priključaka sek.	-
d	promjena napona u ispravljaču	-
Δd	tehnološki razmak između modela i kućišta (visina)	mm
d_i	visina modela aktivnog dijela	mm
D	visina modela kućišta transformatora	mm
D_J	promjer jezgre	mm
$D_{N(GT)}$	vanjski promjer sekundarnog namota GT-a	mm
$D_{N(RT)}$	vanjski promjer zadnjeg namot gledanog od jezgre RT-a	mm
D_{NN}	unutarnji promjer namota sekundara	mm
D_{NR}	unutarnji promjer namota regulacije	mm
D_{NV}	unutarnji promjer namota primara	mm
d_{max}	visina najvišeg aktivnog dijela	mm
$D_{S(GT)}$	promjer jezgre GT-a	mm
$D_{S(RT)}$	promjer jezgre RT-a	mm
$D_{SK(RT)}$	promjer sklopke (računska vrijednost) RT-a	mm
$E_{S(RT)}$	razmak između stupova jezgre RT-a	mm
$E_{S(GT)}$	razmak između stupova jezgre GT-a	mm
$E_{SK(RT)}$	razmak između sklopki (ovisi o izvedbi priključaka) RT-a	mm

$E_{SKJ(RT)}$	razmak između sklopke i najbližeg stupa (vidi $E_{SK(RT)}$) RT-a	mm
f	frekvencija	Hz
GSp	grupa spoja transformatora	-
H	širina modela kućišta transformatora	mm
H_{GT}	visina glavnog transformatora	mm
h_i	širina modela aktivnog dijela	mm
$H_{IS(GT)}$	debljina izolacije između jezgre i donje (gornje) prečke GT-a	mm
$H_{IS(RT)}$	debljina izolacije između jezgre i donje (gornje) prečke RT-a	mm
H_{NN}	visina namota sekundara	mm
H_{NR}	visina namota regulacije	mm
H_{NV}	visina namota primara	mm
$H_{P(GT)}$	visina prozora GT-a	mm
$H_{P(RT)}$	visina prozora RT-a	mm
$H_{PD(GT)}$	visina U-Profila donje prečke za jezgru s drvenim steznicima	mm
$H_{PD(RT)}$	debljina donje prečke za standardnu jezgru RT-a	mm
$H_{PG(RT)}$	debljina gornje prečke za standardnu jezgru RT-a	mm
H_{RT}	visina regulacijskog transformatora	mm
HS	visina paketa jezgre UP-a	mm
H_{UT}	visina usisne prigušnice	mm
i	položaj (regulacije) regulacijske sklopke	-
I_{dN}	istosmjerna struja	A
I_{dNA}	nazivna istosmjerna struja postrojenja	A
I_{dNG}	nazivna istosmjerna struja jedne grupe	A
I_D	struja ventila	A
I_{FP}	fazna struja svakog položaja primara	A
I_{FS}	fazna struja svakog položaja sekundara	A
I_K	struja kratkog spoja	A
I_{MK}	nazivna struja međukruga	A
I_{NP}	nazivna struja svakog položaja primara	A
I_{NS}	nazivna struja svakog položaja sekundara	A
I_{NSMAX}	maksimalna nazivna struja sekundara	A
I_{N1}	glavna komponenta struje podijeljenog namota	A
I_{N1R}	struja „serijskog“ namota štednog transformatora	A
I_{N2}	pomoćna komponenta struje podijeljenog namota	A
I_{N2R}	struja „zajedničkog“ namota štednog transformatora	A
I_P	nazivna struja primara	A

$I_{P(i)}$	struja na filtaru za položaj regulacije transformatora	A
I_{PRF}	fazna struja prigušnice	A
I_{PRN}	nazivna struja prigušnice	A
$I_{R(i)}$	struja na primarnoj strani za položaj regulacije transformatora	A
I_{UP}	nazivna struja zvijezde	A
I_{UPG}	nazivna struja usisne prigušnice (ukupna)	A
I_S	fiktivna struja jedne faze (ili struja nepodijeljenog namota)	A
$I_{SK(i)}$	struja regulacijske sklopke za položaj regulacije	A
I_1	struja primarnog namota	A
I_2	struja sekundarnog namota	A
J_S	gustoća struje	A/mm^2
k	faktor sigurnosti rada elektrolučne peći	-
L_{GT}	duljina glavnog transformatora	mm
L_{RT}	duljina regulacijskog transformatora	mm
L_T	širina transduktorske jezgre	mm
L_{UT}	duljina usisne prigušnice	mm
L_1	induktivitet primarnog namota	H
L_2	induktivitet sekundarnog namota	H
N_{N1}	broj zavoja glavne komponente podijeljenog namota	-
N_{N2}	broj zavoja pomoćne komponente podijeljenog namota	-
NRU	ukupni broj zavoja regulacijskog transformatora (štedni spoj)	-
NR_K	broj zavoja konstantnog dijela „zajedničkog“ namota (štedni spoj)	-
NR_R	broj zavoja regulac. dijela „zajedničkog“ namota (štedni spoj)	-
NR_{MAX}	broj zavoja za najveći napon regulacije (štedni spoj)	-
NR_{MIN}	broj zavoja za najmanji napon regulacije (štedni spoj)	-
$N1R$	broj zavoja „serijskog“ namota (štedni spoj)	-
$N2R$	broj zavoja „zajedničkog“ namota (štedni spoj)	-
N_S	fiktivni broj zavoja jedne faze (nepodijeljenog namota)	-
N_1	broj zavoja primarnog namota	-
N_2	broj zavoja sekundarnog namota	-
n_J	vrsta jezgre	-
n	broj koraka regulacije	-
$ON_{(i)}$	odstupanje napona na primarnoj strani za položaj regulacije	%
$O_{(RT)}$	visina okvira potpore između gornje prečke i poklopca kotla	mm
PCu_i	gubici tereta aktivnog dijela	kW
PFe_i	gubici u željezu aktivnog dijela	kW

P_K	ukupni gubici tereta svih aktivnih dijelova	kW
ΔP_K	gubici kratkog spoja	kW
P_O	ukupni gubici u željezu svih aktivnih dijelova	kW
Q	jalova snaga	var
Q_{PR}	jalova snaga prigušnice	var
R_0	otpor pećnog transformatora	mΩ
R_P	otpor prigušnice	mΩ
R_{PR}	traženi otpor prigušnice	Ω
R_U	ukupni otpor kruga elektrolučne peći	mΩ
R_V	otpor elektrolučne peći	mΩ
S_J	najveća širina jezgre (u smjeru osi y)	mm
S_{di}	istosmjerna snaga ispravljača	MVA
S_{dT}	prividna nazivna snaga usisne prigušnice	MVA
S_F	snaga filtara	Mvar
S_{Ni}	nazivna snaga svakog položaja	MVA
S_{Ni}	nazivna snaga svakog položaja u postotcima	%
S_N	nazivna snaga	MVA
S_{N1R}	nazivna snaga „serijskog“ namota štednog transformatora	MVA
S_{N2R}	nazivna snaga „zajedničkog“ namota štednog transformatora	MVA
S_P	prividna snaga primara	MVA
S_S	prividna snaga sekundara	MVA
S_{ST}	ukupna tipska snaga DSS-spoja	MVA
S_T	tipska snaga transformatora	MVA
S_{T1R}	nazivna snaga primara regulacijskog transformatora	MVA
S_{T2G}	nazivna snaga sekundara glavnog transformatora	MVA
S_{UPG}	nazivna snaga usisne prigušnice	MVA
S_1	prividna snaga primarnog namota	MVA
S_2	prividna snaga sekundarnog namota	MVA
T	temperatura	°C
T_S	širina priključaka sekundara	mm
$TS_{(UP)}$	debljina bakrenih šina UP-a	mm
u	prenosni omjer	-
u_K	relativna vrijednost napona kratkog spoja	%
u_{KPR}	relativna vrijednost napona kratkog spoja prigušnice	%
u_{UK}	ukupni napon kratkog spoja transformatora i prigušnice	%
$u_1(t)$	primarni izmjenični napon	V

$u_2(t)$	sekundarni izmjenični napon	V
U	inducirani napon	V
$U\ /\ w$	napon po zavoju	V
U_{di}	idealni ispravljeni napon (sekundar)	V
U_{dN}	nazivni istosmjerni napon	V
U_K	napon kratkog spoja	V
ΔU_K	povećanje napona kratkog spoja (empirijska vrijednost)	%
U_{KST}	konstantni napon sekundara (pri konstantnoj snazi)	V
U_L	napon primara u nazivnom položaju	V
$U_{loD/Y}$	izmjenični napon faze sekundara trokut / zvijezda (efek.vrij.)	V
U_M	nazivni napon mreže	V
U_{MK}	nazivni napon međukruga	V
U_N	nazivni napon namota	V
U_P	napon primara	V
U_{PLD}	napon međukruga za spoj trokut	V
U_{PLY}	napon međukruga za spoj zvijezda	V
U_{PR}	nazivni napon prigušnice	V
$U_{PRIM(i)}$	napon na primarnoj strani za položaj regulacije transformatora	V
$U_{RT}\ /\ w$	napon po zavoju regulacijskog transformatora	V
UR_{MAX}	najveći napon regulacije (štedni spoj)	V
UR_{MIN}	najmanji napon regulacije (štedni spoj)	V
ΔU_S	napon između dva susjedna koraka napona sekundara	V
U_{Si}	napon sekundara za svaki položaj regulacije	V
$U_{SKONST.}$	minimalni napon sekundara za konstantnu snagu	V
U_{SMAX}	maksimalni napon sekundara	V
U_{SMIN}	minimalni napon sekundara	V
ΔU_{Si}	razlika između rač. i stv. vrijednosti za svaki položaj sekundara	V
$U_{Si}\ /\ w_{ZS}$	napon po zavoju sekundara za svaki položaj regulacije	V
$U_{so}\ /\ w_{ZS}$	izmjenični napon po zavoju sekundara	V
U_{so}	izmjenični napon faze sekundara (efektivna vrijednost)	V
U_{sou}	izmjenični napon faze sekundara (ulančani)	V
U_{UP}	nazivni napon usisne prigušnice	V
U_{UP150}/U_{di}	omjer napona usisne prigušnice i idealnog napona sekundara	-
$U_{ZK(i)}$	napon u međukrugu za određeni položaj regulacije	V
$U_{W(i)RT}$	napon po zavoju u međukrugu za određeni položaj regulacije	V
U_1	primarni izmjenični napon	V

U_2	sekundarni izmjenični napon	V
x_i	položaj prvog elementa i koordinatnog sustava (u smjer osi x)	mm
x_{li}	položaj donjeg lijevog kuta elementa pakiranja (u smjer osi x)	mm
x_{ri}	položaj desnog gornjeg kuta elementa pakiranja (u smjer osi x)	mm
X	reaktancija elektrolučne peći	mΩ
X_B	reaktancija kruga elektrolučne peći s faktorom sigurnosti	mΩ
X_0	reaktancija pećnog transformatora	mΩ
X_0^{UK}	reaktancija pećnog transformatora i prigušnice	mΩ
X_U	ukupna reaktancija kruga elektrolučne peći	mΩ
y_i	položaj prvog elementa i koordinatnog sustava (u smjer osi y)	mm
y_{li}	položaj donjeg lijevog kuta elementa pakiranja (u smjer osi y)	mm
y_{ri}	položaj desnog gornjeg kuta elementa pakiranja (u smjer osi y)	mm
W	duljina modela kućišta (kotla) transformatora	mm
w_{PKD}	fiktivni broj zavoja faze spoj trokut (za nepodijeljeni namot)	-
w_{PKY}	fiktivni broj zavoja faze spoj zvijezda (za nepodijeljeni namot)	-
w_{SR}	broj zavoja jednog koraka regulacije regulacijskog transformatora	-
w_{UK}	fiktivni broj zavoja faze (nepodjeljenog namota)	-
w_{ZPN}	ukupni broj zavoja namota primara za svaki položaj regulacije	-
Δw_{ZP}	broj zavoja između dva položaja primara	-
w_{ZS}	broj zavoja namota sekundara	-
w	broj zavoja namota	-
w_i	duljina modela aktivnog dijela	mm
w_1	ukupni broj zavoja glavnog dijela podijeljenog namota	-
$w_{1\mathrm{D}}$	ukupni broj zavoja glavnog dijela podijeljenog namota (D)	-
$w_{1\mathrm{Y}}$	ukupni broj zavoja glavnog dijela podijeljenog namota (Y)	-
w_2	ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podijeljenog namota	-
$w_{2\mathrm{D}}$	ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podijeljenog namota (D)	-
$w_{2\mathrm{Y}}$	ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podijeljenog namota (Y)	-

Grčka Oznaka	Naziv (opis)	Mjerna jedinica
α	fazni pomak	°
α_{STV}	stvarni fazni pomak	°
α_{STVD}	stvarni fazni pomak (trokut)	°
α_{STVY}	stvarni fazni pomak (zvijezda)	°
β	slučajni broj	-
λ	stvorena (generirana) djeca	-
μ	generacija	-
θ_{AL}	nadtemperatura aluminijskih zaslona u ulju	K
$\Theta_{ulje\text{-}dolje}$	temperatura na izlazu iz hladnjaka	K
$\Theta_{ulje\text{-}gore}$	temperatura na ulazu u hladnjak	K
$\Theta_{ulje\text{-}max}$	maksimalna temperatura ulja (ispod poklopca)	K
$\Delta\Theta_{ulje\text{-}max}$	maksimalno zagrijanje ulja (garantirana vrijednost)	K
$\Theta_{ulje\text{-}sredina}$	izračunata vrijednost srednje temperature ulja	K
$\Theta_{namot\text{-}gore}$	maksimalna temperatura namota („hot-spot“)	K
$\Theta_{namot\text{-}sredina}$	srednja temperatura namota	K
$\Delta\Theta_{namot\text{-}sredina}$	maksimalno zagrijanje namota (garantirana vrijednost)	K
$\Delta\Theta_{namot\text{-}ulje}$	temperaturni gradijent namot-ulje	K
Φ	magnetski tok	Wb
π	Ludolfov broj (Arhimedova konstanta)	-
φ_K	kut između faza u kratkom spoju	°

POPIS KRATICA

B&B	**B**ranch & **B**ound
BFDH	**B**est **F**it **D**ecreasing **H**eight
BL	**B**ottom-**L**eft
BLLT	**L**iu&**T**eng's **B**ottom-**L**eft
BLF	**B**ottom-**L**eft **F**ill
DB	usmjerivački spoj B6-spoj "**D**rehstrom-**B**rückenschaltung"
DSS	usmjerivački spoj M 3.2-spoj "**D**oppel**s**tern**s**chaltung mit Saugdrossel"
EA	**E**volutionary **A**lgorithms
EP	**E**volutionary **P**rograming
ES	**E**volutionary **S**trategies
F	rez je proizvoljan slobodan
FIFO	**F**irst **i**n **f**irst **o**ut
FFDH	**F**irst **F**it **D**ecreasing **H**eight
G	**G**iljotinski rez
GA	**G**enetic **A**lgorithms
GP	**G**enetic **P**rograming
GT	**G**lavni **t**ransformator (ispravljački ili pećni transformator)
HC	**H**ill **C**limbing
IEC	**I**nternational **E**lectrotechnical **C**ommission
IsT	**Is**pravljački **t**ransformator
LS	**L**ocal **S**earch
NFDH	**N**ext **F**it **D**ecreasing **H**eight
O	**O**rijentacija predmeta je određena
ProE	parametarski 3D CAD-Software
PT	**P**ećni **t**ransformator
R	orijentacija predmeta se može mjenjati za 90° (rotacija)
RC elementi	otporno kapacitativni elementi
RT	**R**egulacijski **t**ransformator
S	jedna trofazna sklopka (premještač)
SA	**S**imulated **A**nnealing
SH	**S**helf **P**acking
SMIT namot	vrsta preloženog namota bez radijalnih kanala za hlađenje
STEP-LAP	način slaganja limova jezgre
T	**T**ransduktor (magnetska prigušnica)

TP	**T**ouching **P**erimeter
TS	**T**abu **S**earch
UHP	**U**ltra **H**igh **P**ower
UP	usisna (međufazna) prigušnica
1	donji kat
2	gornji kat
2BP	dvodimenzionalno bin pakiranje u posude
2SP	dvodimenzionalno strip pakiranje u trake
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
3S	tri jednofazne sklopke (premještača)
Y	spoj u zvijezdu
Δ	spoj u trokut
III	spoj otvoreni trokut

POPIS SLIKA

Slika 1-1: Podjela transformatora
Slika 1-2: Elektrolučna peć s pećnim transformatorom
Slika 1-3: Pećni transformator
Slika 1-4: Ispravljački transformator **DSS**
Slika 1-5: Ispravljački transformator **DB**

Slika 2-1: Idealni transformator
Slika 2-2: Vrste regulacije pećnih transformatora
Slika 2-3: Raspored namota pećnih transformatora
Slika 2-4: Prozor jezgre pećnog transformatora
Slika 2-5: Ispravljački transformatori u poluvalnom **DSS** (lijevo) i punovalnom **DB** (desno) spoju
Slika 2-6: Spoj dvostruke zvijezde (sekundar) s usisnom prigušnicom **DSS** (primar Y i D, α=30°)
Slika 2-7: **DB** mosni spoj (sekundar Y i D, α=30°)
Slika 2-8: Izvedbe spoja s pripadajućim vektorskim dijagramom kod faznog pomaka za kut α
Slika 2-9: Produženi trokut kod „pozitivnog“ faznog pomaka za kut α
Slika 2-10: Produženi trokut kod „negativnog“ faznog pomaka za kut α
Slika 2-11: Izvedbe aktivnog dijela na kat sa steznicima od drveta ili nemagnetskog čelika
Slika 2-12: Prigušni **RC**-element
Slika 2-13: Prigušnica pećnog transformatora
Slika 2-14: Transduktori (magnetske prigušnice)
Slika 2-15: Dvostruka usisna prigušnica za 12-pulsno ispravljanje u **DSS**-spoju
Slika 2-16: Okvir za ugradnju plosnih provodnika s aluminijskim zaslonom
Slika 2-17: Vodom hlađeni cijevni provodnici
Slika 2-18: Kotao ispravljačkog transformatora s horizontalnim ukrutama
Slika 2-19: Ravni poklopac ispravljačkog transformatora
Slika 2-20: Konzervator ispravljačkog transformatora
Slika 2-21: Pojednostavljena raspodjela temperatura u transformatoru
Slika 2-22: Vrste hlađenja uljnih transformatora
Slika 2-23: Dijagram toka pećnih transformatora
Slika 2-24: Odabir grupe spoja i vrste regulacije za **DB**-spoj
Slika 2-25: Odabir izvedbe aktivnog dijela za **DB** spoj
Slika 2-26: Odabir izvedbe aktivnog dijela bez transduktora za **DB** spoj
Slika 2-27: Odabir izvedbe aktivnog dijela za **DSS** spoj
Slika 2-28: Odabir izvedbe aktivnog dijela bez transduktora za **DSS** spoj

Slika 3-1: Proces konvencionalnog projektiranja
Slika 3-2: Proces optimalnog projektiranja
Slika 3-3: Faze inženjerske optimizacije

Slika 4-1: Tipovi pakiranja
Slika 4-2: Postavljanje s **BL** algoritmom
Slika 4-3: Postavljanje s **BLLT** algoritmom
Slika 4-4: Postavljanje s **BLF** algoritmom
Slika 4-5: **SH** algoritam za **2SP** (a) **NFDH**, (b) **FFDH** i (c) **BFDH**
Slika 4-6: Postavljanje s **TP** algoritmom
Slika 4-7: **HC** s prikazom penjanja
Slika 4-8: **SA** s prikazom samostalnog pozicioniranja elemenata u posudi
Slika 4-9: Modifikacijama genotipova mogu biti dobiveni novi fenotipovi (**BL**-algoritam kao heuristika položaja elemenata u posudi)
Slika 4-10: Prikaz kompleksnosti stabla kod pakiranja tri različita elemenata u posudu (bez oktogonalne rotacije elemenata)

Slika 5-1: Kružni dijagram za elektrolučnu peć prema tehničkoj specifikaciji
Slika 5-2: Pećni transformatora s ugrađenom prigušnicom reguliranom u naponskom stanju
Slika 5-3: Pećni transformatora s ugrađenom prigušnicom reguliranom u beznaponskom stanju
Slika 5-4: Jednofazni (shematski) prikaz ispravljačkog transformatora s regulacijom u međukrugu
Slika 5-5: Trofazni (shematski) prikaz ispravljačkog transformatora s regulacijom u međukrugu
Slika 5-6: Položaj transduktora u priključcima glavnog transformator
Slika 5-7: Dimenzije usisne prigušnice bez steznog sustava
Slika 5-8: Projektno - konstrukcijsko rješenje (Model u **ProE**-u)
Slika 5-9: Aktivni dijelovi ispravljačkog transformatora
Slika 5-10: Dvodimenzionalni model s redoslijedom ugradnje
Slika 5-11: Pojednostavljeni prikaz elementa (aktivnih dijelova) s položajem u posudi (kućišta)
Slika 5-12: Postavljanje prvog elementa u ishodište koordinatnog sustava
Slika 5-13: Postavljanje drugog elementa na prvi element
Slika 5-14: Postavljanje drugog elementa „desno pored“ prvog element
Slika 5-15: Postavljanje trećeg elementa na prvi element
Slika 5-16: Postavljanje trećeg elementa na drugi element
Slika 5-17: Postavljanje trećeg elementa „desno pored“ drugog elementa
Slika 5-18: Postavljanje posljednjeg elementa
Slika 5-19: Optimalno rješenje upotrebom giljotinskog reza i heuristika **FFDH** i **BL**
Slika 5-20: Optimalno rješenje dobiveno primjenom programskog paketa

POPIS TABLICA

Tablica 2-1: Tablični prikaz napona pećnog transformatora

Tablica 2-2: Tablični prikaz struja pećnog transformatora

Tablica 2-3: Oznake načina hlađenja transformatora prema **IEC**-u

Tablica 2-4: Redoslijed slovnih oznaka u označavanju rashladnog sustava transformatora

Tablica 2-5: Pećni transformatori s direktnom regulacijom

Tablica 2-6: Regulacijski transformator

Tablica 2-7: Glavni (pećni) transformator

Tablica 2-8: Ispravljački transformatori (jednokatna izvedba)

Tablica 2-9: Ispravljački transformatori (dvokatna izvedba)

Tablica 2-10: Primjeri industrijskih transformatora

Tablica 5-1: Tablica struja i napona pećnog transformatora

Tablica 5-2: Tablica struja i snaga pećnog transformatora

Tablica 5-3: Tablica struja i napona za kupca

Tablica 5-4: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 167 zavoja

Tablica 5-5: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 173 zavoja

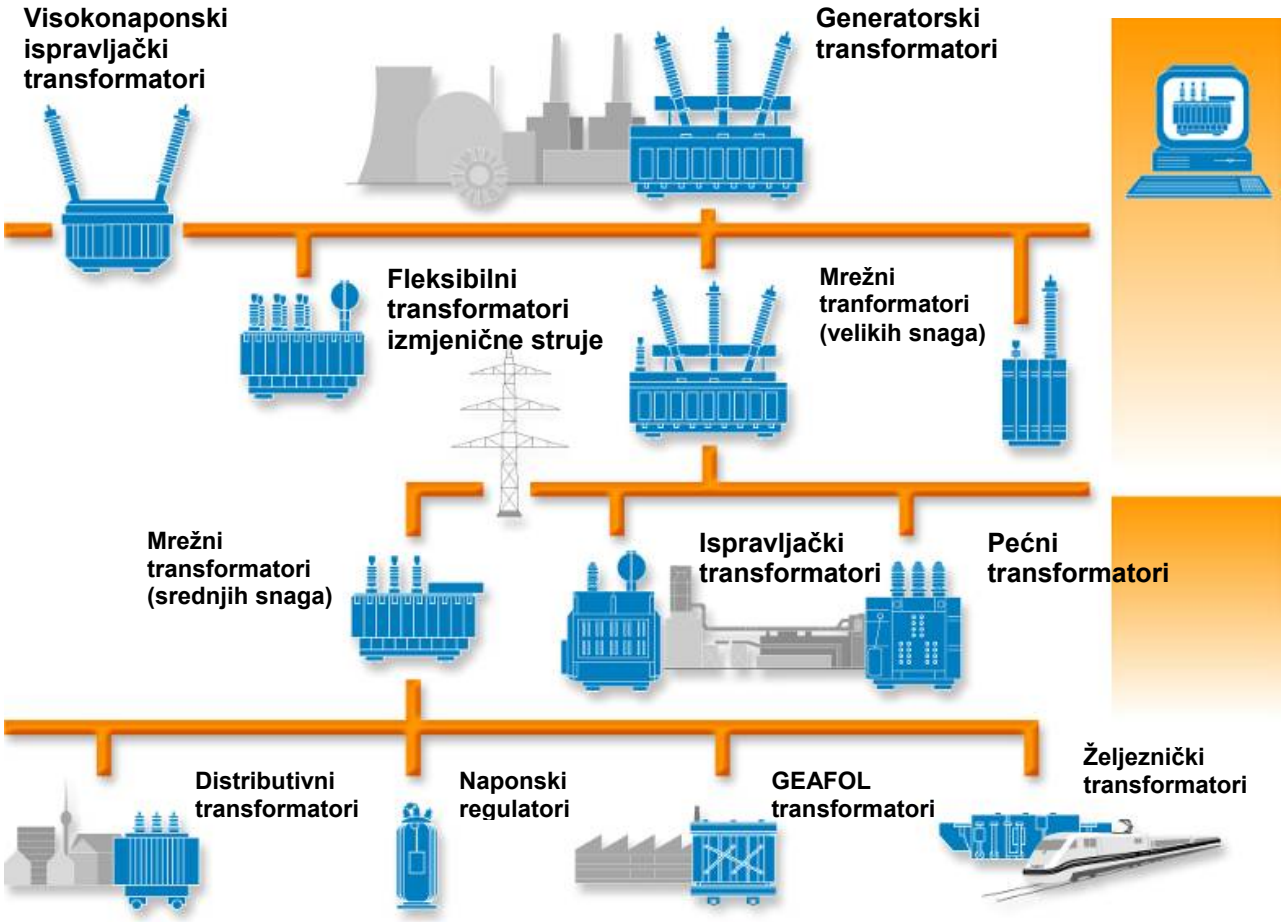
Tablica 5-6: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 173 zavoja i filtarom 20Mvar-a

1 UVOD

Električna energija je danas traženija nego ikada, što je uvjetovano ne samo globalizacijom, već i porastom broja stanovnika. Konvencionalna proizvodnja električne energije temelji se na korištenju mineralnih goriva, nuklearne energije i iskorištenju hidropotencijala. Električnu energiju je potrebno dovesti od proizvođača (elektrana) do potrošača (industrije, kućanstva) uz što manje gubitke, a za to nužna transformacija postiže se uz pomoć transformatora.

Transformator je statički elektromagnetski uređaj u kojemu se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, posredstvom magnetskog toka u jezgri prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora s izmijenjenim iznosima struje i napona te uz nepromijenjenu frekvenciju [1].

Transformatori su namijenjeni prijenosu i pretvorbi električne energije, a dijele se na generatorske, mrežne, distribucijske, ispravljačke, pećne itd. (**slika 1-1.**)



Slika 1-1: Podjela transformatora

Vijek trajanja transformatora je oko 25 godina pa se oni za taj radni vijek proračunavaju i izrađuju. Studija mreže u Njemačkoj pokazuje, međutim, da je u pogonu više od 3000 energetskih transformatora starijih od 30 godina, dakle iznad njihovog vijeka trajanja, pa ih je stoga nužno zamijeniti novima.

Osim zamjene postojećih starih transformatora, drugi uzrok povećane potrebe za energetskim transformatorima je razvoj mreže: izrazita elektrifikacija u zemljama Bliskog istoka, Dalekog istoka i Afrike, te potreba za rješavanjem preopterećenosti sustava u Sjedinjenim Američkim Državama (koja je izazvala poznati *„Blackout“*).

Razvoj i optimiranje energetskih transformatora usporeni su 90-tih godina prošlog stoljeća jer je energetika sa svojom niskom razinom dobiti i velikim uloženim radom bila potpuno neatraktivna za investitore, a još su im neatraktivniji bili specijalni transformatori namijenjeni složenim električnim transformacijama energije u industrijskim postrojenjima za proizvodnju čelika, aluminija, cinka i sl.

Električna energija i sirovine su danas od strateške važnosti. Stoga se početak ovog stoljeća bez velikog pretjerivanja može nazvati novim proljećem u proizvodnji energetskih i industrijskih transformatora. Za njihovu proizvodnju potrebno je posebno tehničko znanje i bogato empirijsko iskustvo.

1.1 OSNOVNI POJMOVI

Projektiranje industrijskih transformatora je multidisciplinaran inženjerski posao koji povezuje znanja iz nekoliko grana tehnike (elektrotehnika, energetska elektronika, metalurgija, strojarstvo, informatika, tehnologija, organizacija itd.) i od projektanta se zahtijeva da uvijek traži maksimum ili minimum nekog cilja u okviru objektivno postojećih ograničenja. Takav pristup u sintezi inženjerskih znanja, odnosno razvoju proizvoda, nameće se kao nezaobilazan način postavljanja inženjerskog zadatka s ciljem optimiranja procesa projektiranja. Poznavanje objekta/proizvoda koji se analizira (optimira) mora biti besprijekorno kako bi bilo moguće postaviti zadovoljavajući fizičko-matematički model nužan za izradu algoritma numeričke simulacije. Za provjeru i vrednovanje rezultata nužno je iskustvo koje omogućuje fino podešavanje (*„fine tuning“*) procesa optimiranja promjenom kontrolnih parametara i algoritamskih problema (parametri metode, početne točke, normiranja varijabli i sl.).

U današnje vrijeme globalne konkurentnosti projektirani objekt ili proizvod mora besprijekorno funkcionirati, a od presudne je važnosti biti najbolji među konkurentima. Pod pojmom biti najbolji u procesu projektiranja smatraju se sljedeći kriteriji: dimenzije, vrijeme izrade, kompatibilnost, pouzdanost, trajnost, težina i cijena. Strateške odluke koje se donose na početku procesa projektiranja u 90% slučajeva uvjetovane su postrojenjem u kojem se promatrani proizvod nalazi, odnosno njegovim dimenzijama. Već je naglašeno da su razvoj i optimiranje proračuna/konstrukcije industrijskih transformatora usporeni 90-tih godina prošlog stoljeća pa se iz toga može zaključiti da se proces projektiranja odvija na principima serijskog projektiranja.

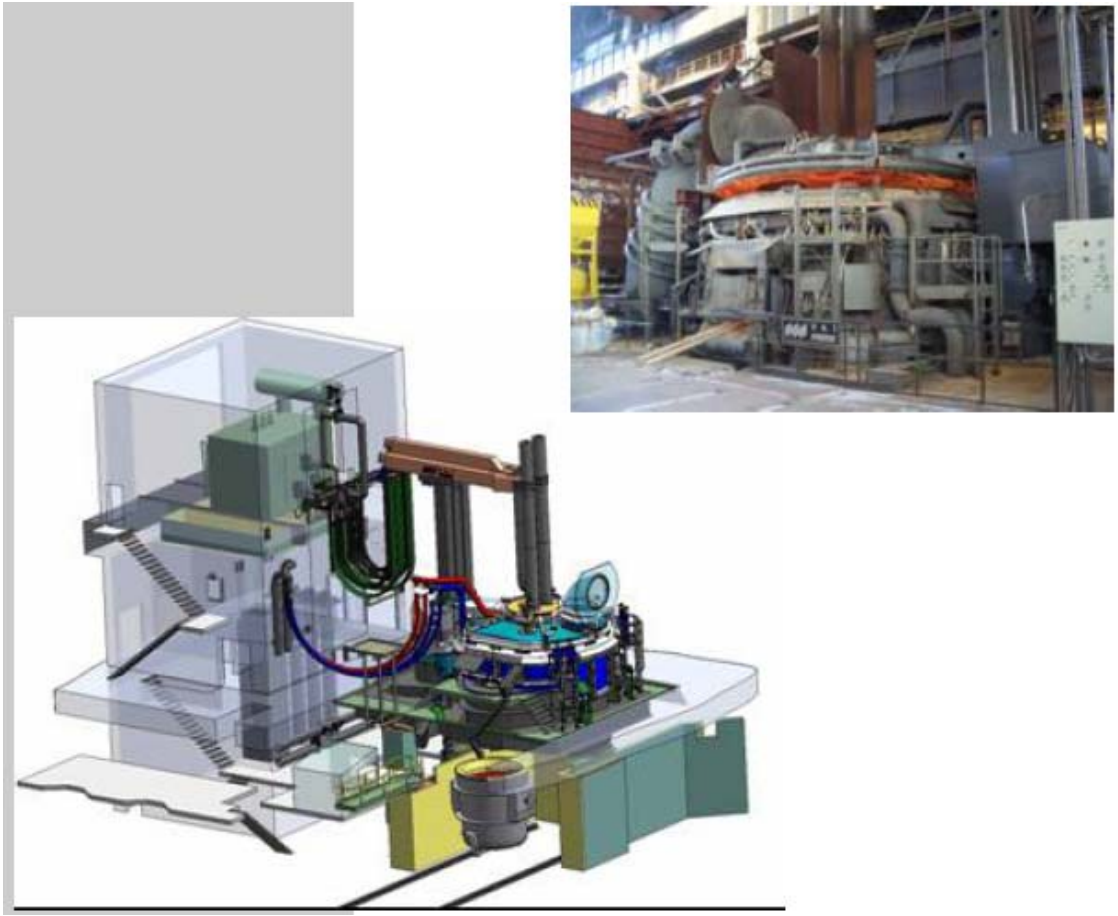
Može se zaključiti da je proces optimizacije znatno kompleksniji od skupine metoda ili numeričkih alata. U ovom slučaju se radi se o viziji koja vodi novom pristupu u inženjerskoj sintezi, s temeljima na konceptu optimalnosti. Optimiranje nije samo proces i način postavljanja inženjerskog zadatka već i alat koji pomaže u donošenju odluka u najširem smislu. Inženjeri su oduvijek pokušavali intuitivnim putem optimirati procese, no takav način je vrlo subjektivan i podložan greškama. Postupci intuitivnog optimiranja su počivali na intuiciji, profesionalnom iskustvu, brojnim pokušajima itd.

Danas je uz odgovarajuće algoritme, programske alate i uz primjenu računala velike snage moguće transformirati subjektivnošću opterećeno intuitivno optimiranje u optimiranje temeljeno na računalnoj simulaciji fizičkih modela, koji svojom definicijom u potpunosti mogu zamijeniti objekt projektiranja. Postupci optimiranja primjenjuju se u cijelom nizu linearnih i nelinearnih problema, takvi su i problemi optimiranja mehaničkih konstrukcija u koje spadaju i industrijski transformatori.

1.2 INDUSTRIJSKI TRANSFORMATORI

1.2.1 Pećni transformatori (**PT**)

Pećni transformatori su energetski transformatori za napajanje elektrolučnih peći električnom energijom, koja se u pećima električnim lukom ili otpornim grijanjem pretvara u toplinsku energiju neophodnu za proces taljenja (**slika 1-2.**). Tako dobivena toplinska energija koristi se za dobivanje čelika, ferolegura, fosfora i karbida.



Slika 1-2: Elektrolučna peć s pećnim transformatorom

Proces s vrlo visokim snagama taljenja **UHP** („Ultra High Power“) zahtijeva pećne transformatore (**slika 1-3.**) kojima je snaga u prosjeku dvostruko veća od transformatora za normalan rad. Ovim procesom je znatno povećana struja elektroda, a samim time su postroženi zahtjevi za izvedbu pećnih transformatora.

Izvedba pećnih transformatora ovisi o uvjetima pećnog postrojenja, ali u osnovi razlikujemo:

- pećne transformatore manjih snaga (do 50 MVA) koji se priključuju na mrežu srednjeg napona (do 30 kV, s jednim aktivnim dijelom),
- pećne transformatore većih snaga (iznad 50 MVA) s ugrađenom prigušnicom za stabiliziranje luka (do 30 kV, s dva aktivna dijela (prigušnica i pećni transformator)).
- pećne transformatore većih snaga (iznad 50 MVA) s direktnim priključkom na visokonaponsku mrežu (do 220 kV, s dva aktivna dijela (regulacijskim i glavnim)).

Veliko područje regulacije sekundarnog napona, uvjetovano pogonom peći, glavna je karakteristika pećnih transformatora. Područje regulacije napona je u rasponu 200–1400 V, uz odgovarajuću struju koja se kreće do 100 kA. Mrežni energetski transformatori imaju opseg reguliranog napona do 20% (tj. područje regulacije u omjeru 1:1,5), a regulacijsko područje pećnih transformatora se može kretatiti i do omjera 1:5.

Prigušnice za stabilizaciju luka se koriste za povećanje napona luka (efektivne vrijednosti) i samim time napona paljenja (prijelazni povratni napon) na račun iznosa struje luka. Elektrolučna peć projektirana s serijskom prigušnicom ne smije biti u pogonu bez prigušnice, pošto će pećni transformator, visokostrujni vodovi i talioničke elektrode u proces taljenja biti opterećeni iznad projektiranih (dozvoljenih) vrijednosti.



Slika 1-3: Pećni transformator

1.2.2 Ispravljački transformatori (**IsT**)

Ispravljački transformatori su posebni energetski transformatori koji se koriste u uređajima i pogonima istosmjerne struje, a koriste se prvenstveno za proces elektrolize (npr. dobivanje aluminija i klora). Vezu između izmjenične i istosmjerne struje čine ispravljački transformatori u izabranom spoju s ispravljačkim sklopovima. Za proces elektrolize potrebna je velika količina električne energije, pri čemu sam proces mora biti stabilan i maksimalno ekonomičan.

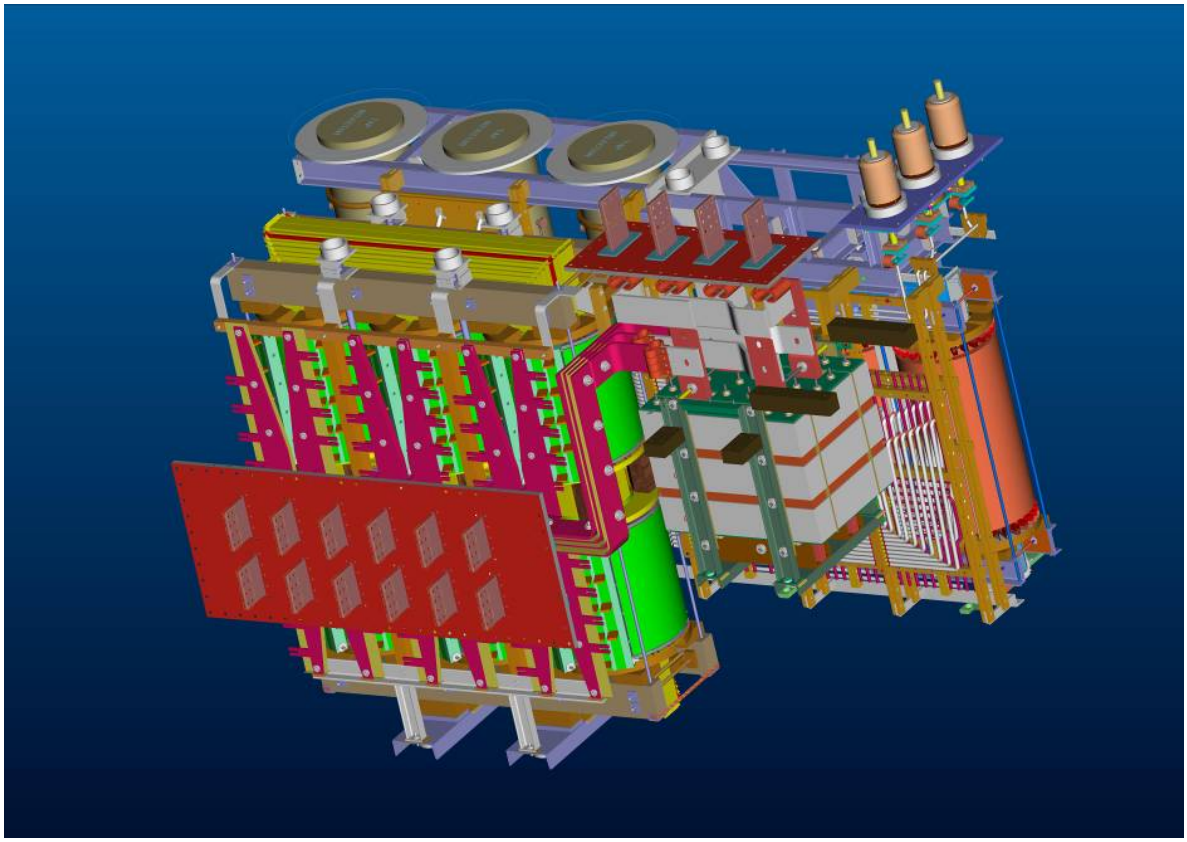
Prekidanjem procesa dužim od četiri sata dolazi do velikih šteta na elektrolitskim kupkama; stoga svi elementi postrojenja moraju raditi s apsolutnom pogonskom sigurnošću u cilju besprekidne opskrbe istosmjernom strujom.

Radi ekonomičnosti procesa elektrolize, opskrba postrojenja električnom energijom mora biti povoljna, no na ekonomičnost ne utječe samo cijena energije već i energetski gubici. Zato se za ovakva postrojenja koriste energetski transformatori malih gubitaka, s minimalnim troškovima održavanja, prilagodljivi na promjenjive pogonske uvjete i posebne izvedbe.

Uvjetovano proizvodnim procesom i njihovim pogonom, **IsT**-i podliježu oštrijim uvjetima u pogledu paralelnog rada i čvrstoće na kratki spoj.

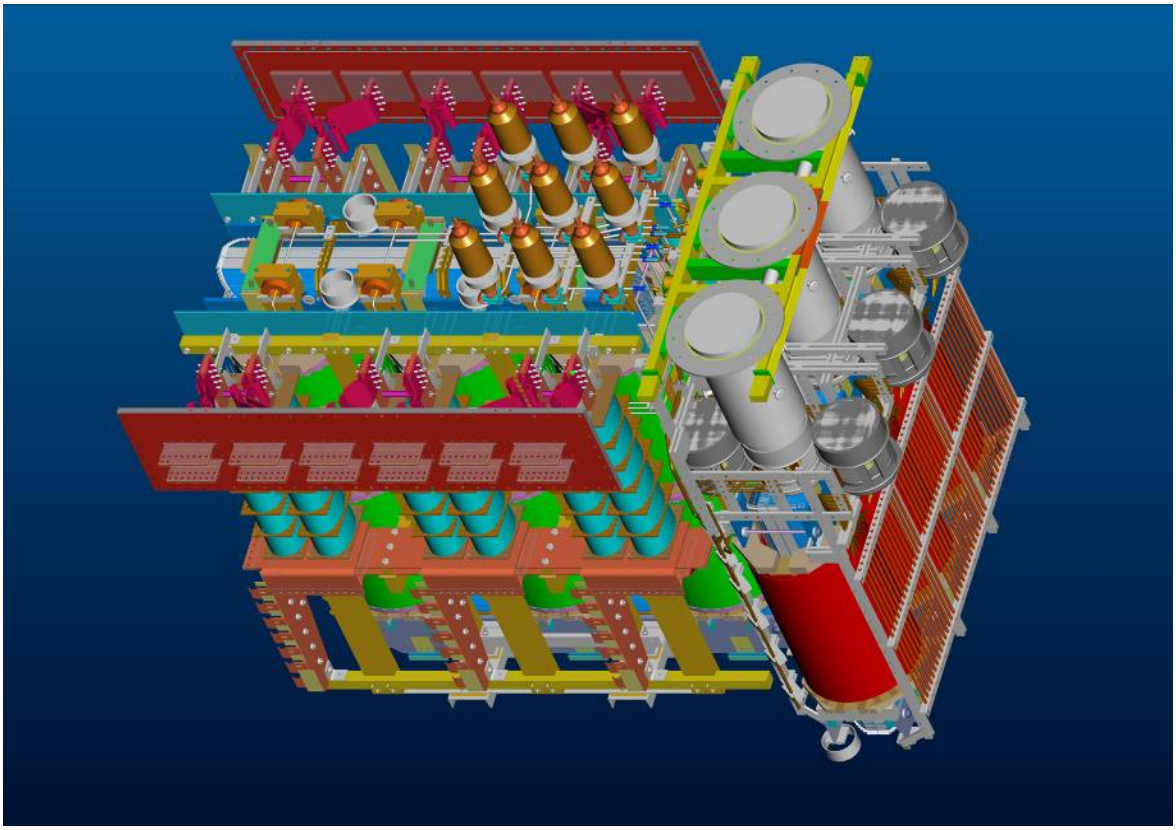
Dvije su osnovne grupe usmjerivačkih spojeva, a izbor ovisi o iskorištenju i vrsti ventila:

- poluvalni spoj - sekundarni namot transformatora (odnosno njegov dio) protjecan je strujom samo u jednom smjeru (poluvalu) (**slika 1-4.**) / **DSS** (spoj sekundarnog namota dvostruke zvijezde s usisnom prigušnicom) M3.2–spoj;



Slika 1-4: Ispravljački transformator **DSS**

- punovalni spoj – sekundarni namot transformatora protjecan je strujom u oba smjera (u oba poluvala) (**slika 1-5.**) / **DB** (mosni spoj) M6–spoj.



Slika 1-5: Ispravljački transformator **DB**

2 PROJEKTNA OSNOVA INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA

2.1 PRORAČUN I OSNOVE (ELEKTRO-MAGNETIZAM)

2.1.1 Način rada transformatora

Princip rada transformatora može se opisati na slijedeći način, energija ulazi u transformator kroz primarni namot te se posredstvom magnetskog toka u jezgri seli u sekundarni namot s iznosom struje i napona različitim od primarnog (**slika 2-1.**).

Primarni izmjenični napon $u_1(t)$ proizvodi pomoću zakona indukcije (Faradayev) magnetski tok sinusnog oblika u namotu primara:

$$u_1 = N_1 \times \frac{d\phi}{dt} \tag{1}$$

koji u namotu sekundara inducira napon $u_2(t)$:

$$u_2 = N_2 \times \frac{d\phi}{dt} \tag{2}$$

U idealnom dvonamotnom transformatoru sa željeznom jezgrom i magnetski ulančanim namotima bez gubitaka u jezgri, omjer transformacije praktički je jednak broju zavoja njegovih namota:

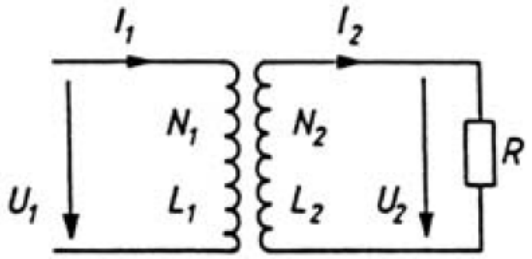
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = u \tag{3}$$

pri čemu je prividna snaga primara i sekundara ista:

$$S_1 = U_1 \times I_1 = S_2 = U_2 \times I_2 \tag{4}$$

iz čega se dobija da je odnos struja obrnuto proporcionalan prijenosnom omjeru:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{u} \tag{5}$$



Slika 2-1: Idealni transformator

Kod realnog transformatora potrebno je uzeti u obzir gubitke u željeznoj jezgri, namotima, te dodatne gubitke u priključcima i metalnim dijelovima transformatora.

Uslijed tih dodatnih faktora mijenja se i iznos struja u odnosu na idealni transformator. O vrijednosti napona kratkog spoja ovisi i impedancija transformatora, koja se dodatno zbraja na impedanciju postrojenja u kojem se nalazi transformator.

Uz pomoć Faradayevog zakona i izraza za magnetsku indukciju dobiven je izraz:

$$U = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times f \times w \times B \times A_{\mathrm{Fe}} \times 10^{-4} \tag{6}$$

iz kojeg se po zakonu sličnosti transformatora može dobiti izraz za početni napon po zavoju koji je potreban kao početna vrijednost u traženju projektnog rješenja:

$$A_{\mathrm{Fe}} = C_{\mathrm{Fe}} \times \sqrt{\frac{S_{\mathrm{N}}}{n_{\mathrm{J}} \times f}} \times 10^{3} \tag{7}$$

pri čemu su:

U	[V]	…inducirani napon
f	[Hz]	…frekvencija **[50 Hz]**
w	[-]	…broj zavoja
B	[T]	…magnetska indukcija **[1,7 T]**
A_{Fe}	[cm^2]	…presjek jezgre aktivnog dijela
C_{Fe}	[cm^2 (V A s)$^{1/2}$]	…konstanta jezgre za optimalni omjer masa željeza i bakra (između 4 i 6) **[4,4]** za odabranu mag. indukciju od 1,7 T
S_{N}	[MVA]	…nazivna snaga
n_{J}	[-]	…vrsta jezgre $n_{\mathrm{J}} = 1$ za jednofaznu jezgru ogrnutog tipa $n_{\mathrm{J}} = 2$ za jednofaznu jezgru jezgrastog tipa **$n_{\mathrm{J}} = 3$ za trofaznu jezgru**

Uvrštanjem izraza (7) u (6):

$$\frac{U}{w} = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times f \times B \times C_{\mathrm{Fe}} \times \sqrt{\frac{1}{n_{\mathrm{J}} \times f}} \times \sqrt{S_{\mathrm{N}}} \times 10^{-4} \times 10^{3} \tag{8}$$

za odabrane iskustvene vrijednosti dobiven je izraz za napon po zavoju:

$$\frac{U}{w} = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times 50 \times 1{,}7 \times 4{,}4 \times \sqrt{\frac{1}{3 \times 50}} \times \sqrt{S_{\mathrm{N}}} \times 10^{-4} \times 10^{3}$$

$$\frac{U}{w} = 13{,}5 \times \sqrt{S_{\mathrm{N}}} \tag{9}$$

Kako se vidi prema odabranim vrijednostima, ovaj je izraz namijenjen za energetske transformatore trofaznog jezgrastog tipa uz magnetsku indukciju koja dozvoljava preopterećenja aktivnog dijela iznad njegove nazivne snage za isnos od 10% [6].

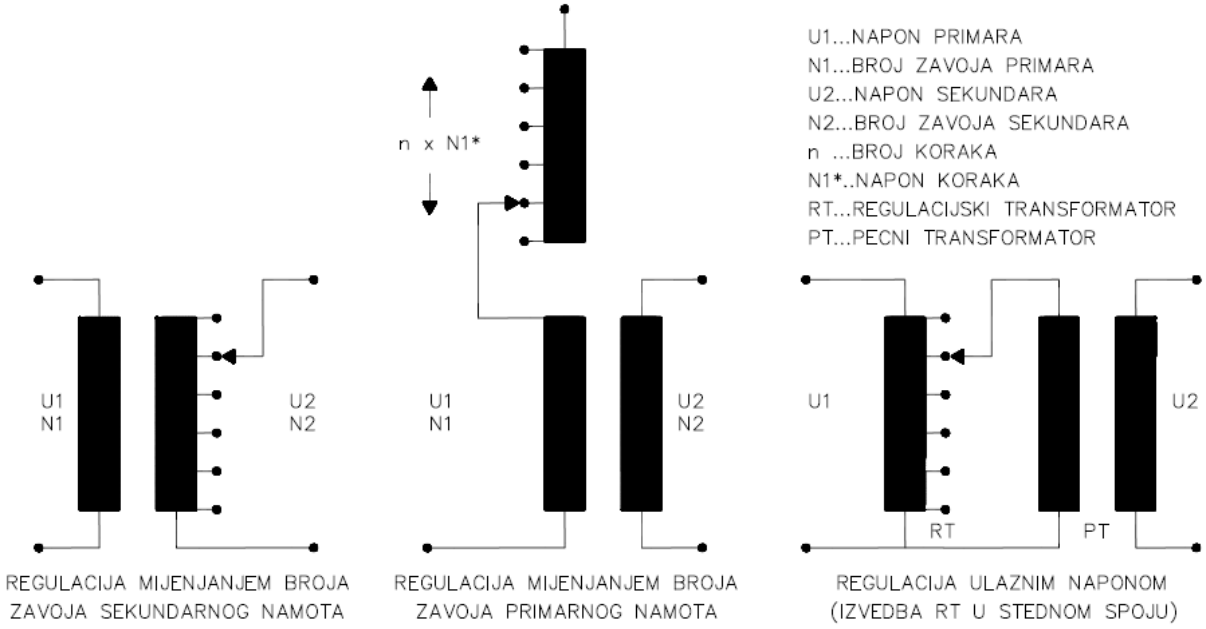
2.1.2 Pećni transformatori (osnove)

Energetski transformatori koji se koriste u postrojenjima za elektrolučne peći moraju zadovoljiti ove dodatne zahtjeve, na koje je potrebno obratiti pažnju prilikom izrade projektnog rješenja:

- svladavanje visokih struja na sekundarnoj strani do 100 kA,
- kombinacija niskih napona od 200 do 1400 V na sekundarnoj strani (pećna strana) i visokih napona na primarnoj strani do 220 kV (mrežna strana),
- regulacija napona na sekundarnoj strani pod teretom,
- podijeljena regulacija pojedinih faza s ciljem svladavanja asimetrija koje se javljaju u pojedinim fazama procesa,
- nazivne snage transformatora do 160 MVA,
- konstrukcija koja je otporna na pojavu sila kratkog spoja koje se javljaju u proizvodnom procesu peći,
- jednaka indukcija između triju faza (neovisna regulacija napona pojedinih elektroda),
- svladavanje neželjenih povratnih utjecaja na mrežu (pulzacija, pojava viših harmonika, asimetrije promjene naponske razine i utjecaj na faktor snage, pojava jalove snage).

Odlučujući kriterij za projektiranje pećnih transformatora je vrsta i način regulacije napona na sekundarnoj strani. Napon sekundara pećnog transformatora može se regulirati na slijedeće načine (**slika 2-2.**):

- **mijenjanjem broja zavoja sekundarnog namota**, pri čemu je moguća promjena napona od nule do nazivnog napona uz konstantni magnetski tok. Ovaj način regulacije možemo primijeniti kod transformatora sa snagom do 1000 kVA i strujom do 1000 A. Porastom snage javljaju se mnogobrojni konstrukcijski problemi (svladavanje sila kratkog spoja, izvedba regulacijskog namota, izvedba i izrada izvoda, izrada odgovarajuće regulacijske sklopke);
- **mijenjanjem broja zavoja na primaru (direktna regulacija)**: kako je ulazni napon na stezaljkama transformatora konstantan (mrežna strana), promjenom broja zavoja mijenja se magnetski tok, odnosno indukcija u željeznoj jezgri.
  Kod većeg područja regulacije (1:1,5//2) regulacijski namot će imati velik broj zavoja. Pri ovoj vrsti regulacije napon se regulira u nejednakim koracima pa se regulacijski namot mora grupirati s različitim brojem zavoja po koraku, što utječe na kompliciranost i neekonomičnost u izradi viševojnog slojnog regulacijskog namota. Pri terećenju transformatora na maksimalni iznos sekundara, induciraju se visoki naponi u neprotjecanom dijelu regulacijskog namota, stoga je te slučajeve potrebno posebno obraditi i neprotjecani dio regulacijskog namota dodatno zaštititi posebnim zaštitnim prigušnim RC-elementima koji se spajaju između dva (ili više) kritična koraka regulacije;
- **ulaznim naponom**: ovaj se način regulacije koristi ukoliko je zahtijevana regulacija napona od nule do određene nazivne vrijednosti. Za izvedbu ovakove regulacije nužno je imati dva aktivna dijela, pri čemu je regulacijski transformator najčešće na primaru neposredno priključen na mrežu, dok mu je sekundar pomoću međunapona (do 30 kV) spojen s primarom pećnog transformatora. Regulacijski transformator se najčešće izvodi u štednom spoju s konstantnim prijenosnim omjerom, pri čemu je njegova tipska snaga i napon kratkog spoja mali. Budući da kvarove u međukrugu možemo minimizirati (kvalitetom u procesu izrade priključaka), regulacijski transformator nije potrebno predimenzionirati ili preći na izvedbu punog regulacijskog transformatora koji je otporniji na kratki spoj od izvedbe u štednom spoju.



Slika 2-2: Vrste regulacije pećnih transformatora

Usporedbom navedenih vrsta regulacije i uz poznavanje činjenice da je snaga pećnog transformatora u pravilu veća od potrebne nazivne snage (op.a pogona elektrolučne peći), može se zaključiti da je direktna regulacija najjednostavnija, a time i najekonomičnija, jer je za njenu izvedbu potreban samo jedan aktivni dio. Regulacija ulaznim naponom zahtijeva dva aktivna dijela, što znatno poskupljuje i komplicira izvedbu.

Za optimiranje pećnog postrojenja potrebno je u procesu projektiranja pravilno odrediti impedanciju svih elemenata postrojenja, pri čemu je izrada i konačna ocjena modela moguća tek u radu postrojenja. Stoga je u procesu projektiranja ovih transformatora potrebno zadržati vrijednosti za izradu kružnog dijagrama pećnog postrojenja u dozvoljenim granicama određenim internacionalnim standardima ili posebnim željama kupca. Za izračun reaktancije pećnog transformatora potrebne su vrijednosti napona za pojedine korake (sekundarne strane prema peći), nazivna snaga transformatora i napon kratkog spoja transformatora.

Pri podešavanju impedancije pećnih postrojenja koriste se prigušnice koje su, ovisno o veličini postrojenja, ugrađene u zajednički kotao s pećnim transformatorom ili odvojeno. Impedancija prigušnica može se podešavati u beznaponskom stanju (premještač) ili pod teretom (regulacijska sklopka) ovisno o želji kupca. Izvedba prigušnica se ne razlikuje od onih kod mrežnih transformatora, pri čemu se prigušnice ugrađuju u krug tercijarnog namota radi dobivanja željene reaktancije.

2.1.2.1 Proračun pećnog transformatora (Električni dio)

Tijek proračuna može se podijeliti u nekoliko osnovnih faza:

- traženje početnog rješenja (osnutak),
- početni proračun komponenata aktivnog dijela,
- model aktivnog dijela,
- optimiranje komponenti aktivnog dijela,
- kontrola proračuna i izrada konačne tehničke dokumentacije aktivnog dijela.

2.1.2.2 Izrada početnog rješenja (osnivanje)

U ovoj fazi potrebno je odrediti osnovne parametre aktivnog dijela pećnog transformatora korištenjem postojećih projektnih rješenja u cilju ispunjenja zadanih parametara pećnog postrojenja. Ukoliko takvih rješenja nema, potrebno je prilikom izrade novog projektnog rješenja obratiti pažnju na slijedeće:

- nužni ulazni parametri (grupa spoja, nazivna snaga [MVA], napon mreže [kV], nazivni prijenosni omjer primar / sekundar [kV], napon kratkog spoja [%], vrsta rashladnog sustava, frekvencija [Hz], gubici praznog hoda [kW], gubici tereta [kW], dozvoljena zagrijanja ulja / namota [K]),
- način regulacije i izvedba aktivnog dijela (**slika 2-2.)** bira se prema nazivnom prijenosnom omjeru, pri čemu se za sada potrebno ograničiti samo na regulaciju mijenjanjem broja zavoja primarnog namota,
- ispitivanje pećnog transformatora (tipska i posebna ispitivanja ovisno o zahtjevu kupca).

Početnu vrijednost napona po zavoju izračunavamo korištenjem formule (9).

Omjer stvarnog napona sekundara i fiktivne vrijednosti napona po zavoju određuje broj zavoja sekundara. Broj zavoja sekundara mora biti cijeli broj ≥ 4 kako bi namoti mogli biti napravljeni od profilnog ili transponiranog vodiča, pri čemu radijalni izvodi iz sekundarnog namota moraju biti mehanički stabilizirani radi pojave radijalnih komponenata sila kratkog spoja.

Za slučajeve s jednim ili dva zavoja sekundara mora se koristiti izvedba namota od masivnih bakrenih prstenova ili cilindara (koja je ekonomski vrlo upitna, ali tehnički u potpunosti opravdana i izvediva).

Određivanje stvarnog napona po zavoju proizlazi iz omjera nazivnog napona sekundara i cjelobrojnog broja zavoja sekundara.

Na osnovi zahtjeva pećnog postrojenja određuju se za pojedina radna opterećenja peći struje sekundara uz za to pripadajuće napone, pri čemu nazivna snaga transformatora može biti konstantna ili promjenjiva (struja peći ostaje konstantna). Nakon određivanja struja sekundara s pripadajućim naponima, može se odrediti broja zavoja i napona koraka regulacije prema formulama (1) do (5).

Izračunate vrijednosti za pojedine radne položaje pećnog transformatora prikazuju se tablično radi korekcije u procesu optimiranja aktivnog dijela transformatora.

Nužne vrijednosti za tablični prikaz napona pećnog transformatora su slijedeće (**tablica 2-1.**):

i	[-]	…položaj regulacije,
ΔU_S	[V] r	…napon između dva susjedna koraka napona sekundara (računska vrijednost),
U_{Si}	[V] r	…napon sekundara za svaki položaj regulacije (računska vrijednost),
w_{ZS}	[-]	…broj zavoja namota sekundara,
U_{Si} / w_{ZS}	[V] r	…napon po zavoju sekundara za svaki položaj regulacije,
U_P	[kV]	…napon primara,
w_{ZPN}	[-] r	…ukupni broj zavoja namota primara svakog položaj (računska vrijednost),
w_{ZPN}	[-] s	…ukupni broj zavoja namota primara svakog položaj (stvarna vrijednost),
U_{Si} / w_{ZS}	[V] s	…napon po zavoju sekundara za svaki položaj regulacije (stvarna vrijednost),
Δw_{ZP}	[-]	…broj zavoja između dva položaj primara (stvarna vrijednost),
U_{Si}	[V] s	…napon sekundara svakog položaj regulacije (stvarna vrijednost),

ΔU_S [V] s …napon između dva susjedna koraka napon sekundara (stvarna vrijednost),

ΔU_{Si} [V] …razlika između računske i stvarne vrijednost za svaki položaj sekundara.

Broj zavoja transformatora												
i [-]	ΔU_S [V] r	U_{Si} [V] r	w_{ZS} [-]	U_{Si} / w_{ZS} [V] r	U_P [V]	w_{ZPN} [-] r	w_{ZPN} [-] s	U_{Si} / w_{ZS} [V] s	Δw_{ZP} [-]	U_{Si} [V] s	ΔU_{Si} [V]	ΔU_S [V] s

Tablica 2-1: Tablični prikaz napona pećnog transformatora

Nužne vrijednosti za tablični prikaz struja pećnog transformatora su slijedeće (**tablica 2-2.**):

I_{NP} [kA] …nazivna struja svakog položaja primara,

I_{FP} [kA] …fazna struja svakog položaja primara,

I_{NS} [kA] …nazivna struja svakog položaja sekundara,

I_{FS} [kA] …fazna struja svakog položaja sekundara,

S_{Ni} [MVA] …nazivna snaga svakog položaja,

S_{Ni} [%] …nazivna snaga svakog položaja u postotcima.

Struje transformatora						
i [-]	I_{NP} [A]	I_{FP} [A]	I_{NS} [A]	I_{FS} [A]	S_{Ni} [MVA]	S_{Ni} [%]

Tablica 2-2: Tablični prikaz struja pećnog transformatora

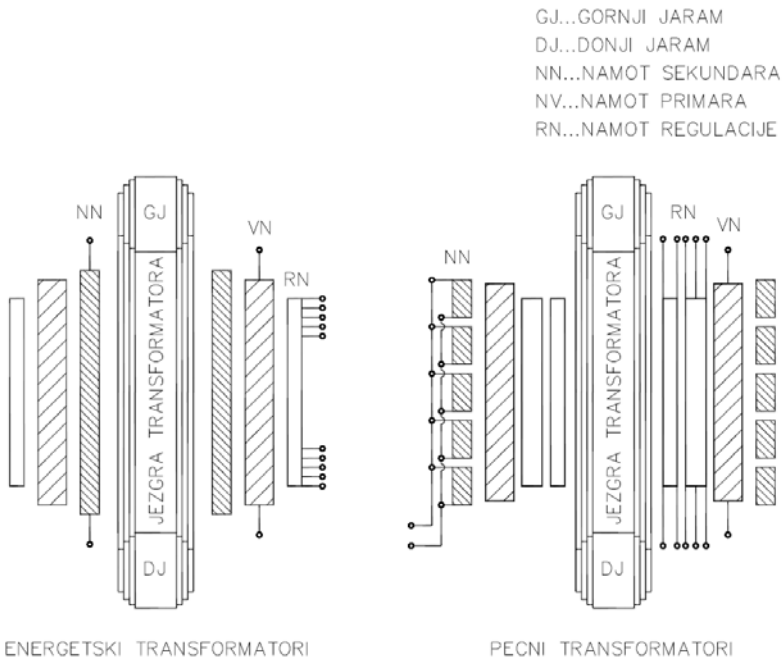
Tablice je moguće izraditi u nekom od tabličnih programa (npr. Excel). Za regulacije ulaznim naponom potrebno je tablicu proširiti za međukrug između dva aktivna dijela.

2.1.2.3 Proračun komponenata aktivnog dijela

Korištenjem stručne literature, propisa, uputa za projektiranje, postojeće tablice napona i programa za optimiranje aktivnog dijela moguće je izračunati osnovne dimenzije svih dijelova aktivnog dijela transformatora.

Ovdje se navode potrebni koraci u procesu proračuna komponenata aktivnog dijela, obuhvaćeni programom za optimiranje aktivnog dijela transformatora:

- Određivanje presjeka i vrste izvedbe jezgre,
- Određivanje rasporeda namota (**slika 2-3.**),
- Određivanje izolacije ovisno o naponu pojedinih namota,
- Određivanje vrste i dimenzija namota (sekundara, primara i regulacije).



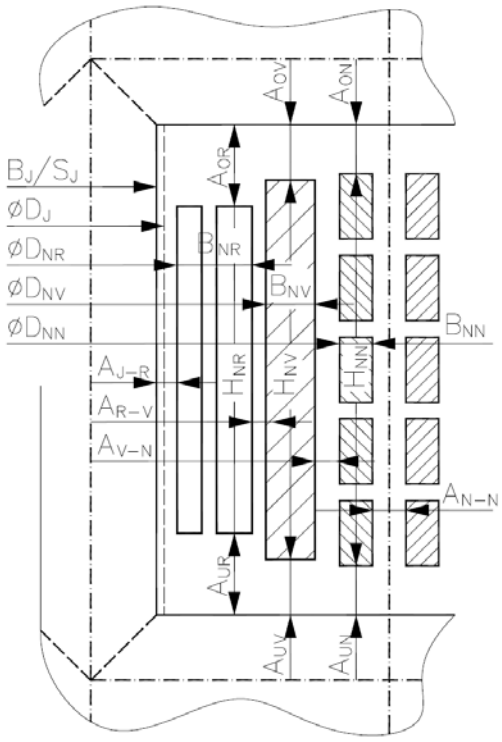
Slika 2-3: Raspored namota pećnih transformatora

Nakon izračunatih početnih vrijednosti za sve tri osnovne komponente aktivnog dijela, iteracijskim postupkom se traži optimum aktivnog dijela. Ovom dijelu proračuna (postupak optimiranja) posvećuje se posebna pažnja. Naime iz ekonomskih razloga omjer cijene aktivnog dijela (pećni transformatori do 50 MVA, s jednim aktivnim dijelom) i konačne cijene gotovog transformatora (bez transportnih troškova) je oko 1:2,5.

U nastavku će se vidjeti da je optimiranje aktivnog dijela početni preduvjet za izradu optimalnog rješenja industrijskih transformatora i kao takva nezaobilazna karika u procesu optimiranja.

2.1.2.4 Model aktivnog dijela

Za izradu modela aktivnog dijela nužne su nam slijedeće početne ulazne vrijednosti (**slika 2-4.**):



Popis i objašnjenje oznaka:

A_{OV} [mm] …udaljenost primara od gornjeg jarma,
A_{ON} [mm] …udaljenost sekundara od gornjeg jarma,
A_{UR} [mm] …udaljenost regulacije od donjeg jarma,
A_{UV} [mm] …udaljenost primara od donjeg jarma,
A_{UN} [mm] …udaljenost sekundara od donjeg jarma,
$A_{J\text{-}R}$ [mm] …udaljenost jezgra - namot regulacije (u prozoru),
$A_{R\text{-}V}$ [mm] …udaljenost namot reg. - namot primara (u prozoru),
$A_{V\text{-}N}$ [mm] …udaljenost namot prim. - namot sek. (u prozoru),
$A_{N\text{-}N}$ [mm] …udaljenost namota dviju faza,
A_{OR} [mm] …udaljenost regulacije od gornjeg jarma,
D_J [mm] …promjer jezgre,
B_J [mm] …visina najvećeg paketa,
S_J [mm] …najveća širina jezgre (u smjeru osi y),
D_{NR} [mm] …unutarnji promjer namota regulacije,
D_{NV} [mm] …unutarnji promjer namota primara,
D_{NN} [mm] …unutarnji promjer namota sekundara,
H_{NR} [mm] …visina namota regulacije,
H_{NV} [mm] …visina namota primara,
H_{NN} [mm] …visina namota sekundara,
B_{NR} [mm] …širina namota regulacije,
B_{NV} [mm] …širina namota primara,
B_{NN} [mm] …širina namota sekundara.

Slika 2-4: Prozor jezgre pećnog transformatora

Na osnovi ovih vrijednosti i njihovih izvedenica moguće je izraditi početni model aktivnog dijela.

Model aktivnog dijela podliježe minimalnim promjenama, a one su uzrokovane procesom optimiranja pojedinih komponenata. Konstrukcijski i tehnološki razlozi su glavni razlozi navedenih promjena i odstupanja.

Izračunati model aktivnog dijela uspoređuje se s proizvedenim aktivnim dijelom koji izlazi iz ispitne stanice. Usporedba mjerenih i izračunatih vrijednosti služe za kontinuirano praćenje i poboljšavanje programa za optimiranje, izračunavanje i izradu aktivnog dijela. Ovako je omogućeno praćenje procesa od početka do kraja u cilju otkrivanja grešaka u pojedinim fazama.

Ovim pristupom se govori o globalnom, a ne parcijalnom optimiranju u izradi modela aktivnog dijela.

2.1.2.5 Optimiranje aktivnog dijela

Aktivni dio transformatora se u praksi računa pomoću programa za optimiranje koji se sastoji od više međusobno povezanih modula. Ovaj program omogućuju praćenje promjena svih komponenata aktivnog dijela uz potrebna ograničenja i komentare za projektanta (vrednovanje rješenja).

Proces optimiranja aktivnog dijela moguće je napraviti i bez primjene programa za optimiranje, no u tom slučaju se od projektanta zahtijeva besprijekorno poznavanje fizičke slike transformatora.

Proračun transformatora bez primjene programa za optimiranje preporuča se mladim projektantima kako bi na osnovi velikog broja pokušaja i usklađivanja pojedinih elemenata aktivnog dijela naučili i usvojili njegovu fizikalnu sliku.

Opis procesa optimiranja aktivnog dijela bez računala (podsjetnik pri optimiranju):

1. Dimenzije jezgre transformatora
   - određivanje potrebnog presjeka jezgre (iz napona po zavoju U / w),
   - geometrija jezgre (određuje se zajedno s izolacijom i dimenzijama namota),
   - proračun zagrijanja jezgre.
2. Dimenzioniranje namota sekundara / primara / regulacije
   - određivanje struja namota,
   - broj zavoja namota,
   - određivanje presjeka vodiča namota,
   - određivanje izvedbe i dimenzija vodiča,
   - određivanje širine i debljine namota (vrsta namota),
   - određivanje sirove i stvarne visine namota,
   - cijena izrade namota.
3. Proračuni gubitaka
   - gubici i struje praznog hoda (gubici u željezu jezgre),
   - gubici kratkog spoja (gubici u bakru),
   - dodatni gubici računaju se prema slijedećoj empirijskoj formuli:

$$\Delta P_{\mathrm{K}} = C_{\mathrm{PK}} \times \frac{S_{\mathrm{N}i} \times U_{\mathrm{KST}}}{U_{\mathrm{S}i}^2} \tag{10}$$

pri čemu su:

C_{PK}	[-]	…(0,5-1,0 konstanta ovisna o grupi spoja i izvedbi priključaka sekundara,
ΔP_{K}	[kW]	…gubici kratkog spoja,
$S_{\mathrm{N}i}$	[kVA]	…nazivna snaga svakog položaja regulacije,
U_{KST}	[V]	…konstantni napon sekundara (pri konstantnoj snazi),
$U_{\mathrm{S}i}$	[V]	…napon sekundara svakog položaj regulacije.

4. Proračun napona kratkog spoja, sila i naprezanja u kratkom spoju
   - napon kratkog spoja transformatora potrebno je uvećati za iznos prema empirijskoj formuli (dodatka za izvedbu masivnih priključaka sekundarne strane),

$$\Delta U_{\mathrm{K}} = C_{\mathrm{UK}} \frac{S_{\mathrm{N}i}}{U_{\mathrm{S}i}^2} [\%] \qquad (11)$$

pri čemu je:

C_{UK} [-] …(7-10) konstanta ovisna o grupi spoja i izvedbi priključaka sekundara.

5. Proračun prenapona pri ispitivanju.
6. Proračun zagrijanja i potrebnog rashladnog sustava.
7. Proračun preopterećenja.
8. Proračun buke (za ovu vrstu transformatora nema bitnog značaja).

2.1.2.6 Kontrola proračuna

Nakon izrađene tehničke dokumentacije, sa svim ulaznim i izlaznim parametrima aktivnog dijela, pristupa se kontroli proračuna bez korištenja programa za optimiranje. Ova kontrola se provodi ručno ili korištenjem parcijalnih modula za optimiranje elemenata aktivnog dijela. Preporuka je da se kontrolira redoslijed i ispravnost proračuna, a ne proces optimiranja.

Nakon kontrole proračuna izrađuje se tablica napona i struja za pojedine položaje regulacije pećnog transformatora (**tablica 2-1.** i **tablica 2-2.**). Tablice s konačnim vrijednostima potrebno je poslati na odobrenje kupcu tj. projektantu pećnog postrojenja.

Projektant pećnog postrojenja će na osnovi tablice napona pećnog transformatora izraditi stvarni kružni dijagram peći, pri čemu će posebnu pažnju obratiti na faktor snage ($\cos\varphi \sim 0{,}72$) u cilju najbolje iskoristivosti peći. Za kapitalizaciju i optimiranje troškova pećnog postrojenja potrebno je obratiti pažnju i na više harmonike koji se javljaju u različitim fazama rada peći.

Djelomičnu kompenzaciju tj. poboljšanje faktora snage moguće je postići ugradnjom prigušnice ili filtara. Položaj prigušnice ili filtara ovisi o grupi spoja, vrsti regulacije i njezinoj izvedbi.

2.1.3 Ispravljački transformator (osnove)

Kako je već navedeno, ispravljački transformatori se koriste u pogonima i uređajima istosmjerne struje za elektrolizu te zajedno s ispravljačkim sklopovima čine vezu između izmjenične i istosmjerne struje. U načelu se IsT-i po svojoj zadaći ne razlikuju od energetskih transformatora, no kao i kod pećnih transformatora na njih se dodatno postavljaju mnogostruki zahtjevi.

Ispravljački transformator ima zadatak transformirati napon priključne visokonaponske mreže u potreban napon ventilske ispravljačke strane. Ovdje se razmatraju transformatori za opskrbu ispravljačkih pogona za elektrolizu koji iziskuju struje do 200 kA.

Ispravljački uređaji se napajaju energijom iz trofazne mreže i to putem trofaznih spojeva. U osnovama elektrotehnike navedene su dvije osnovne izvedbe priključaka primarnog namota transformatora s mrežom trokut ili zvijezda, dok se sekundarni namot transformatora prema potrošaču može spojiti u trokut, zvijezdu ili cik-cak [5, 6].

Kod energetskih transformatora u praznom hodu vrijedi prijenosni omjer opisan formulama (3) do (5), dok kod ispravljačkih transformatora taj omjer ne mora biti ispunjen:

$$S_1 = U_1 \times I_1 \neq S_2 = U_2 \times I_2 \tag{12}$$

Osnovni preduvjet za izradu ispravljačkog transformatora je poznavanje vrste spoja ispravljačke grupe.

2.1.3.1 Spojevi ispravljačkih transformatora

Kod ispravljačkih transformatora velikih snaga govori se o dvije osnovne ispravljačke grupe spoja:

- poluvalni spoj,
- punovalni spoj.

Tipični predstavnik poluvalne grupe je spoj sekundara dvostruke zvijezde s usisnom prigušnicom koji se označava kao **DSS** (M3.2–spoj), dok je predstavnik punovalne grupe mosni spoj s oznakom **DB** (M6–spoj). Vrijednosti za dimenzioniranje IsT-a dane su u obliku tablica i proračuna koje se mogu naći u stručnoj literaturi o ispravljačkim postrojenjima [8, 10, 13].

U ovom dijelu navedeni su potrebni izrazi (formule) i odnosi među pojedinim veličinama između ispravljačkog postrojenja i transformatora, radi boljeg razumijevanja fizičke kompleksnosti samog postrojenja [14]. Nazivne struje primara i sekundara određuju se pod pretpostavkom teoretske efektivne vrijednosti uz potpunu „izglađenu“ istosmjernu struju I_{dN}, pri čemu se zanemaruju induktivni padovi napona (pravokutni tijek).

Osnovne vrijednosti istosmjernog postrojenja su:

U_{di} [V] …idealni ispravljeni napon,

I_{dN} [A] …istosmjerna struja,

S_{di} [VA] …istosmjerna snaga ispravljača.

Njihov odnos je:

$$S_{di} = U_{di} \times I_{dN} \tag{13}$$

Izrazi i vrijednosti ovisni o ispravljačkoj grupi spoja su:

1. **DSS-spoj (spoj sekundara dvostruke zvijezde s usisnom prigušnicom (spoj zvijezda))**

U_{so} [V] …izmjenični napon faze sekundara transformatora (efektivna vrijednost),

$$U_{so} = \frac{U_{di} \times \pi \times \sqrt{2}}{3 \times \sqrt{3}} = 0{,}855 \times U_{di} \tag{14}$$

I_S[A] …sekundarna struja transformatora,

$$I_S = \frac{I_{dN}}{2 \times \sqrt{3}} = 0{,}289 \times I_{dN} \tag{15}$$

I_P [A] …primarna struja transformatora,

N_1 [-] …broj zavoja primara,

N_2 [-] …broj zavoja sekundara,

$$I_P = \frac{I_{dN}}{\sqrt{6}} \times \frac{N_2}{N_1} \tag{16}$$

S_S [VA] …prividna snaga sekundara,

$$S_S = \frac{S_{di} \times \pi \times \sqrt{2}}{3} = 1{,}48 \times S_{di} \tag{17}$$

S_P [VA] …prividna snaga primara,

$$S_P = \frac{S_{di} \times \pi}{3} = 1{,}05 \times S_{di} \tag{18}$$

S_T [VA] …tipska snaga transformatora,

$$S_T = \frac{S_{di} \times \pi \times (1 + \sqrt{2})}{6} = 1{,}26 \times S_{di} \tag{19}$$

S_{dT} [VA] …prividna nazivna snaga usisne prigušnice,

$$S_{dT} = 0{,}074 \times S_{di} \tag{20}$$

S_{ST} [VA] …ukupna tipska snaga DSS-spoja.

$$S_{ST} = S_T + S_{dT} = 1{,}26 \times S_{di} + 0{,}074 \times S_{di} = 1{,}33 \times S_{di} \tag{21}$$

2. DB-spoj (mosni spoj (spoj trokut))

U_{loD} [V] …izmjenični napon faze sekundara trokut (efektivna vrijednost),

$$U_{\mathrm{loD}} = \frac{U_{\mathrm{di}} \times \pi}{3 \times \sqrt{2}} = 0{,}741 \times U_{\mathrm{di}} \tag{22}$$

I_{S} [A] …sekundarna struja transformatora,

$$I_{\mathrm{S}} = \frac{I_{\mathrm{dN}} \times \sqrt{2}}{3} = 0{,}471 \times I_{\mathrm{dN}} \tag{23}$$

I_{P} [A] …primarna struja transformatora,

N_1 [-] …broj zavoja primara,

N_2 [-] …broj zavoja sekundara,

$$I_{\mathrm{P}} = \frac{I_{\mathrm{dN}} \times \sqrt{2}}{3} \times \frac{N_2}{N_1} \tag{24}$$

S_{S} [VA] …prividna snaga sekundara,

S_{P} [VA] …prividna snaga primara,

S_{T} [VA] …tipna snaga transformatora.

$$S_{\mathrm{S}} = S_{\mathrm{P}} = S_{\mathrm{T}} = \frac{S_{\mathrm{di}} \times \pi}{3} = 1{,}05 \times S_{\mathrm{di}} \tag{25}$$

3. DB-spoj (mosni spoj (spoj zvijezda))

$$U_{\mathrm{loY}} = \frac{U_{\mathrm{di}} \times \pi}{3 \times \sqrt{6}} = 0{,}427 \times U_{\mathrm{di}} \tag{26}$$

$$I_{\mathrm{S}} = \frac{I_{\mathrm{dN}} \times \sqrt{6}}{3} = 0{,}817 \times I_{\mathrm{dN}} \tag{27}$$

$$I_{\mathrm{P}} = \frac{I_{\mathrm{dN}} \times \sqrt{6}}{3} \times \frac{N_2}{N_1} \tag{28}$$

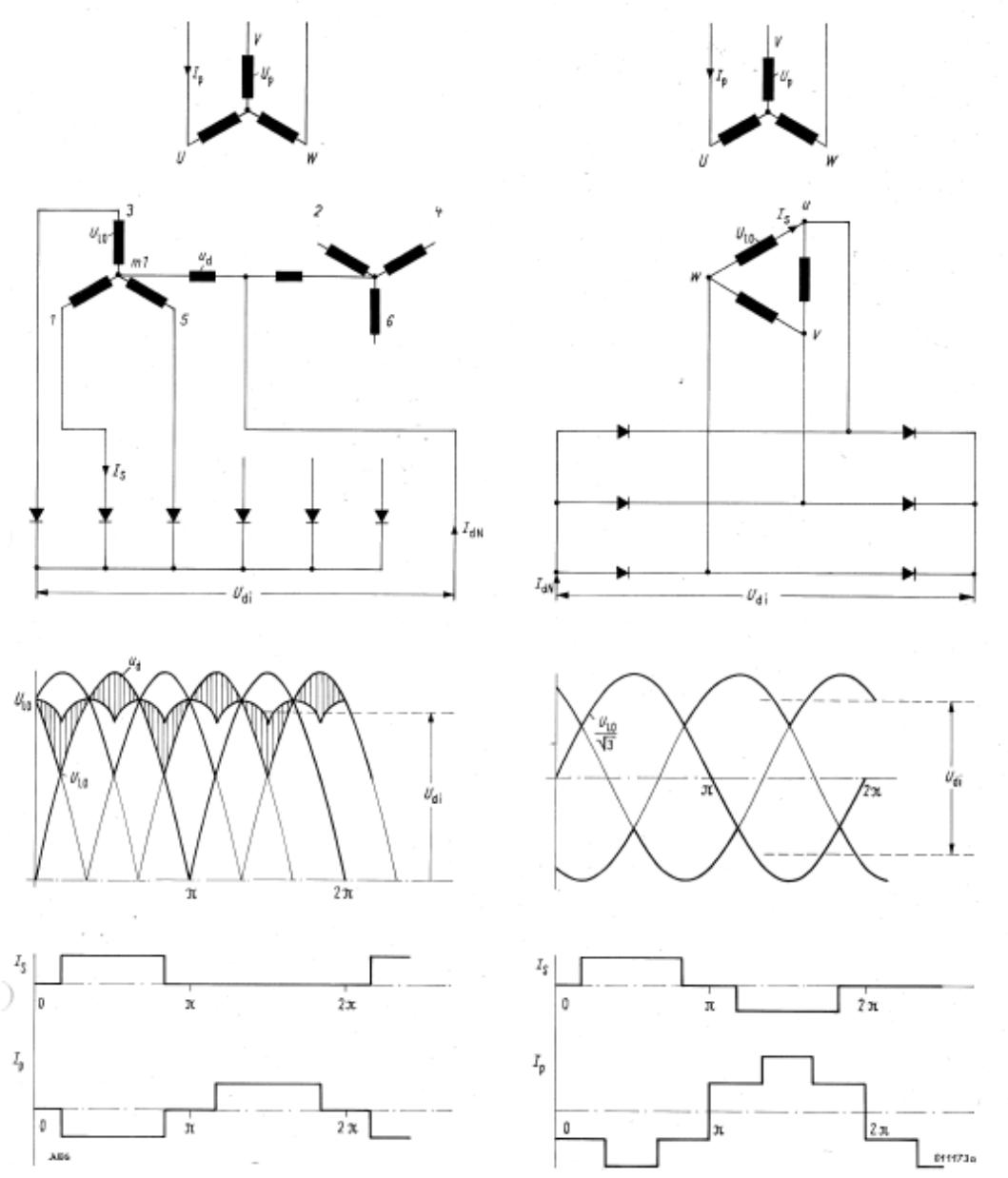
$$S_{\mathrm{S}} = S_{\mathrm{P}} = S_{\mathrm{T}} = \frac{S_{\mathrm{di}} \times \pi}{3} = 1{,}05 \times S_{\mathrm{di}} \tag{29}$$

4. Struja ventila (magnetske prigušnice) u mosnom spoju

$$I_{\mathrm{D}} = \frac{I_{\mathrm{S}}}{\sqrt{2}} \tag{30}$$

U mosnom spoju u svakom ogranku sekundarne struje ugrađenu su dvije transduktorske prigušnice, pri čemu su obje antiparalelno spojene kako bi se izbjeglo predmagnetiziranje jezgre transduktora i time se omogućilo upravljanje transduktorom pomoću istosmjerne struje upravljačkog namota. Sekundarna struja ovisi o vrsti spoja sekundarnog namota (trokut (23) | zvijezda (27)).

Uspoređujući spoj **DSS** i **DB** (**slika 2-5.**) zaključuje se da je, s obzirom na izvedbu ispravljačkog transformatora, spoj **DB** ekonomičniji, jer je njegova tipska snaga oko 27% manja od tipske snage spoja **DSS**.



Slika 2-5: Ispravljački transformatori u poluvalnom **DSS** (lijevo)
i punovalnom **DB** (desno) spoju

2.1.3.2 Broj impulsa i valovitost napona (struje)

Istosmjerni ispravljeni napon kod ispravljačkog transformatora nije konstantna vrijednost. Ispravljeni napon se može rastaviti na osnovnu istosmjernu komponentu i na više sinusnih članova, kojima je frekvencija višekratnik osnovne frekvencije.

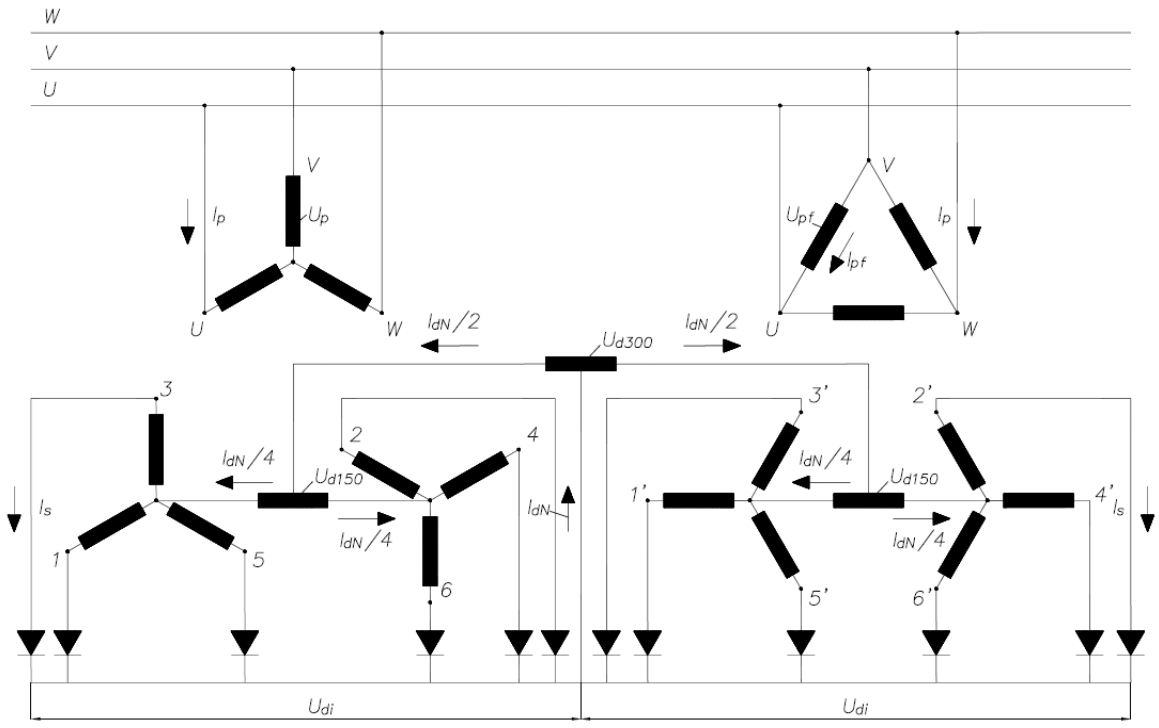
Zbrojem svih sinusnih komponenata dobivenih harmonijskom analizom (Fourier) određena je valovitost napona. Posljedica valovitog napona je valovitost struje koja je dana kao omjer polovine razlike maksimalne i minimalne vrijednosti i srednje vrijednosti pulsirajuće istosmjerne struje. Kako bi valovitost bila što manja, potrebno je povećati broj impulsa tj. broj poluvala napona jedne periode.

Ispravljeni istosmjerni napon predstavlja za mrežu izvor viših harmonika. Potrebno je naglasiti da su amplitude viših harmonika proporcionalne veličini istosmjerne struje, a obrnuto proporcionalne svojim rednim brojevima. Kako bi se smanjili nepoželjni utjecaji viših harmonika na mrežu, potrebno je povećati broj impulsa.

Spojevi ispravljačkih transformatora **DSS** i **DB** su 6-pulsni spojevi. Ukoliko u paralelnom radu zamaknemo dvije ispravljačke grupe (u 6-pulsnom spoju) za pomak faze α=30° dobiva se jedna ispravljačka grupa u 12-pulsnom spoju.

Za spoj dvostruke zvijezde s prigušnicom **DSS** u 12-pulsnom spoju koriste se ove izvedbe:

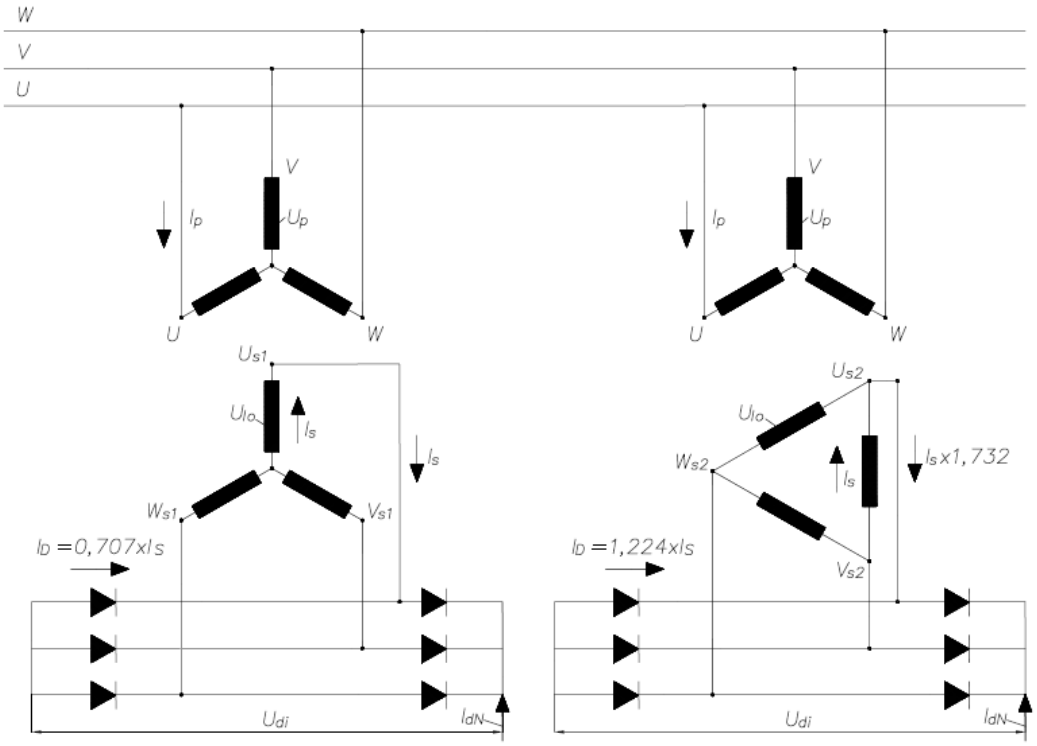
- primarni namot prvog sustava je spojen u zvijezdu, dok je u drugom sustavu spojen u trokut s pomakom faze α=30° (**slika 2-6**.),
- sekundarni namoti oba sustava su spojeni u zvijezdu, pri čemu su namoti primara izvedeni s pomakom faza.



Slika 2-6: Spoj dvostruke zvijezde(sekundar) s usisnom prigušnicom **DSS** (primar Y i D, α=30°)

Za mosni spoj **DB** u 12-pulsnom spoju koriste se ove izvedbe:

- sekundarni namot prvog sustava je spojen u zvijezdu, a drugog u trokut, pri čemu su namoti primara oba sustava spojeni u zvijezdu (**slika 2-7.**),
- sekundarni namoti oba sustava su spojeni u trokut, pri čemu je primarni namot prvog sustava spojen u zvijezdu, a drugog u trokut.



Slika 2-7: DB mosni spoj (sekundar Y i D, α=30°)

Kod 12-pulsnog mosnog spoja gdje je namot sekundara prvog sustava spojen u zvijezdu, a drugog u trokut uočavaju se poteškoće pri odabiru broja zavoja sekundarnih namota koji moraju biti izvedeni u omjeru $1/\sqrt{3}$. Samo nekoliko nižih brojeva zadovoljava ovaj preduvjet, npr. 4 i 7 [9,10,13].

Za dva potpuno jednako građena 6-pulsna aktivna dijela koja imaju kut pomaka faza α=15° moguće je spojem na mrežu UVW, postići fazni pomak za ± 15°, pri čemu se dobija 12-pulsni spoj.

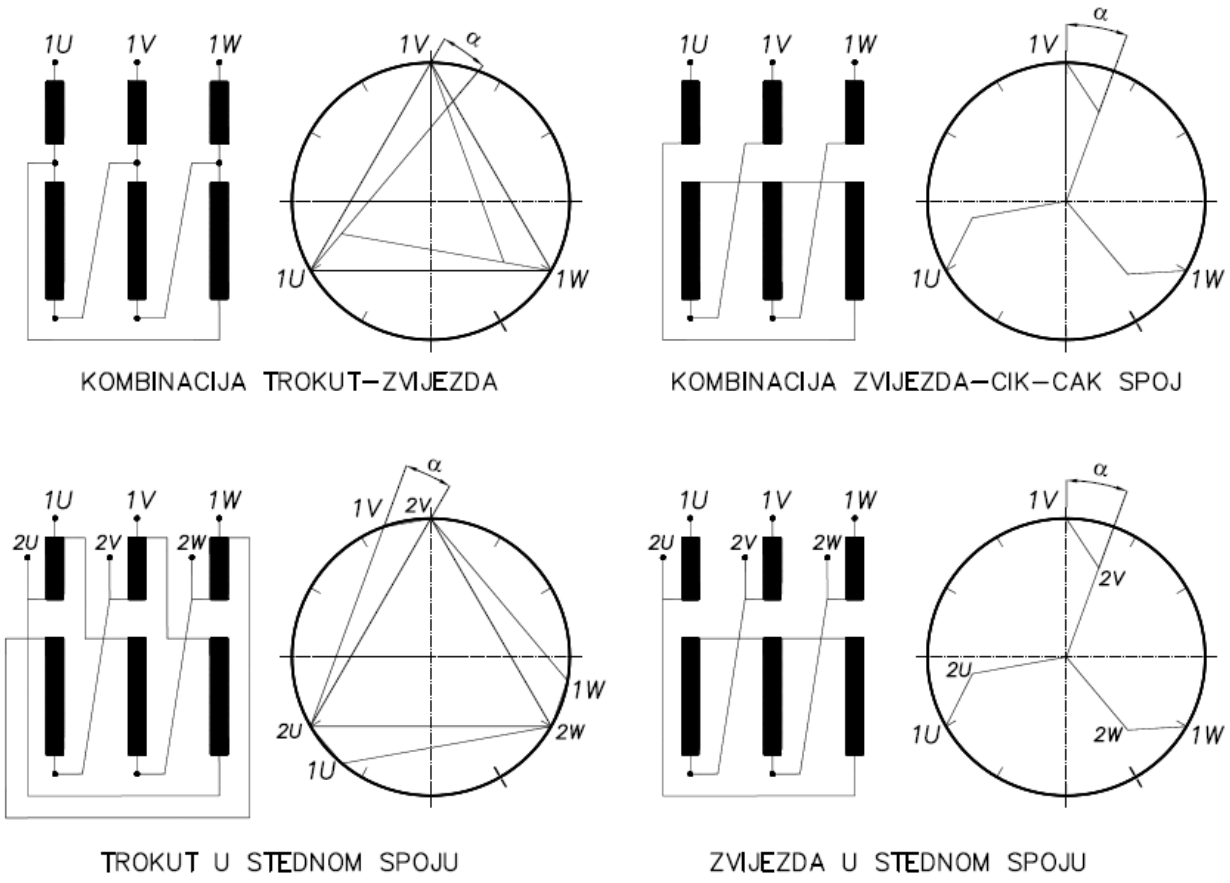
Ukoliko se želi povećati broj pulseva na 24, 36 ili 48, dodatne se grupe moraju zakretati za ±7,5°, ±10° ili ±3,75°. Zakretanje grupa postiže se promjenom kuta pomaka faza na primarnom namotu glavnog transformatora.

Pri direktnoj regulaciji (vidi 2.1.2), primarne strane pomak faza za određeni kut postiže se ovim spojevima:

- (kombinacija) trokut-zvijezda na sekundaru ili na primaru ±15° trokut ili zvijezda,

dok se kod regulacije ulaznim naponom (vidi 2.1.2) primjenjuje izvedba sa zasebnim aktivnim dijelom pri čemu se nameću ovi spojevi:

- trokut u štednom spoju,
- zvijezda u štednom spoju (**slika 2-8.**).



Slika 2-8: Izvedbe spoja s pripadajućim vektorskim dijagramima kod faznog pomaka za kut α

2.1.3.3 Određivanje faznog pomaka za kut *α*

Ukoliko se želi postići fazni pomak za neki kut α, namot primara (ili sekundara) se mora podijeliti u dva dijela. Dio namota faze smješten je jednim dijelom na jednom stupu, dok mu je drugi dio na drugom stupu jezgre. Potrebno je istaknuti da je geometrijska suma protjecanja podijeljenog i nepodijeljenog namota jednaka. Pri tome vrijedi ova jednakost:

$$I_S \times N_S = I_{N1} \times N_{N1} + I_{N2} \times N_{N2} \tag{31}$$

gdje su:

I_S	[A]	…fiktivna struja jedne faze (ili struja nepodijeljenog namota),
N_S	[-]	…fiktivni broj zavoja jedne faze (ili broj zavoja nepodijeljenog namota),
I_{N1}	[A]	…glavna komponenta struje podijeljenog namota,
N_{N1}	[-]	…broj zavoja glavne komponente podijeljenog namota,
I_{N2}	[A]	…pomoćna komponenta struje podijeljenog namota,
N_{N2}	[-]	…broj zavoja pomoćne komponente podijeljenog namota.

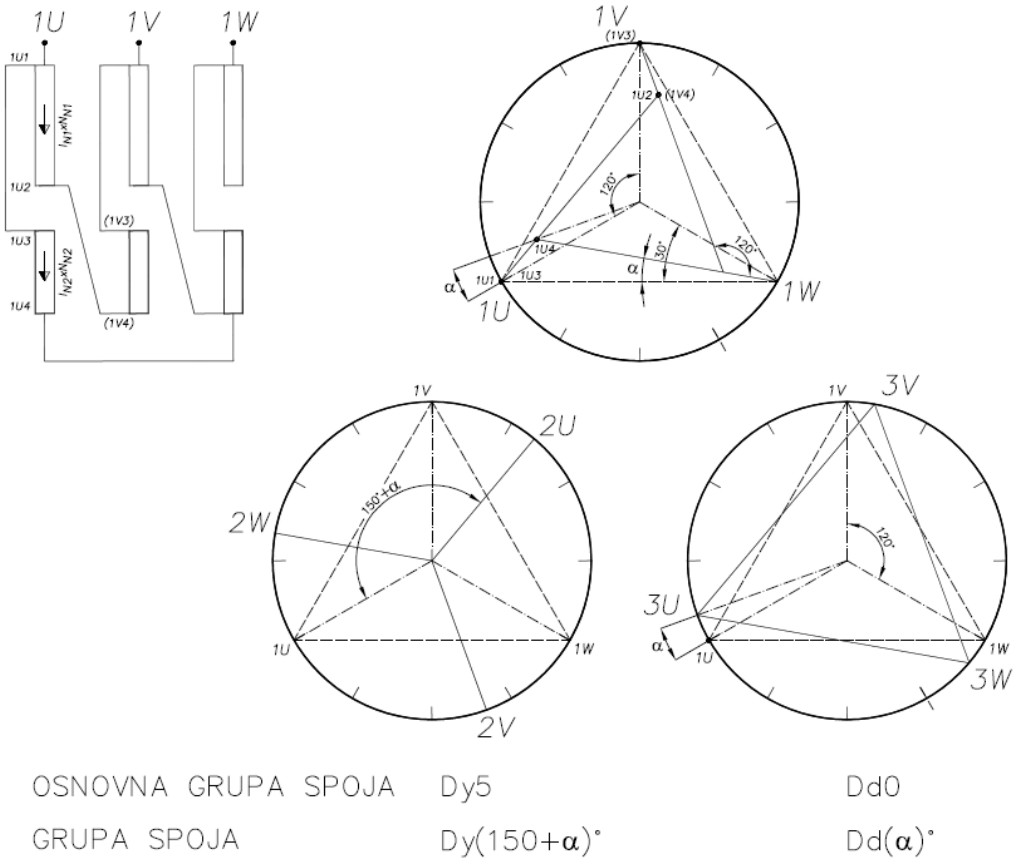
Iznos kuta faznog pomaka može biti pozitivan i negativan:

- $\alpha > 0°$ (fazni pomak je geometrijski pozitivan, ali električki negativan),
- $\alpha < 0°$ (fazni pomak je geometrijski negativan, ali električki pozitivan).

2.1.3.4 Spoj produženi trokut

- fazni pomak (+) (pozitivan $\alpha > 0°$)

  Pozitivan fazni pomak povećava kut grupe spoja, pri čemu napon zaostaje.



Slika 2-9: Produženi trokut kod „pozitivnog“ faznog pomaka za kut α

Na osnovu **slike 2-9.** se izvode sljedeći izrazi:

$$w_{\mathrm{UK}} = \frac{U_{\mathrm{L}}}{U/w} \tag{32}$$

gdje je:

w_{UK} [-] …fiktivni broj zavoja faze (za nepodijeljeni namot) (vektor 1U-1V),

U_{L} [V] …napon primara u nazivnom položaju,

U/w [V] …napon po zavoju,

$$w_{\mathrm{l}} = \frac{U_{\mathrm{L}} \times \sin(60° - \alpha)}{U/w \times \sin 120°} \tag{33}$$

gdje je:

w_1 [-] …ukupni broj zavoja glavnog dijela podijeljenog namota (na stupu faze) (vektori 1U1-1U2 = 1V1-1V2 = 1W1-1W2),

$$w_2 = \frac{U_L \times \sin\alpha}{U/w \times \sin 120°} \tag{34}$$

gdje je:

w_2 [-] …ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podijeljenog namota (na stupu susjedne faze) (vektor 1U3-1U4 = 1V3-1V4 =1W3-1W4),

ili pomoću kosinusovog poučka:

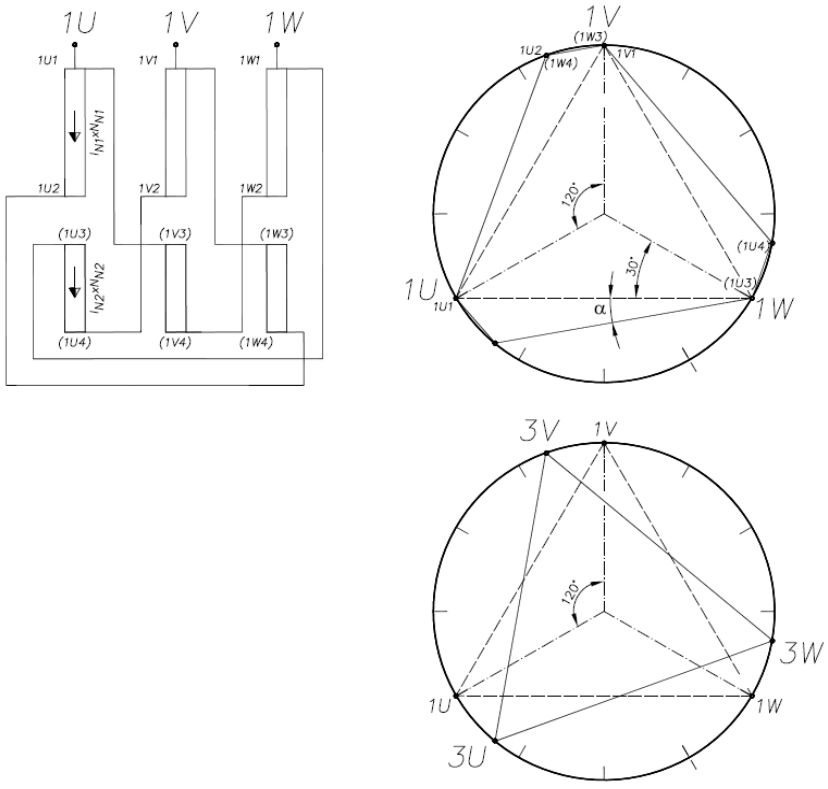
$$w_{UK} = \sqrt{w_1^2 + w_2^2 - 2 \times w_1 \times w_2 \times \cos 120°} \tag{35}$$

pri tome se dobiva stvarni iznos kuta α:

$$\alpha_{STV} = \arctan \frac{\sqrt{3}}{2 \times \frac{w_1}{w_2} + 1}. \tag{36}$$

- fazni pomak (-) (negativan $\alpha < 0°$)

  Negativan fazni pomak smanjuje kut grupe spoja, pri čemu napon prednjači. Izvedba željenog spoja za negativni pomak se dobija promjenom smjera motanja namota, zamjenom faza ili izvedbom adekvatnog spoja na primarnom namotu (**slika 2-10**.).



Slika 2-10: Produženi trokut kod „negativnog“ faznog pomaka za kut α

2.1.3.5 Regulacija napona

Izvedba regulacije ispravljačkih transformatora se ne razlikuje od regulacije energetskih transformatora, pri čemu se razlikuju dvije vrste regulacije:

- u beznaponskom stanju s odcjepima pomoću premještača s tri ili više položaja,
- regulaciju pod teretom pomoću regulacijske sklopke.

Kod dobivanja aluminija i u drugim procesima gdje je struju sekundara potrebno održavati konstantnom, regulacija pod teretom je nezaobilazna. Ona se može vršiti predbiranjem ili prekretanjem.

Sekundarni napon se regulira preko primarne strane od nazivnog napona pa skoro do nule kao i kod pećnih transformatora pa je stoga neophodno korištenje sklopke s velikim brojem položaja i izvedbu s dva aktivna dijela.

Finu kontinuiranu regulaciju istosmjernog napona se postiže predmagnetiziranim zasićenim magnetskim prigušnicama, tzv. transduktorima. Transduktorske prigušnice mogu biti postavljene s aktivnim dijelom u zajednički kotao i biti hlađene uljem transformatora, tada je dodatne gubitke transduktorskih prigušnica potrebno uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja rashladnog sustava.

Transduktore koji se izrađuju za nazivne struje od 2,5 kA i regulaciju istosmjernog napona do 70 V zovu se jednovojne prigušnice, pri čemu jedini zavoj čini ispruženi vodič oko kojeg su poslagane prstenaste jezgre (bez zračnog raspora) od orijentiranog transformatorskog lima.

Upravljanje transduktorskim prigušnicama postiže se istosmjernom strujom koja protječe upravljačkim namotom koji se nalazi omotan oko svih prstenastih jezgri magnetske prigušnice.

2.1.3.6 Proračun ispravljačkog transformatora (električni dio)

Nakon izrađene tehničke dokumentacije sa svim nužnim ulaznim i izlaznim parametrima aktivnog dijela pristupa se kontroli proračuna kao i kod pećnih transformatora, pri čemu se obraća pažnju na izvedbu ispravljačkog postrojenja, grupu spoja s pripadajućim vektorskim dijagramom.

Proračun se provodi bez korištenja programa za optimiranje. Račun se kontrolira ručno ili primjenom pojedinih programskih modula za optimiranje namota, jezgre i elemenata za upravljanje koji se nalaze u priključcima sekundara (transduktori, usisne prigušnice i sl.). Viši harmonici u pogonu ispravljačkog transformatora (6-pulsni) se mogu razlikovati od viših harmonika postrojenja (12, 24, 48- ili više pulsni). Utjecaj viših harmonika pri proračunu dodatnih gubitaka transformatora određujemo za osnovnu 6-pulsnu izvedbu.

Nakon kontrole proračuna i njegovog odobrenja potrebno je tablicu s iznosima napona/struja za pojedine položaje regulacije ispravljačkog transformatora (**tablica 2-1.** i **tablica 2-2.**) popuniti konačnim izračunatim vrijednostima te tako popunjenu tablicu poslati na odobrenje projektanta ispravljačkog postrojena. Odstupanja pri mjerenju u ispitnoj stanici ne smiju biti veća od dozvoljenih odstupanja, koja su zadana međunarodnim standardima prema kojima je transformator ugovoren.

Projektant ispravljačkog postrojenja će na osnovi tablice napona/struja ispravljačkog transformatora izraditi model sa svim elementima ispravljačkog postrojenja. Ovaj model se koristi za simuliranje svih faza procesa u cilju otkrivanja neželjenih pojava i finog podešavanja ispravljačkog postrojenja.

2.2 OSNOVE KONSTRUKCIJE

2.2.1 Osnovni dijelovi transformatora

2.2.1.1 Jezgra

Postoje dvije izvedbe jezgri energetskih transformatora:

- ogrnuti tip,
- jezgrasti tip.

Izvedba obrađena u ovom radu je izvedba jezgrastog tipa (**slika 2-11.**) s tri vertikalna stupa koji su s gornje i donje strane zatvoreni jarmom. Poprečni presjek stupa i jarma je kod ove izvedbe jednak, a oznaka za ovaj tip jezgre je 3/0 (X/Y pri čemu je X broj glavnih (namotanih) stupova, Y broj pomoćnih (nenamotanih) stupova). Za veće transformatore koristi se izvedba jezgre s dva povratna stupa, kod koje glavni stupovi imaju jednak poprečni presjek, a poprečni presjeci jarma i povratnog stupa su jednaki i iznose 58% poprečnog presjeka glavnog stupa (problemi transporta rastu s povećanjem visine).

Jezgra transformatora se izrađuje u **STEP-LAP** izvedbi kako bi se postigli što manji gubici u željezu. Kvaliteta magnetskog lima određuje se ovisno o zahtjevima i vrijednostima garantiranih gubitaka u željezu (buka koja nastaje uslijed magnetiziranja jezgre, gubici praznog hoda). Kvalitetniji limovi imaju nedostatak prilikom pojave istosmjerne komponente u radu ispravljačkog postrojenja.

U 12-pulsnom spoju ispravljačkih transformatora za koja su neophodna dva 6-pulsna transformatora nameće se rješenje gradnje dvaju transformatora na jednu jezgru; ovakvu izvedbu jezgre transformatora nazivamo izvedbom na kat.

Kod mosnog spoja (**DB**) je već navedena poteškoća pri odabiru broja zavoja sekundarnih namota koji su spojeni u trokut odnosno zvijezdu, pri čemu oni moraju biti u omjeru $1/\sqrt{3}$. Kod spoja s usisnom prigušnicom (**DSS**) može se isto tako postići 12-pulsnost, pri čemu vrijede jednaki ograničavajući uvjeti za zavoje primarnih namota.

Pri izvedbi jezgre na kat obraća se posebna pažnja izvedbi međuprostora između dva kata (sustava). Izvedba međuprostora dvaju sustava može biti:

- bez međujarma, ukoliko ne postoji razlika narinutog primarnog napona (protoka) po katu (sustavu),
- „mali“ međujaram ukoliko postoji razlika primarnog napona (protoka) nastala uslijed različite grupe spoja na sekundaru (Yd+Yy) gdje poprečni presjek međujarma mora biti jednak postotnoj vrijednosti napona kratkog spoja (npr. uk=11%) u odnosu na poprečni presjek glavnog stupa {npr. A_m [mm^2] = 0,11·A_j [mm^2], gdje je A_m poprečni presjek međujarma, a A_j poprečni presjek jezgre},
- „veliki“ međujaram ukoliko postoji zahtjev od strane kupca za dva potpuno odvojena sustava, razlika u grupi spoja narinutog (primarnog) napona (Yy+Dd/y), više od 2 aksijalna paralelna ogranka unutar primarnog /sekundarnog namota ili fazni pomak za iznos α=30°. Poprečni presjek međujarma mora biti jednak iznosu od 52% poprečnog presjeka glavnog stupa.

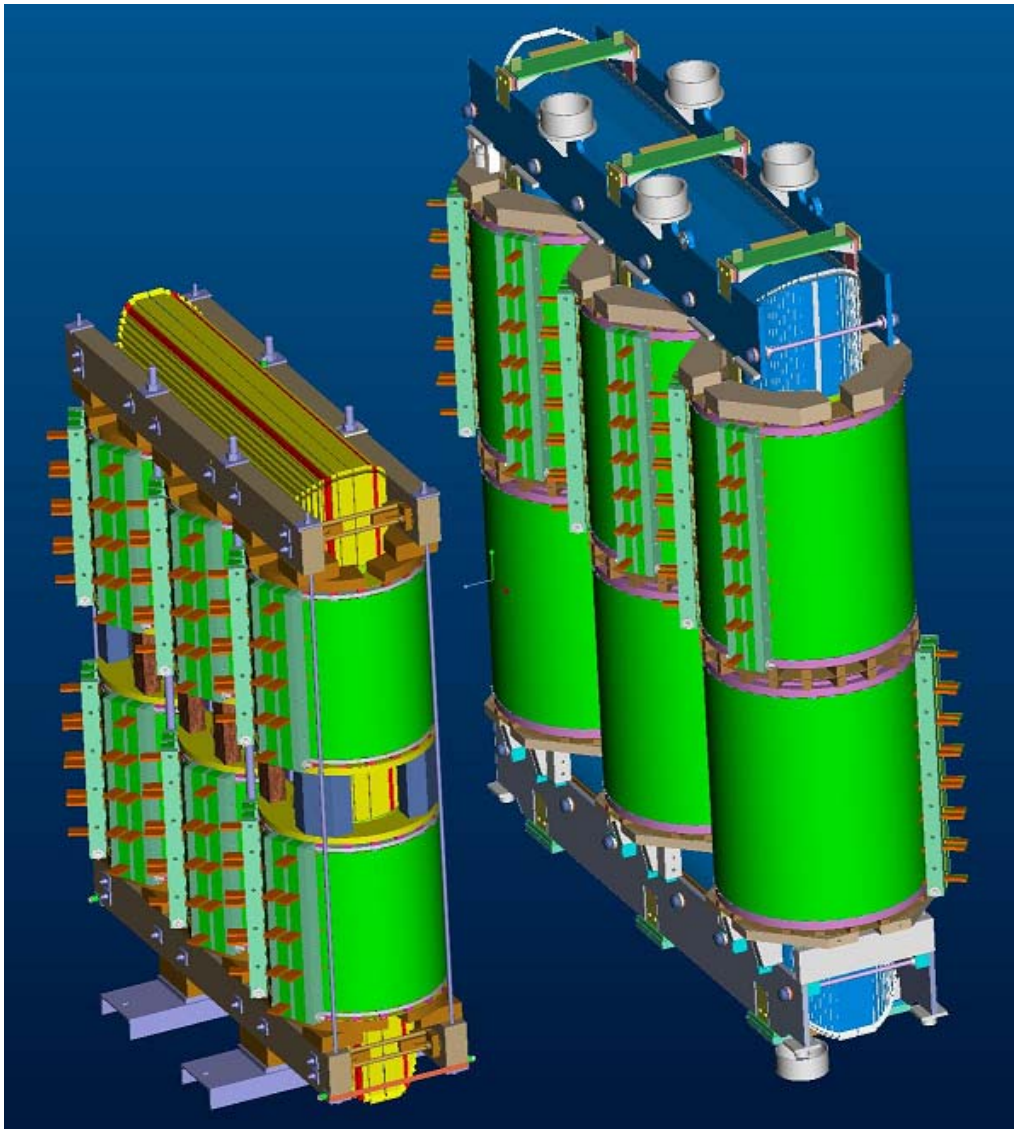
Stezni elementi jezgre energetskih transformatora se izrađuju od standardnih konstrukcijskih čelika, pri čemu su dimenzionirani za mehanička naprezanja koja nastaju uslijed radijalnih i aksijalnih sila u namotima prilikom kratkog spoja.

Pored sila koje se javljaju u pogonu transformatora, stezni elementi su opterećeni silama u procesu ugradnje aktivnog dijela u kućište transformatora i dinamičkih sila u procesu transporta od proizvodne hale do odredišta.

Izvodi iz namota i priključci od namota do provodnika kroz koje protječu visoke struje (do 100 kA) proizvode jak izmjenični magnetski tok, a time i visoke gubitke vrtložnih struja, pa se obraća pažnja na dodatne gubitke i moguće izvore dodatnih zagrijanja, u nekim slučajevima i do pojave žarenja uzrokovanog magnetskim tokom u čeličnim dijelovima.

Mehanička čvrstoća steznih elemenata u izradi većih industrijskih transformatora zahtijeva korištenje čelika te je iste potrebno zasloniti magnetskim zaslonima (limovima jezgre ili aluminijskim zaslonima). Otpor magnetskih zaslona je znatno manji od otpora čelika pa je time prigušenje znatno bolje i gubici u magnetskim zaslonima su znatno manji nego što bi bili u čeličnim elementima. Postupak zaslanjanja čeličnih dijelova jezgre je zahtjevan konstrukcijski proces, pri kojemu se posebno obraća pažnja na preklapanje magnetskih zaslona i njihovo pojedinačno uzemljenje u cilju spriječavanja dodatnih vrtložnih struja u zaslonima uslijed neadekvatnog uzemljenja (stvaranje dodatnih zavoja).

Radi izbjegavanja negativnih utjecaja izmjeničnog magnetskog toka u steznim elementima jezgre, stezni elementi manjih industrijskih transformatora se izrađuju od posebne slojevito prešane bukovine. Vijčani spojevi, dodatni nosači priključaka i svi ostali metalni dijelovi moraju biti izrađeni od nemagnetskog čelika ili adekvatno zaslonjeni magnetskim zaslonima.



Slika 2-11: Izvedbe aktivnog dijela na kat sa steznicima od drveta ili nemagnetskog čelika

2.2.1.2 Namoti

Kod industrijskih transformatora u jezgrastoj izvedbi namot sekundara se nalazi s vanjske strane, dok se namot primara nalazi s unutarnje strane prema jezgri (**slike 2-3., 2-4.** i **2-11.**).

Ovakva raspodjela namota omogućuje fizičku vezu između više paralelnih svitaka sekundarnog namota (s tri ili više zavoja) po cijeloj njegovoj visini. Paralelni svici sekundarnog namota moraju biti paralelno spojeni s okomitim bakrenim sabirnicama, pri čemu je vezu između svitaka i sabirnica potrebno izvesti u nerastavljivom spoju (zavarivanjem ili tvrdim lemljenjem).

Rastavljivi spoj nije prikladan radi pojave dodatnih otpora između kontaktnih površina i vrtložnih struja u vijčanom spoju. Nekvalitetno izveden rastavljivi spoj dovodi do pojave lokalnih zagrijanja na kontaktnim površinama i pojavom toplih točaka u transformatoru koji u većini slučajeva dovodi do njegove havarije.

Okomite sabirnice priključaka potrebno je uvijek postaviti tako da dvije susjedne sabirnice vode struju u suprotnim smjerovima, uz što manji razmak između sabirnica radi bolje kompenzacije magnetskog polja oko vodiča. Ovakva izvedba sabirnica rezultira niskim magnetskim poljem, manjim gubicima vrtložnih struja i manjom rasipnom reaktancijom [1, 2, 3].

Sekundarni namoti se izrađuju od transponiranog vodiča kao slojni ili preloženi namot. Kod izvedbe slojnog namota treba posebno obratiti pažnju na dimenzioniranje steznog spoja izvoda iz namota, jer radijalne sile tijekom „kratkog spoja“ imaju tendenciju odmotavanja slojnog namota.

U procesu taljenja željeza postoji više karakterističnih faza u radu elektrolučne peći. U svakoj od faza taljenja javljaju se specifična naprezanja za koja pećni transformator mora biti dimenzioniran. Prenaponi i uzbudne frekvencije koje se mogu poklopiti s frekvencijom namota transformatora samo su jedan od uzroka dodatnih naprezanja. Svako uranjanje grafitnih elektroda dovodi do takozvanog „kratkog spoja“ transformatora i pojave dodatnih aksijalnih i radijalnih sila u namotima, sabirnicama priključaka i steznim elementima jezgre transformatora [3, 6, 7].

Zbog ovih dodatnih naprezanja potrebno je radijalne izvode pojedinih paralelnih grupa sekundarnog namota fizički odvojiti pomoću umetaka od izolacijskog papira debljine 5mm i jednostrane izolacije vodiča debljine 0,5 do 1 mm. Ovako izvedeni radijalni izvodi sekundarnog namota osiguravaju besprijekornu eksploataciju transformatora i osnovni su preduvjet za izradu sekundarnih priključaka koji povezuju aktivni dio transformatora s potrošačem (u ovom slučaju industrijskim postrojenjem za elektrolizu ili elektrolučne peći za taljenje).

Namoti primara i regulacije industrijskih transformatora se ne razlikuju od namota mrežnih energetskih transformatora. Preloženi i **SMIT**-namoti (preloženi namot bez radijalnih kanala) se koriste za primarne namote više naponske razine, dok se za niske napone primara koriste cilindrični i slojni namoti. Regulacija se izvodi pomoću odcjepa na namotima primara (u ovom slučaju je opseg regulacije malen) ili posebno izrađenim namotima regulacije u viševojnoj-spiralnoj izvedbi.

Namoti primara i regulacije se izrađuju od profilnog ili transponiranog vodiča, što ovisi o potrebnoj snazi transformatora i zadanom naponu primarne strane.

Prilikom izrade svih vrsta namota potrebno je voditi računa o silama kratkog spoja, pojavama prenapona i zagrijanjima u istima. Navedene kriterije je potrebno uskladiti u traženju optimalnog rješenja aktivnog dijela, pri čemu svi na svoj specifičan način utječu na kvalitetu i vijek trajanja transformatora.

2.2.1.3 Stupanj izolacije i izolacija namota

Stupanj izolacijske čvrstoće transformatora se jednostavno opisuje izrazom „stupanj izolacije“, a određen je tjemenom vrijednošću podnosivog udarnog napona punog vala kod ispitivanja transformatora udarnim naponom, te efektivnom vrijednošću podnosivog napona pogonske frekvencije primijenjenog u vremenu od jedne minute. U našem slučaju riječ je o uljnim transformatorima pa je stoga stupanj izolacije ovih transformatora određen podnosivim udarnim naponom punog vala te ispitnim naponom pogonske frekvencije {npr. 36 kV stupanj izolacije, 70 kV podnosivi izmjenični napon pogonske frekvencije kroz 1 minutu (namot), 170 kV podnosivi atmosferski udarni napon punog vala 1,2/50μs} [1, 4].

Najviši pogonski napon mreže je najveća efektivna vrijednost linijskog napona, koji se pojavljuje u bilo kojem trenutku i na bilo kojem mjestu mreže u normalnim pogonskim uvjetima, pri čemu je potrebno naglasiti da ova vrijednost ne uzima u obzir prolazne promjene napona nastalih uslijed smetnji (npr. proces u talioničkim pećima) ili naglog isključenja velikih potrošača.

Mreža se može uzemljiti na dva načina:

- nultočka mreže čvrsto uzemljena,
- nultočka mreže izolirana ili spojena s zemljom preko otpora (reaktancija), pri čemu se nultočka u normalnom pogonu nalazi na potencijalu zemlje.

Stupanj izolacije je određen najvišim dopustivim pogonskim naponom mreže i načinom uzemljenja mreže. Ukoliko naručitelj nije propisao stupanj izolacije, ona se odabire prema najvišem pogonskom naponu mreže [2, 3].

Za određivanje ispitnih napona relevantan je najviši dopustivi pogonski napon mreže odnosno stupanj izolacije. Ukoliko pogonski napon mreže prelazi najviši dopustivi napon, ispitne napone je potrebno odrediti prema slijedećem višem stupnju izolacije.

Za mrežu kod koje najviši pogonski napon ne prelazi 72,5 kV, neovisno o načinu uzemljenja nultočke mreže i transformatora, stupanj izolacije namota je pun, a izolacija namota je podjednaka.

Za pogonske napone mreže koji prelaze 72,5 kV postoje dvije vrste stupnja izolacije:

- smanjeni stupanj izolacije,
- puni stupanj izolacije (izvedba kao kod stupnja izolacije do 72,5 kV).

Smanjeni stupanj izolacije primjenjuje se u slučajevima kada najviši efektivni napon između stezaljki transformatora i zemlje ne prelazi 80% linijskog napona ili kod čvrsto uzemljene mreže gdje se koristi odvodnik prenapona za 80% stupnja izolacije mreže. U slučaju kada su svi transformatori u mreži spojeni u zvijezdu, a nultočke čvrsto uzemljene, također se može primijeniti smanjeni stupanj izolacije.

Određivanje stupnja izolacije industrijskih transformatora ne razlikuje se od stupnja izolacije energetskih transformatora i dijeli se na:

- puni stupanj izolacije $\leq$ 72,5 kV,
- puni ili smanjeni stupanj izolacije < 245 kV,
- smanjeni stupanj izolacije $\geq$ 245 kV.

Izolacija namota dijeli se na:

- međusobnu izolaciju namota iste faze (primar–sekundar za dvonamotne transformatore) i međusobnu izolaciju namota različitih faza (razmak u prozoru između faza),
- izolaciju namota prema jezgri,
- izolaciju namota prema konstrukcijskim dijelovima (steznicima jezgre, kotlu, ukrutama u kotlu transformatora i sl.).

Izolacija u rasporu (glavnom kanalu) između primarnog i sekundarnog namota, kao i izolacija između niskonaponskih / visokonaponskih (**slika 2-4.** i **2-5.**) namota susjednih faza, podliježe djelovanju približno homogenog električnog polja pa je s toga potrebno računati samo s probojnom čvrstoćom izolacijskih slojeva. Izolacija se izvodi kombinacijom slojeva ulja i slojeva izolacijskog papira, koje je stoga potrebno ispitati s obzirom na raspodjelu napona po pojedinim slojevima prema debljini i dielektričnoj konstanti, pri čemu je dielektrična konstanta krute izolacije znatno veća od dielektrične konstante ulja: $\varepsilon_{r\ddot{o}l} = 2{,}2$ za mineralna ulja, a $\varepsilon_{rPSP} = 3{,}2$ (4,0) za izolacijski papir. Da bi se napon što bolje raspodijelio na krutu izolaciju i ulje, dielektrična konstanta krute izolacije mora biti što bliža dielektričnoj konstanti ulja.

Dielektrička svojstva ulja i papira ovise o materijalu od kojeg su izrađeni, tehnologiji u procesu izrade i stupnju onečišćenosti (vodljive nečistoće (čestice metala), vlaga itd.). Pored toga potrebno je obratiti pažnju na vrijeme izloženosti aktivnog dijela zraku nakon procesa sušenja prilikom dotlačivanja (stabiliziranja) namota i utapanja aktivnog dijela u kućište (kotao) transformatora. Svi navedeni uvjeti negativno utiču na dielektrička svojstva izolacijskog materijala, te ukoliko se ne nalaze u dozvoljenim granicama jedan su od najčešćih uzroka havarije transformatora [3, 4].

Izolacija namota prema gornjem i donjem jarmu gdje ne postoji homogeno električno polje mora se računati s tangencijalnim naponskim naprezanjima na površini izolacijskih slojeva, tj. s kliznim putovima za električni proboj od namota do jarma. Duljina kliznog puta se ostvaruje pomoću nužnog razmaka između jarma i namota. Ukoliko je razmak kojeg zahtijeva klizni put prevelik ili su dimenzije aktivnog dijela uslijed gabarita transformatora (uvjetovano ćelijom u kojoj se transformator nalazi) ograničene, umeću se izolacijske kape koje nam omogućuju potrebnu duljinu kliznog puta.

Kod industrijskih transformatora sa stupnjem izolacije primarnog namota do 52 kV, klizni putovi od namota do jarma mogu se relativno lako osigurati i praktično izvesti npr. za slojni namot sa stupnjem izolacije 52 kV potrebno je osigurati razmak do donjeg jarma od 83 mm, dok je taj razmak prema gornjem jarmu 90 mm, pri čemu nije potrebno koristiti dodatne izolacijske kape.

Ukoliko nam se nameće regulacija ulaznim naponom (vidi 2.1.2), međunapon će biti izveden za stupanj izolacije oko 36 kV, dok se regulacijski transformator u štednom spoju izvodi za izolaciju mreže na koju mora biti priključen, pri čemu je za dimenzioniranje izolacije namota potrebno pored stupnja izolacije uzeti u obzir i pojave prenapona u primarnom namotu koji nastaju uslijed rada peći ili ispravljačkog postrojenja.

Izolacija namota prema metalnim konstrukcijskim dijelovima (kotlu) podliježe djelovanju približno homogenog električnog polja pa je stoga potrebno računati samo s probojnom čvrstoćom ulja ili kombinacijom probojne čvrstoće ulja i barijera, ovisno o stupnju izolacije vanjskog namota [7].

Industrijski transformatori su u pogonu izloženi udarnim prenaponima koji nastaju u pojedinim fazama rada elektrolučne peći ili ispravljača u procesu elektrolize. Valovi prenapona, koji s mjesta izvora putuju na sve strane, udaraju svojim strmim čelom neposredno na primarni namot transformatora. Ispitivanje udarnim valovima standardnog oblika se koristi kako bi se ispitala izolacijsku sposobnost namota protiv udarnih prenapona. Stoga je za pouzdani rad transformatora nužno predvidjeti obvezne korake zaštite od prenapona koji nastaju prilikom uključivanja i isključivanja regulacijske sklopke (regulacija pod teretom) te kod pojave povećanog napona na neprotjecanom namotu regulacije.

Prilikom čestog ukapčanja i iskapčanja javljaju se povećane struje, što za posljedicu ima jače i brže trošenje kontakata. Nagorine koje se javljaju u ovom procesu onečišćuju ulje u teretnom dijelu sklopke pa je stoga potrebno fizički odvojiti ulje transformatora i sklopke u konzervatoru transformatora, pri čemu se kod pećnih transformatora preporuča ugradnja filtera za ulje regulacijske sklopke.

Za zaštitu od prenapona u transformatoru se koriste odvodnici prenapona i prigušni **RC**-elementi koji su spojeni između dva koraka regulacije. Odvodnici prenapona i prigušni **RC**-elementi dimenzioniraju se pomoću internih proračuna i rade se za svaki slučaj pojedinačno.

2.2.1.4 Priključci i elementi priključaka

Priključci su veza između aktivnog dijela i mreže s jedne strane te potrošača s druge strane. Kod mrežnih energetskih transformatora njihove dimenzije se mogu procijeniti (na osnovu mjerenja i ispitivanja sličnih transformatora), a time i njihov utjecaj na dodatne gubitke.

Priključke u osnovi dijelimo na:

- priključke primara (visokonaponska strana) s pripadajućom regulacijom,
- priključke sekundara (niskonaponska strana).

Za namote i priključke ne predstavlja problem samo visoki napon na primaru koji zahtijeva velike izolacijske razmake, već i niski napon na sekundaru koji traži velike struje i velike presjeke vodiča, što za posljedicu ima povećane dodatne gubitke u bakru.

Do dodatnih gubitaka dolazi uslijed rasipnog toka koji prolazi kroz cijeli namot, a time i kroz svaki vodič namota koji kasnije preko izvoda završava na zajedničkim sabirnicama priključaka.

Ukoliko se uzme u obzir da se kod industrijskih transformatora na sekundarnoj strani struje postižu nazivne vrijednosti struja od nekoliko desetaka kA nužno je prilikom izrade priključaka obratiti posebnu pažnju na slijedeće:

- naponski red i stupanj izolacije (izvedba s međukrugom / primarom za stupanj izolacije 36 kV s minimalnom jednostranom izolacijom 1 mm, pri čemu stupanj izolacije primara predtransformatora u štednom spoju iznosi ≤ 245 kV, a sekundara (međukruga) ≤ 36 kV),
- specifična opterećenja u bakru (≤ 3,6 A/mm^2),
- dozvoljena nadtemperatura priključaka (≤ 25 K),
- aksijalne i radijalne sile u priključcima uslijed pojave kratkog spoja ($I_K = 5 \cdot I_N$, pri čemu je I_N nazivna struja u namotima (priključcima)),
- kompenzirana izvedba sabirnica kod kojih struja u paralelnim bakrenim šinama teče u suprotnim smjerovima (manje magnetsko polje, a time i manji razmaci do metalnih dijelova, manji dodatni gubici),
- dimenzioniranje i odabir adekvatnog materijala vijčanog spoja za stabiliziranje sabirnica u kompenziranoj i nekompenziranoj izvedbi,
- dimenzioniranje rastavljivih spojeva među sabirnicama (specifično opterećenje bakrene kontakte površine kod normalnog cirkuliranja ulja ≤ 0,9 A/mm^2, kod prisiljenog cirkuliranja ulja ≤ 1,18 A/mm^2 uz kontaktna naprezanja u bakru ca. 20 N/mm^2),
- pravilna primjena i dimenzioniranje razmaka prema magnetskim zaslonima (magnetski limovi ili aluminij) u cilju optimizacije dimenzija kotla i svladavanja negativnih utjecaja rasipnog toka,

- dimenzioniranje rastavljivih spojeva između sabirnica i provodnika (korištenje bakrenih lamela debljine 0,3 mm radi kompenziranja dodatnih naprezanja između kućišta (kotla) i sabirnica priključaka s mogućnošću montiranja provodnih izolatora na izolacijsku ploču).

Izvedbe priključaka sekundara industrijskih transformatora dijele se u dvije osnovne grupe:

- priključci za pećne transformatore,
- priključci za ispravljačke transformatore.

Obje osnovne grupe ovise o:

- izvedbi postrojenja u kojem će transformator biti eksploatiran,
- dimenzijama njegove ćelije,
- grupi spoja ili vrsti ispravljača,
- vrsti provodnih izolatora sekundara (plosni (zrakom hlađeni), ili cijevni (vodom hlađeni) provodnici) te raspodjeli i položaju na kotlu ili poklopcu transformatora,
- elementima za upravljanje koji su sastavni dio priključaka (transduktorske (magnetske) prigušnice, usisne prigušnice).

Priključke sekundarne strane potrebno je izvesti najkraćim putem od namota do provodnika, pošto na dodatne gubitke u bakru utječe njihova duljina [11, 12, 14], stoga je potrebno na kraju izrade priključaka usporediti težinu bakra u namotima i sabirnicama u cilju provjere uračunatih dodatnih gubitaka u bakru koji neposredno utječu na izračunate i konačne vrijednosti kratkog spoja. Kako bi ograničili dodatne gubitke u sabirnicama, njihova debljina ne smije prelaziti 12mm kod sabirnica koje se nalaze u području izmjenične struje, odnosno 20mm kod sabirnica koje vode istosmjerne struje usisne prigušnice u **DSS**-spoju (**slika 2-6.**).

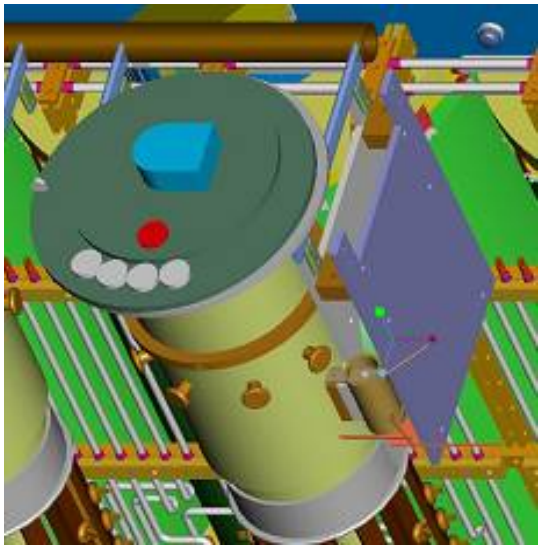
Izvedba priključaka industrijskih transformatora uvjetovana je električnim elementima za upravljanje koji se nalaze u samom krugu priključaka, tako da su njihove dimenzije presudne i nezaobilazne u osnivanju i kasnijoj detaljnoj konstrukcijskoj i tehnološkoj razradi.

Elementi za upravljanje i zaštitu industrijskih transformatora su:

- prigušni RC-elementi (pećni transformatori),
- prigušnice (pećni transformatori),
- transduktorske prigušnice (ispravljački transformatori **DB**),
- usisne prigušnice (ispravljački transformatori **DSS**).

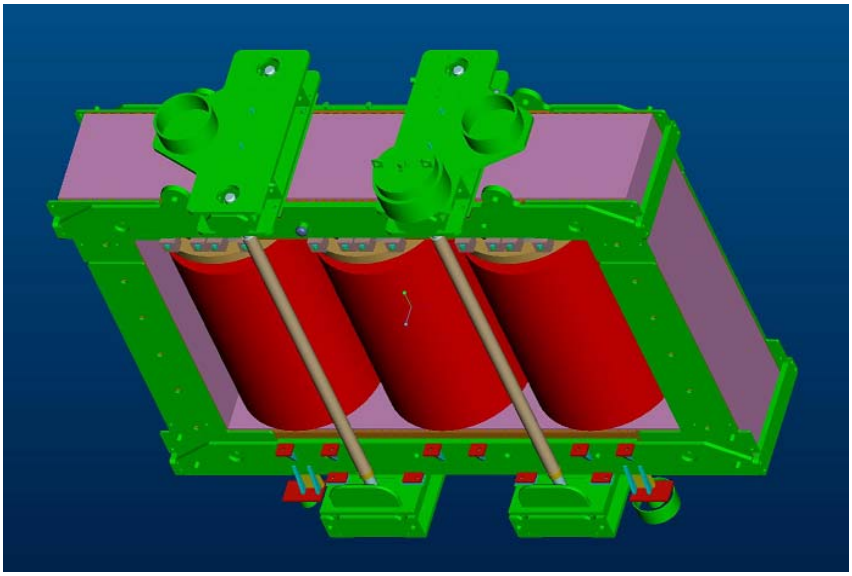
U pogonu pećnih transformatora pri maksimalnom naponu sekundara induciraju se visoki naponi na neprotjecanom dijelu regulacijskog namota, što rezultira povećanjem napona primara. U cilju zaštite aktivnog dijela pećnog transformatora od povećanog napona na neprotjecanom namotu regulacije, u njega je potrebno ugraditi dodatne prigušne **RC-**elemente koji služe za prigušenje visokofrekventne rezonantne uzbude regulacijskog namota.

Prigušni kapaciteti i pripadajući otpornici određuju se za svako postrojenje pojedinačno i ovise o vrijednostima prenapona u proizvodnom procesu. Vrijednosti otpora su u rasponu od 30…100 Ω, a kapaciteta do 200 nF. **RC-**elementi se ugrađuju u priključke regulacije i pozicioniraju se pored same sklopke transformatora (**slika 2-12.**).



Slika 2-12: Prigušni **RC**-element

Kod manjih snaga pećnih postrojenja dobiva se niska impedancija pa se ona mora povećati, dok se kod postrojenja većih snaga povišena impedancija treba smanjiti; stoga se za optimalno podešavanje impedancija pećnog postrojenja koriste **prigušnice** (**slika 2-13.**). Impedancija prigušnice se regulira u beznaponskom stanju (premještač) ili pod teretom (sklopka). Kako bi se mogao povećati ili smanjiti induktivitet kruga, prigušnica se spaja serijski s pećnim transformatorom na primarnoj strani. Ove prigušnice se izrađuju potpuno oklopljene magnetskim limovima, pošto se u pogonu peći prilikom regulacije luka između elektroda mogu javiti nesimetrije (nesimetrična opterećenja). Glavni stupovi prigušnice izrađeni su od više prstenova između kojih se nalaze zračni raspori. Izvedba s jednim zračnim rasporom nije prihvatljiva, jer se uslijed glavnog magnetskog toka u jezgri javljaju dodatne vrtložne struje koja utječu na povećano zagrijanje jezgre. Dobivanje potrebnog zračnog raspor se postiže podijelom na više manjih, pri tome se za mehaničku stabilnost stupa pored prstenova od magnetskih limova u radijalnoj izvedbi koriste distantni elementi od magnetski neutralnog materijala (npr. keramike) koji se međusobno lijepe specijalnom smolom. Namoti prigušnica se izvode u cilindričnoj izvedbi radi bolje kompenzicije radijalnih sila koje se javljaju u pogonu elektrolučne peći. Namoti se tlače pomoću vlačnih motki i elastičnih podloški (kontinuirano tlačenje namota) koje su izrađene od visokolegiranih nemagnetskih čelika.

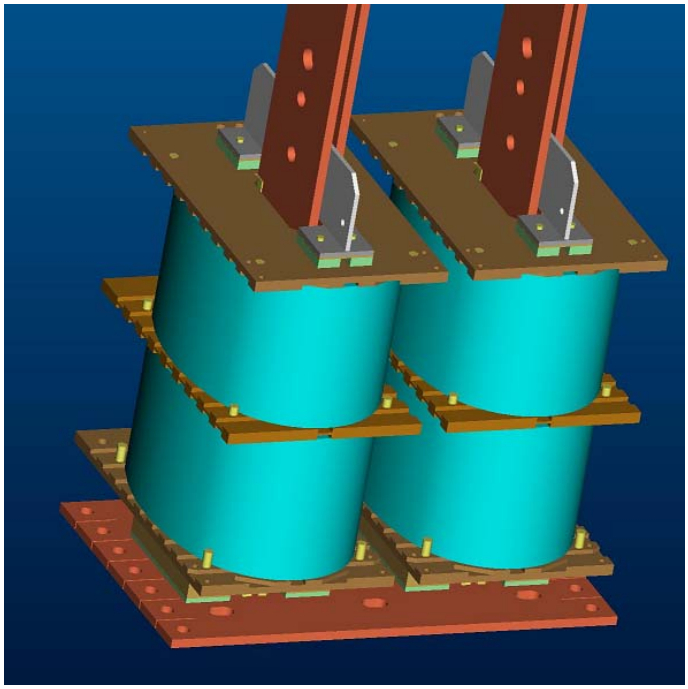


Slika 2-13: Prigušnica pećnog transformatora

Ovako izrađene prigušnice mogu biti postavljene u zajednički kotao s pećnim transformatorom ili pak u odvojenom kotlu, pri čemu je prva izvedba ekonomičnija i konstrukcijski prihvatljivija radi optimalne duljine priključaka između aktivnih dijelova (dodatni gubici u bakru i zaštita sabirnica u pećnom postrojenju).

Danas je najveći problem nedovoljan prostor u pećnim postrojenjima za pećne transformatore većih snaga. Pećna postrojenja su optimirana za određenu snagu pa povećanje snage po zakonu sličnosti uzrokuje povećanje aktivnog dijela i cijelog transformatora. Ovakvi početni uvjeti znatno otežavaju proces izrade projektnog i konstrukcijskog rješenja, svodeći ga na pojedinačnu izradu.

Transduktori (magnetske prigušnice) se koriste za finu regulaciju istosmjernog napona na sekundarnoj strani. Za ovu regulaciju istosmjernog napona do 70 V i nazivne struje preko 2,5 kA koriste se jednozavojne prigušnice pri čemu jedan zavoj čini vodič (izvedba s dva paralelna vodiča i uljnim kanalom ca.5mm omogućuje manje dimenzije jezgre i bolje odvodenje zagrijanja u bakrenim šinama i samim transduktorskim jezgrama) oko kojeg su poslagane trakasto prstenaste jezgre od hladnovaljanog transformatorskog lima u ovalnoj (cilindričnoj) izvedbi (**slika 2-14.**). Upravljanje se vrši pomoću istosmjerne struje u upravljačkom namotu koji je omotan oko jezgri transduktora. Prilikom namatanja jezgre transduktora potrebno je obratiti pažnju na planparalelnost slojeva (odstupanje ≤ 0,3 mm); ukoliko je odstupanje veće od dozvoljenog, jezgra se ne može koristiti (lokalna zagrijanja).



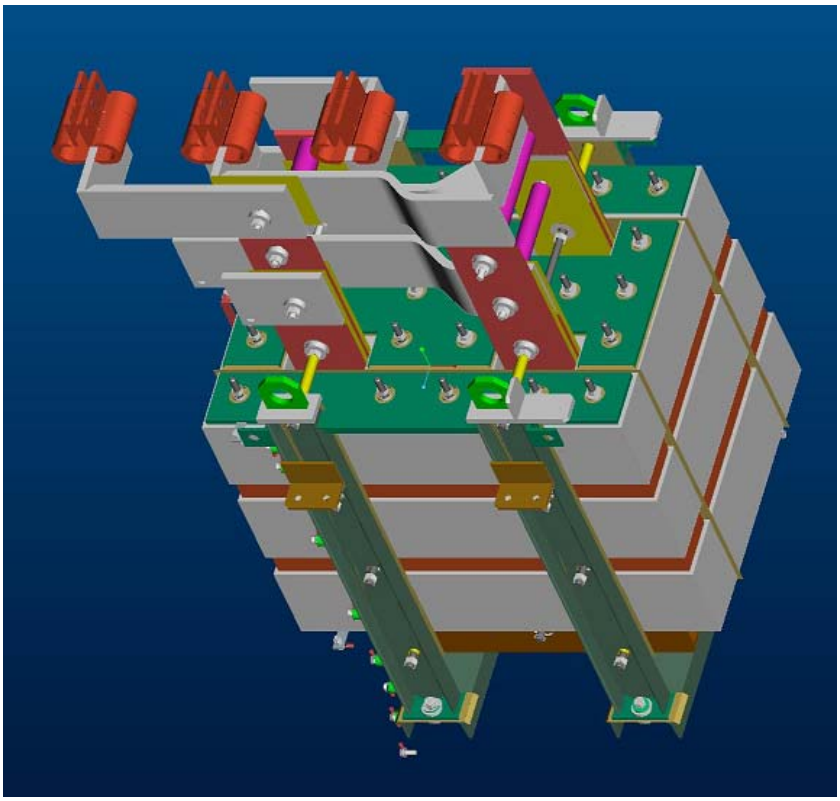
Slika 2-14: Transduktori (magnetske prigušnice)

Usisne prigušnice koriste se kod spoja dvostruke zvijezde i služe za povezivanje nultočki obaju sustava s provodnicima transformatora. One ne služe za glađenje istosmjerne struje, već za dijeljenje izmjeničnog napona i sprečavanje nastajanja struja izjednačenja; time omogućuju vođenje dioda u paru uz vrijeme komutacije dvaju sustava 120°. Izrađene su od hladno valjanog transformatorskog lima u ogrnutoj izvedbi, pri čemu su limovi slagani klasičnim preklopom pod kutem od 90°.

Izrada zavoja usisne prigušnice od punog plosnatog bakra debljine ≤ 20 mm tehnološki je zahtjevna pa se stoga primjenjuje izvedba s jednim zavojem i najviše dva paralelna bakrena vodiča za nultočku jednog sustava, pri čemu se one postavljaju u „kompenziranoj izvedbi“ naspram nultočke drugog sustava (**slike 2-6.** i **2-15.**). Izrađuju se kao cjelina i postavljaju pored aktivnog dijela ispravljačkog transformatora.

U pogonu kroz prigušnicu teče istosmjerna struja koja u sebi sadrži dio izmjenične komponente od 150 Hz. Stoga je moguće sve stezne i nosive dijelove prigušnice izraditi od konstrukcijskih čelika. Ovako izrađena prigušnica koristi se za 6-pulsno ispravljanje i naziva se jednostruka usisna prigušnica. Za 12-pulsno ispravljanje u **DSS**-spoju potrebne su dvije jednostruke prigušnice ili jedna dvostruka usisna prigušnica koja ima 4 sustava, a prepoznaje se po broju priključaka za provodnike / nultočke transformatora. Dvostruka izvedba omogućuje znatnu uštedu prostora unutar kućišta ispravljačkog transformatora. Zračni razmak između jarmova iznosi 2 mm, a osigurava se izolacijom od tvrdog papira, koja se prilikom ugradnje lijepi specijalnom smolom i učvršćuje izoliranim vijčanim spojem kroz bakrene šine i drvene distantne umetke između paketa jezgre usisne prigušnice.

Nakon kompletiranja usisne prigušnice i zatezanja svih vijčanih spojeva na propisani zatezni moment (pritisak između limova jezgre mora biti 0,15 N/mm^2), prigušnicu je potrebno ugraditi u ispravljački transformator i povezati s njegovim aktivnim dijelom.



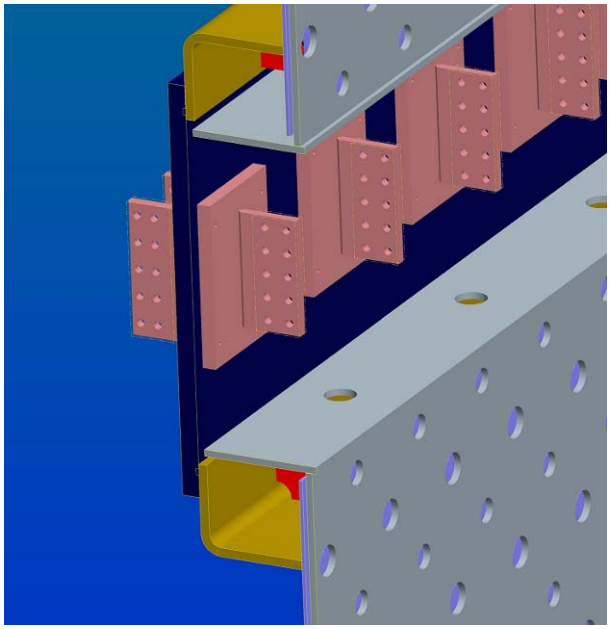
Slika 2-15: Dvostruka usisna prigušnica za 12-pulsno ispravljanje u **DSS**-spoju

2.2.1.5 Provodnici

Kod industrijskih transformatora provodni izolatori primara se postavljaju na poklopac, dok se provodni izolatori sekundara, ovisno o sabirnim šinama u postrojenju, mogu postaviti na poklopac ili na uzdužne stranice kotla. Položaj provodnih izolatora na uzdužnim stranicama kotla omogućuje kraće sabirne šine, a time i manje dodatne gubitke u bakru. Velike struje koje se javljaju u sekundarnim priključcima uzrokuju jaki izmjenični tok, a time i visoke gubitke vrtložnih struja, zato je metalne dijelove kotla i aktivnog dijela potrebno udaljiti od sabirnice priključaka. Steznici priključaka mogu biti izrađeni od specijalne prešane bukovine i time se može smanjiti jedan od uzročnika neželjenih magnetskih pojava u metalnim dijelovima steznika jezgre.

Kotao industrijskih (energetskih) transformatora mora podnositi vakuum, jer je time omogućeno odstranjivanje zaostale vlage iz aktivnog dijela transformatora. Kako se u industrijskim procesima položaj sklopke dnevno mijenja i do nekoliko stotina puta, lako je izračunati koliko je kratak interval za promjenu kontakata sklopke. Kontakti se zamjenjuju kroz otvore na kotlu nakon što se iz njega ispusti ulje. Nakon toga je kotao potrebno vakuumirati i time ga „očistiti“ od vlage prije punjenja novim transformatorskim uljem.

Zaslanjanje magnetskim limovima moguće je samo na ravnim plohama. Kod industrijskih transformatora provodnici se najčešće montiraju na uzdužne stranice, za što je potreban dodatni okvir u kojem je omogućeno neometano strujanje ulja.



Slika 2-16: Okvir za ugradnju plosnih provodnika s aluminijskim zaslonom

Ovako izrađeni okvir od nemagnetskog čelika potrebno je s unutarnje strane kotla zasloniti aluminijskim zaslonima u cilju smanjenja utjecaja jakog izmjeničnog magnetskog toka u sabirnicama priključaka. Debljina aluminijskih zaslona ovisi o strujama u priključcima, ali ne smije biti manja od 12 mm. Preklop između dva aluminijska zaslona mora biti minimalno 100 mm, a zasloni se ne smiju dodirivati (pojava lokalnih vrtložnih struja). Svaki zaslon potrebno je zasebno uzemljiti i njihova uzemljenja izvesti u priključnu kutiju za strujne transformatore. Takva izvedba omogućuje kontrolu ispravnosti ugradnje aluminijskih zaslona.

Priključci se spajaju s provodnim izolatorima pomoću fleksibilnih lamela koje omogućuju kompenzaciju dodatnih naprezanja između kućišta i priključaka transformatora. Provodni izolatori se ugrađuju u nemagnetsku ploču, a za brtvljenje se koriste specijalni brtveni materijali otporni na transformatorsko ulje i temperature do 150°C (**slika 2-16.**).

Izolatori sekundarne strane mogu biti plosni ili cijevni, pri čemu se cijevni u pravilu koriste kod pećnih transformatora. Preporučena naprezanja bakra ili preporučene gustoće struje (u ulju) plosnih provodnika uljnih transformatora su $\leq 3{,}6$ A/mm^2 uz normalno cirkuliranje ulja, pri čemu je dozvoljena nadtemperatura bakrenih dijelova ≤ 25 K.

Kontaktne površine između bakrenih dijelova u rastavljivoj izvedbi pri normalnoj cirkulaciji ulja možemo opteretiti do 1A/mm^2, pri čemu je potrebno koristiti odgovarajući materijal vijčanog spoja.

Izvan kotla transformatora gustoće struja bakrenih dijelova su oko 1,5 A/mm^2, a kontaktne površine između plosnih izolatora i sabirnih šina postrojenja mogu biti opterećene do 0,5 A/mm^2.

Provodni izolatori pećnih transformatora u cijevnoj izvedbi kod kojih s unutarnje strane cijevi neometano cirkulira rashladna tekućina (voda s ulaznom temperaturom ≤ 35°C), pri čemu zagrijanje vanjske površine cijevi provodnika ne smije preći 105°C, mogu se opteretiti do 5,7 A/mm^2. Za cijevne provodne izolatore unutar kotla (pod uljem) su dozvoljena naprezanja bakra kao i kod plosnih provodnika.

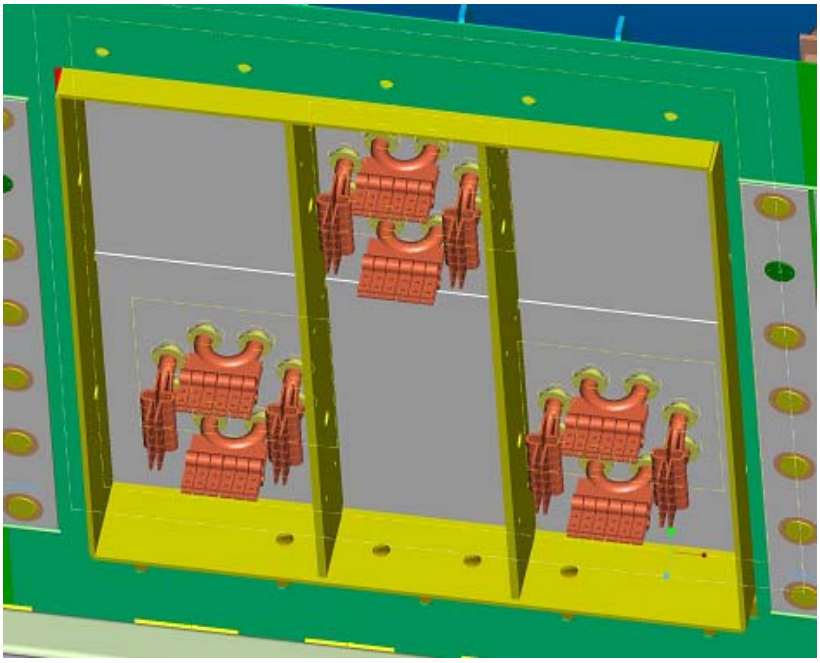
2.2.1.6 Nemagnetske ploče za provodnike sekundara

Već je naglašeno da visoke struje u sekundarnim priključcima prouzrokuju jaki izmjenični tok, a time i velike gubitke vrtložnih struja, stoga je potrebno provodnike ugraditi u ploču od nemagnetskog materijala. Ploča provodnika može biti izrađena od specijalnog polimernog izolacijskog materijala pojačanog posebnim staklenim vlaknima (duroplasti). Ovaj materijal modula elastičnosti 8700 N/mm^2 otporan je na povišene temperature (iznad 120°C) i neželjene kemijske reakcije s transformatorskim ulja. Potrebni razmaci od sabirnih šina priključaka do aluminijskih zaslona određuju dimenzije ploče provodnika koja mora izdržati naprezanja u procesu vakuumiranja.

Izvedba od duroplastnog materijala zahtijeva aluminijske zaslone uzdužne stranice kotla koji se ugrađuju unutar kotla prije utapanja aktivnog dijela. Aluminijski zasloni stranice kotla moraju biti obostrano hlađeni transformatorskim uljem. Da bi se omogućilo neometano cirkuliranje ulja između stranice kotla i aluminijskog zaslona, njihov razmak ne smije biti manji od 8 mm. Učvršćenje aluminijskih zaslona na stranicu kotla mora biti u izoliranoj izvedbi, a zaslon je potrebno uzemljiti na jednom mjestu odnosno dovesti na potencijal kotla / zemlje (**slika 2-16.**).

Provodnike je moguće ugraditi navlačenjem ploče na njih ili pak (što je jednostavnije) ugradnjom ploče s već ugrađenim provodnicima. Izvedba s već ugrađenim provodnicima u izolacijskoj ploči je otežana ili nemoguća ako se provodnici nalaze pri dnu kotla, odnosno ako im je nemoguće pristupiti zbog sabirnih šina.

Izolacijske ploče od duroplastnih materijala se koristi za ugradnju plosnih provodnika bez obzira radi li se o ispravljačkim ili pećnim transformatorima. Debljina izolacijske ploče se povećava s uvećanjem njenih dimenzija, no nesmije biti veća od 70 mm (ograničenje procesom izrade).



Slika 2-17: Vodom hlađeni cijevni provodnici

Drugi materijal od kojeg se može izraditi ploča provodnika je legura aluminija i magnezija koja se može toplinski očvrstiti i time postići bolja mehanička i toplinska svojstva (**slika 2-17.**). Vlačna čvrstoća ovih slitina je u rasponu od 275 do 350 N/mm^2 , s granicom tečenja 125 N/mm^2. Pri izboru aluminijske slitine potrebno je obratiti pažnju na postotak magnezija u njoj, jer se s porastom postotka magnezija smanjuje sposobnost zavarivanja.

Ploče za ugradnju provodnika od aluminija koriste se za ugradnju cijevnih provodnika pećnih transformatora, za provodnike pojedinih faza postavljene u trokut (triangularna izvedba) ili paralelno u vertikalnim redovima (koplanarna izvedba).

Dimenzije ploče određuju potrebni razmaci između grupa provodnika pojedinih faza, te razmaci između grupa provodnika do okvira, tako da dimenzije ploča ovise o nazivnoj struji koja protječe kroz grupu cijevnih provodnika. Za izradu aluminijskih ploča koriste se aluminijske slitine koje su mehanički stabilne i zavarive, jer ih je potrebno izraditi od više dijelova koji su međusobno nerastavljivo spojeni.

Osnovna ploča se izrađuje od dva dijela koji se spajaju uljno nepropusnim dvostrukim V zavarom, na osnovnu ploču se nakon nepropusnog zavara postavlja okvir i središnja učvršćenja za mehaničku stabilnost na vakuum (**slika 2-17.**). Prilikom izrade ove vrste nemagnetske (aluminijske) ploče potrebno je obratiti pažnju na skraćenje osnovnog materijala prilikom zavarivanja koje je znatno veće nego kod konstrukcijskih čelika.

Brtve i brtveni materijali moraju biti otporni na temperature iznad 120°C i negativne kemijske reakcije s transformatorskim ulja.

2.2.1.7 Kotao (Kućište transformatora)

Kotao transformatora je pravokutna posuda otporna na vakuum izrađena od konstrukcijskog čelika u zavarenoj izvedbi. Ovaj pasivni dio transformatora ispunjen je izolacijskim materijalom (transformatorskim uljem) u kojem se nalazi aktivni dio (jezgra i namoti) s priključcima koji su veza preko provodnih izolatora između dvije naponske razine: primara (mreže) i sekundara (potrošača). Aktivni dio transformatora je čvrsto vezan s kotlom transformatora preko poklopca ili pomoću elemenata za učvršćivanje između steznih elemenata aktivnog dijela i kotla.

Kotao transformatora je opterećen raznim opterećenjima koja su rezultat različitih procesa kroz koje transformator prolazi od montaže u tvornici do postavljanja na mjesto eksploatacije i priključenja između mreže i potrošača.

Popis procesa omogućuje pregled svih vanjskih i unutarnjih opterećenja na kotao:

- vakuumiranje (podtlak),
- punjenje transformatorskim uljem (nadtlak),
- transport transformatora do ispitne stanice (dinamička opterećenja),
- transport transformatora sa ili bez ulja (dinamička opterećenja),
- pretovar (dinamička opterećenja),
- dovođenje do mjesta eksploatacije i pozicioniranje (dinamička opterećenja),
- vakuumiranje (podtlak),
- punjenje transformatorskim uljem (nadtlak),
- pogon (mogućnost pojave nadtlaka uslijed zagrijanja izolacije),
- promjena ulja nakon revizije sklopke (vakumiranje i punjenje).

Svi ovi procesi mogu se sažeti u tri karakteristična procesa za koje je kotao potrebno dimenzionirati:

- vakuumiranje,
- punjenje transformatora,
- transport.

Vakuumiranje je proces pripreme transformatora za punjenje transformatorskim uljem u tvornici ili na mjestu njegove eksploatacije. Procesom vakuumiranja se izvlače sve nečistoće iz aktivnog dijela i kotla, te zaostala vlaga u kotlu i izolaciji koji su zaostali tijekom sušenja aktivnog dijela u posebnim pećima za sušenje izolacije. U procesu vakuumiranja su sve površine kotla opterećene na podtlak pa moraju za to biti dimenzionirane i stabilizirane (učvršćene) posebnim ukrućenjima. Potrebno je naglasiti da je prodornost toplog transformatorskog ulja veća od prodornosti vode pa je nemoguće ispitati propusnost zavara pomoću vode pod tlakom, nego se to mora raditi posebnim penetrantima. Kako bi se mogao provesti postupak vakuumiranja, kotao mora imati ventile za punjenje i pražnjenje na koje je moguće priključiti uređaj za vakuumiranje.

Punjenje transformatora je proces kojim se transformator puni izolacijskim transformatorskim uljem, što treba raditi preko najviše točke na kotlu transformatora kako se pumpa za punjenje ne bi nepotrebno opterećivala hidrostatskim tlakom ulja.

U transportu se javljaju dinamička opterećenja nosećih dijelova transformatora kao što su zavjesne ušice za podizanje cijelog transformatora, papuče za hidrauličke podizače, kotači za premještanje i pozicioniranje transformatora, dno kotla opterećenog težinom aktivnog dijela i izolacijskog ulja. Veze između aktivnog dijela i kotla transformatora potrebno je dimenzionirati za uvjete transporta koje određuje kupac ili transportna tvrtka.

Noseći dijelova transformatora dimenzioniraju se proračunom uz korištenje tablica dozvoljenih dinamičkih opterećenja ovih elemenata, određenih pomoću koeficijenata sigurnosti uvjetovanih vrstom opterećenja i izvedbom (kvalitetom) zavara. U slučaju kritičnih ili graničnih vrijednosti provode se dodatni proračuni pomoću metode konačnih elemenata.

Stranice kotla mogu se radi otpornosti na podtlak ukrutiti na dva načina, pomoću:

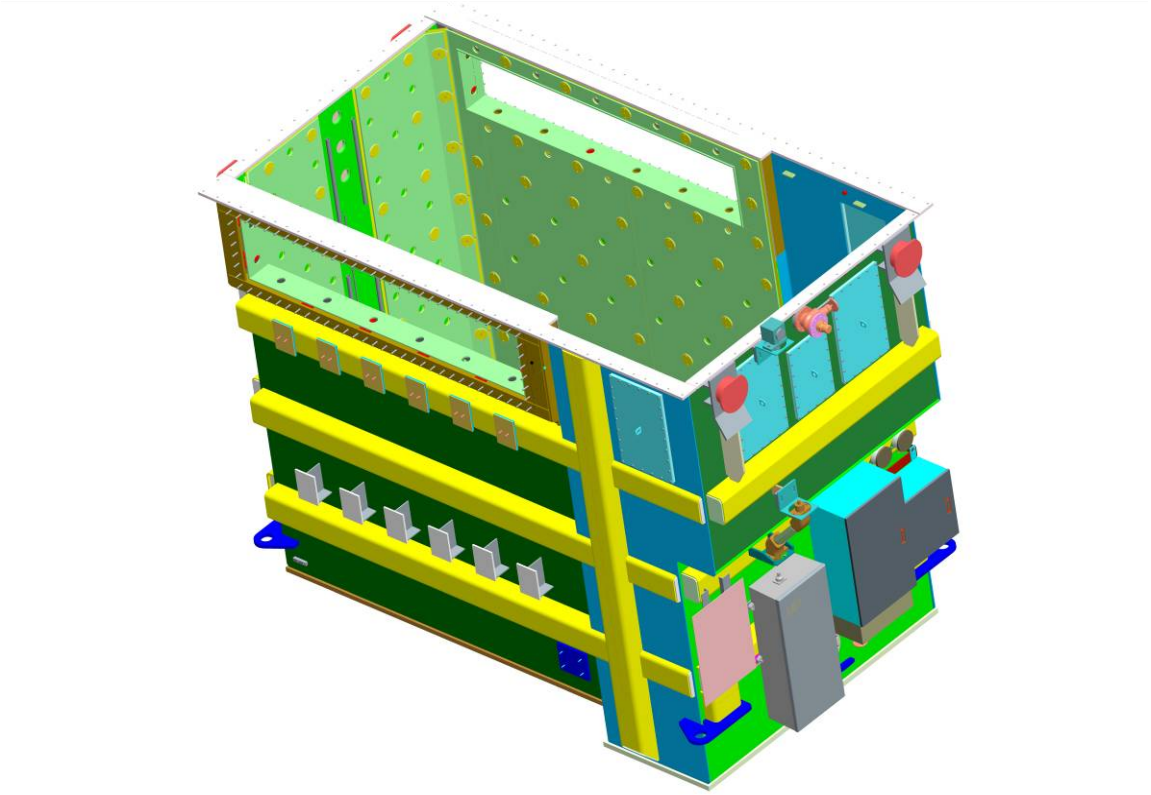
- vertikalnih ukruta (ako je visina kotla manja od duljine kotla),
- horizontalnih ukruta (ako je visina kotla veća od duljine kotla).

Vertikalne ukrute dimenzioniraju se proračunom za nosače s kontinuiranim opterećenjem (u konkretnom slučaju se radi o vakuum od 0,1 N/mm^2), pri čemu je udaljenost između dva oslonca jednaka visini kotla transformatora.

Horizontalne ukrute dimenzioniraju se pomoću izvedenih formula za okvirne nosače, pri čemu su dimenzije pravokutnog okvira jednake duljini i širini kotla transformatora. (**slika 2-18.**).

Dno kotla može biti izvedeno:

- kao debela ploča bez ukruta do debljine 45 mm
- kao ploča debljine 10…15 mm s adekvatno dimenzioniranim ukrutama.



Slika 2-18: Kotao ispravljačkog transformatora s horizontalnim ukrutama

Dno kotla dimenzionira se pomoću Clapeyronove (tromomentne) jednadžbe u slučaju više prevoznih slogova u nizu ili pomoću proračuna nosača između dva oslonca opterećenog složenim (kombiniranim) opterećenja, pri čemu je dno kotla transformatora opterećeno vertikalnim silama nastalim uslijed procesa vakuumiranja, težinom aktivnog dijela (uz pretpostavku da je aktivni dio transformatora homogeno-elastično tijelo konstantnog presjeka) i reakcijama u prevoznim slogovima. Ukoliko je debljina ploče dna transformatora veća od 45 mm prelazi se na izvedbu dna s pločom debljine 10..15 mm koje se ukrućuje rešetkastim ukrućenjima, pri čemu je potrebno obratiti pažnju na izvedbu poprečnih ukrućenja (ako su izrađena od dva dijela i čeono zavarena, zavar je opterećen na vlak). Ova izvedba dna nije ekonomski isplativa, bez obzira što je težina dna s rešetkastim ukrućenjima i do 35% manja od dna izrađenog od debele ploče. Nedostatak ove izvedbe je velik broj uzdužnih i poprečnih zavara koji produžuju i poskupljuju proces proizvodnje.

Standarde dijelove kao što su zavjesni komadi, papuče ili prevozni slogovi nije potrebno posebno dimenzionirati, već odrediti najveće opterećenje koje se u njima javlja. Na osnovi najvećeg opterećenja iz tablica standardnih dijelova odabire se prva veća vrijednost i pripadajući standardni element.

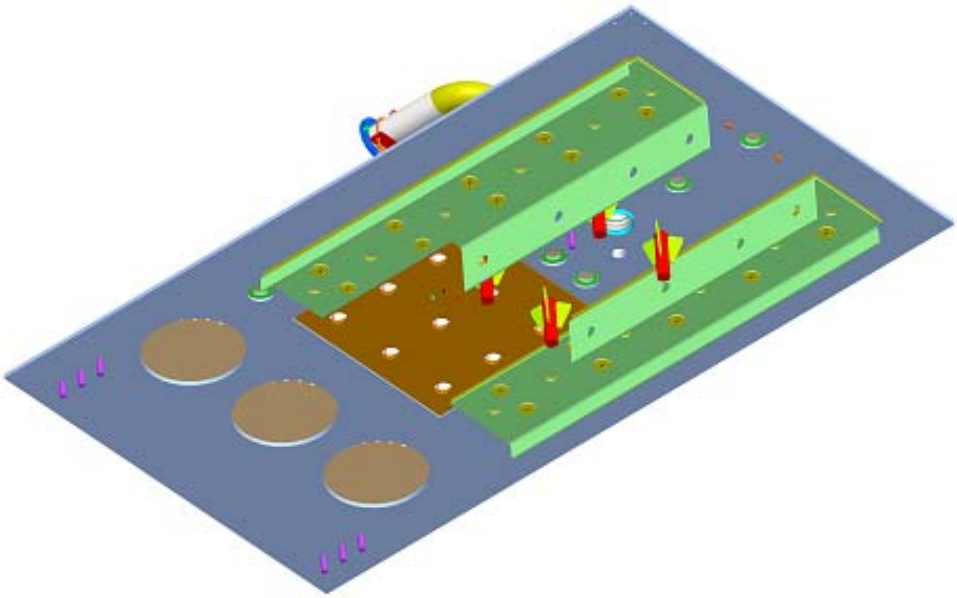
Industrijski transformatori se uglavnom ne izrađuju u putujućoj izvedbi jer je ukupna širina kotla u pravilu veća od transportnog profila željeznice. Ovi transformatori su projektirani za određeno industrijsko postrojenje pa se ne mogu priključiti na neko drugo. Priključivanje na drugo postrojenje zahtijevalo bi velike izmjene na priključcima sekundara transformatora ili samog postrojenja, što bi u potpunosti poništilo sve prednosti putujuće izvedbe. U slučaju standardne izvedbe industrijskih postrojenja različitih snaga moguće je razmišljati o izvedbi industrijskih transformatora u putujućoj izvedbi koji bi omogućili primjenu istog industrijskog transformatora na više mjesta, pri čemu bi se vrijeme ukapčanja moglo znatno reducirati kao i kod energetskih putujućih transformatora kod kojih se govori o uštedi od nekoliko radnih dana za ukapčanje i puštanje u proces eksploatacije.

2.2.1.8 Poklopac kotla

Poklopac kotla zatvara kotao transformatora i zajedno s kotlom čini kompaktnu cjelinu koju nazivamo kućište transformatora. Poklopac transformatora može biti pločast ili zvonast, ali je u oba slučaja izrađen od konstrukcijskog čelika u zavarenoj izvedbi. Veza između kotla i poklopca može biti rastavljiva ili nerastavljiva; kod industrijskih transformatora preferira se rastavljiva izvedba, koja može biti izolirana ili (češće) neizolirana.

Kako je već navedeno, kotao i njegov poklopac možemo opteretiti na različite načine. Kod poklopca se transport i naprezanja u transportu bez velike greške mogu u potpunosti zanemariti. Pri razmatranju opterećenja podtlakom i nadtlakom, vrijednosti podtlaka su znatno veće od nadtlaka jer se kod povećanja tlaka u kotlu (koje može nastati samo uslijed pojave plinova) pri vrijednosti od 0,08 N/mm^2 aktivira odušnik. Ova zaštita, pored zaštite Buchholzovim relejom, u potpunosti štiti kućište transformatora od negativnih utjecaja prilikom pojava plinova nastalih gorenjem izolacije ili ulja u aktivnom dijelu transformatora.

Debljina poklopca u ravnoj (**slika 2-19.)** i zvonastoj izvedbi određuje se pomoću tromomentne jednadžbe, pri čemu je treći oslonac podloga od prešane bukovine između gornjeg jarma i poklopca. Podloge se postavljaju direktno na jaram iznad stupova kako bi se izbjeglo dodatno opterećenje jarma između stupova prilikom vakuumiranja kućišta transformatora. Kod zvonaste izvedbe svako čvorište se zamjenjuje osloncem, a zatim se primjenjuje tromomentna jednadžba odnosno izvedene formule za okvirne nosače.



Slika 2-19: Ravni poklopac ispravljačkog transformatora

Na poklopcu postoje mnogobrojni otvori koji služe za montažu provodnika primara ili pak za pozicioniranje uređaja za zaštitu (priključne kutije strujnih transformatora, uzemljenje jezgre, otvori za montažu, otvori za džepove termometara i sl.). Svaki od tih otvora s pripadajućim prirubnicama dodatno ukrućuje poklopac i povećava krutost konstrukcije kućišta transformatora.

Za brtvljenje između poklopca i kotla koristi se ovalna brtva tvrdoće 70 Sh i temperaturne tolerancije do 120°C, koja se postavlja u utor napravljen od okruglih zavarenih profila, oni omogućuju pravilnu i ravnomjernu raspodjelu sila koje se javljaju prilikom zatezanja vijčanog spoja potrebnim zateznim momentom između poklopca i okvira kotla.

Za nazivne struje primara / sekundara (struje u provodnicima) > 1000 A potrebno je proračunom provjeriti da li je nužno u čeličnu ploču poklopca postaviti umetke od nemagnetskog čelika, kako bi se umanjio utjecaj izmjeničnog magnetskog toka između dva provodnika i time izbjeglo dodatno zagrijanje (zbog vrtložnih struja) u čeličnim dijelovima poklopca.

Kad se termometri za ulje pozicioniraju u posebne džepove na poklopcu, potrebno ih je postaviti direktno iznad aktivnog dijela kako bi izmjerene vrijednosti bile što bliže stvarnim vrijednostima.

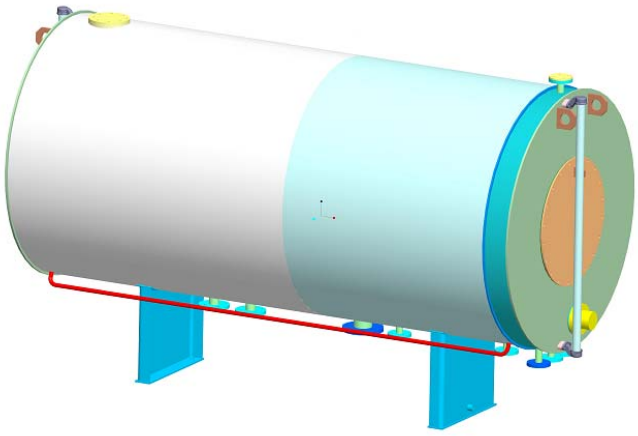
Već je spomenuto da povećanje temperature iznad dozvoljene (garantirane) izaziva brže starenje izolacije, a time i skraćenje vijeka trajanja transformatora. Zato je temperatura ulje ispod poklopca jedan od važnih pokazatelja stanja izolacije odnosno aktivnog dijela transformatora.

2.2.1.9 Konzervator i izolacijsko ulje

Transformatorsko ulje, pored izvrsnih izolacijskih svojstva, ima i veliku specifičnu toplinu pa tako konvekcijom bolje od zraka prenosi razvijenu toplinu aktivnog dijela na kotao i rashladne uređaje, a odatle na okolinu. Zbog promjene temperature ulje mijenja volumen pa je stoga nužno da kućište transformatora ima poseban prostor u kojem se ove promjene mogu neometano odvijati, a taj odvojeni prostor nazivamo konzervator transformatora. Konzervator transformatora je povezan s cijevi u kojoj se nalazi Buchholzova zaštita.

Buchholzova zaštita je nezamjenjivi dio zaštite svakog transformatora i omogućuje praćenje razvoja neželjenih plinova i naglih promjena volumena u konzervatoru. Plinovi se pojavljuju radi visoke temperature koja rezultira zagrijanjem izolacije transformatora. Naglo smanjenje volumena ulja u konzervatoru signalizira curenje ulja iz kućište transformatora. Transformator je prilikom gubitka ulja potrebno odmah isključiti kako ne bi došlo do većih šteta na njegovom aktivnom dijelu (proboj uslijed gubitka izolacijskog materijala). Za naglo povećanje volumena ulja u konzervatoru odgovorni su veći kvarovi kod kojih se plinovi jako brzo razvijaju, pa je i u tom slučaju transformator potrebno isključiti iz pogona [1, 2].

U konzervatoru se nalazi hladno ulje koje u kontaktu s vlažnim atmosferskim zrakom na sebe veže vlagu. Za sprečavanje prodiranja vlage iz zraka unutar konzervatora, potrebno je prostor koji omogućuje promjenu volumena ulja odvlaživati dehidratorima. Dehidrator može biti jako higroskopna kemikalija koja na sebe veže vlagu iz zraka ili poseban sušionik koji radi na principu grijača. Kemijski dehidratori se mogu regenerirati jednostavnim postupkom grijanja.
Odvajanje ulja vrećom (gumenom membranom) od okolnog zraka pokazalo se vrlo dobrim rješenjem i sve češće se zahtijeva od strane kupaca.



Slika 2-20: Konzervator ispravljačkog transformatora

Ulje podliježe kemijskim promjenama koje su uzrokovane povišenim temperaturama, a te kemijske promjene utječu na fizička svojstva ulja i sposobnost odvođenja topline. Iz toga se može zaključiti da je temperatura ulja u transformatoru jedan od važnih pokazatelja stanja i pojava u transformatoru. Neposredno prije punjenja transformatora, ulje treba filtriranjem i centrifugiranjem očistiti od nečistoća i nakupljene vode, a zagrijavanjem odvlažiti od zaostataka vlage nastalih dugim skladištenjem i transportom.

Konzervator je prilikom vakuumiranja opterećen istim opterećenjima kao i kućište transformatora, no dimenzioniranje se svodi na proračun cilindrične posude opterećene konstantnim kontinuiranim opterećenjem na unutarnjoj stijenci (**sliku 2-20.)**. Za veće duljine konzervatora potrebno je predvidjeti unutarnja ukrućenja u obliku prstenova, koja omogućuju bolju mehaničku stabilnost posude. Ravne stranice na koje se montiraju pokazatelji razine ulja u konzervatoru ukrućene (učvršćene) su kontrolnim otvorima (prirubnicama s poklopcom) koji služe za čišćenje i nanošenje antikorozivne zaštite. Ako se konzervator ne može postaviti direktno na poklopac, moguće ga je pomoću različitih izvedbi konzola postaviti na bilo koju stranicu kućišta, pri čemu je potrebno obratiti pažnju na zračne razmake do provodnih izolatora.

Prilikom određivanja reakcija u osloncima koriste se znanja iz statike, nauke o čvrstoci s posebnim naglaskom na zidne rešetkaste nosače uz neizbježno korištenje Cremoninog plana. Vijčani spoj za montiranje konzola konzervatora na stranice kotla zaštičuju se od naprezanja na odrez zavarenim pločama koje podupiru konzolu u vertikalnom smjeru, pri čemu zavarene ploče služe za pozicioniranje i postavljanje konzervatora na nosače. Neželjeni utjecaj jakog vjetra u bočnim smjerovima kompenzira se križnim nosačima između nosača konzervatora.

2.2.1.10 Hlađenje transformatora

Zadatak rashladnog sustava je odvođenje svih toplinskih gubitaka nastalih u pogonu, čime se osigurava potrebna životna dob transformatora. Gubitke dijelimo na gubitke u praznom hodu, gubitke zbog tereta i dodatne gubitke (vidi poglavlje 2.1.2.5).

Gubici praznog hoda (gubici u željeznoj jezgri) se mjere pokusom praznog hoda, u kojemu je iznos gubitaka jednak aktivnoj snazi koju transformator uzima kada je jedan namot priključen na nazivni napon nazivne frekvencije, pri čemu su ostali namoti otvoreni. Gubici praznog hoda ne ovise o opterećenju transformatora. Kako bi industrijski transformatori bili isplativiji, ove gubitke je potrebno držati na što nižoj razini. U današnjoj gradnji to se postiže korištenjem standardno orijentiranih limova za izradu jezgre u **STEP-LAP** izvedbi.

$$P_{\mathrm{O}} = \sum_{i=1}^{N} PFe_i \tag{37}$$

PFe_i [kW] …gubici u željezu aktivnog dijela

P_{O} [kW] …ukupni gubici u željezu svih aktivnih dijelova

N [-] …broj aktivnih dijelova transformatora

Gubici zbog tereta (gubici u namotima i priključcima) se mjere pokusom kratkog spoja, u kojemu je iznos gubitaka jednak aktivnoj snazi koju transformator uzima kada kroz jedan namot teče nazivna struja, pri čemu su stezaljke drugog namota kratko spojene. Gubici zbog tereta ovise o opterećenju transformatora i potrebno ih je mjerenjem potvrditi. Garantirane vrijednosti gubitaka nisu samo nužne za kapitalizaciju već i za određivanje sigurnosti transformatora u pogonu. Prilikom ovog pokusa gubitke u jezgri možemo zanemariti pošto je napon kratkog spoja u odnosu na nazivni napon vrlo nizak.

$$P_{\mathrm{K}} = \sum_{i=1}^{N} PCu_i \tag{38}$$

PCu_i [kW] …gubici tereta aktivnog dijela

P_{K} [kW] …ukupni gubici tereta svih aktivnih dijelova

Napon kratkog spoja (u_{K} = relativna vrijednost napona kratkog spoja izražena u % se određuje pokusom kratkog spoja kao napon (U_{K}) koji je potrebno priključiti na linijske stezaljke jednog namota da bi uz nazivni napon (U_{N}) potekla nazivna struja, uz kratko spojene stezaljke drugog namota.

$$u_{\mathrm{K}} = \frac{U_{\mathrm{K}}}{U_{\mathrm{N}}} \times 100 \tag{39}$$

Dodatni gubici su posljedica rasipnog toka koji u namotima, priključcima i metalnim dijelovima uzrokuje vrtložne struje. Proračun dodatnih gubitaka temelji se na statističkom praćenju izmjerenih dodatnih gubitaka energetskih transformatora, pri čemu ih zbog složenosti i raznolikosti priključaka ne možemo primijeniti u izračunavanju dodatnih gubitaka industrijskih transformatora. Ovisno o grupi spoja peći ili ispravljačkog postrojenja, ugrađenim elementima za upravljanje, procijenjenoj duljini (težini) priključaka moguće je pomoću empirijske formule (10) procijeniti vrijednosti dodatnih gubitaka. **FEM** programi danas omogućuju simuliranje pojava u pogonu transformatora, te je stoga nužna izrada modela na osnovi izvedbene tehničke dokumentacije u cilju određivanja stvarnih vrijednosti dodatnih gubitaka. Na dodatne gubitke u pogonu ispravljačkih i pećnih transformatora veliki utjecaj imaju i pojave nastale uslijed promjenjivog proizvodnog procesa u elektrolučnim pećima ili u procesu elektrolize. Stoga je kod elektrolučnih peći kritično uranjanje elektroda u peć dok se ne postigne stabilni proces, a kod ispravljačkih transformatora „neprirodne“ pojave uslijed „ispravljanja“ i „glađenja“ napona (pojava viših harmonika na primaru).

Gubici transformacije se očituju zagrijavanjem jezgre s namotima kao aktivnog dijela i zagrijavanjem priključaka i kućišta kao pasivnog dijela transformatora. Povišenje temperature prema okolini koja nastaje uslijed te transformacije naziva se zagrijanje ili nadtemperatura.

Transformator nije homogeno tijelo pa proces zagrijanja nije jednostavno opisati. Radi pojašnjenja složenosti, ovdje će se opisati pojave prijenosa topline u pojedinim dijelovima transformatora.

Toplina nastala u namotima i jezgri kondukcijom (vođenjem) putuje prema rashladnoj površini, prolazeći pri tome kroz metal i izolaciju te uzrokujući pad temperature proporcionalan toplinskom otporu puta i količini topline. Kondukcija topline karakteristična je za krute tvari u kojima nema razlike u makroskopskom gibanju čestica, pa se transport toplinske energije odvija samo na molekularnoj razini. Kondukcija topline završava na rashladnoj površini (npr. vodiču namota), točnije rečeno u graničnom sloju rashladnog medija (u promatranom slučaju transformatorsko ulje) neposredno uz rashladnu površinu. Granični sloj s jedne strane preuzima toplinu kondukcijom od rashladne površine, a toplina se dalje odvodi konvekcijom ugrijanih čestica rashladnog medija. Za fluide (transformatorsko ulje) je karakterističan prijenos topline koji se istovremeno odvija na makroskopskoj razini izmjenom mjesta i sudaranjem čestica fluida, unutar kojih se istovremeno odvija mikroskopski transport sudaranjem molekula.

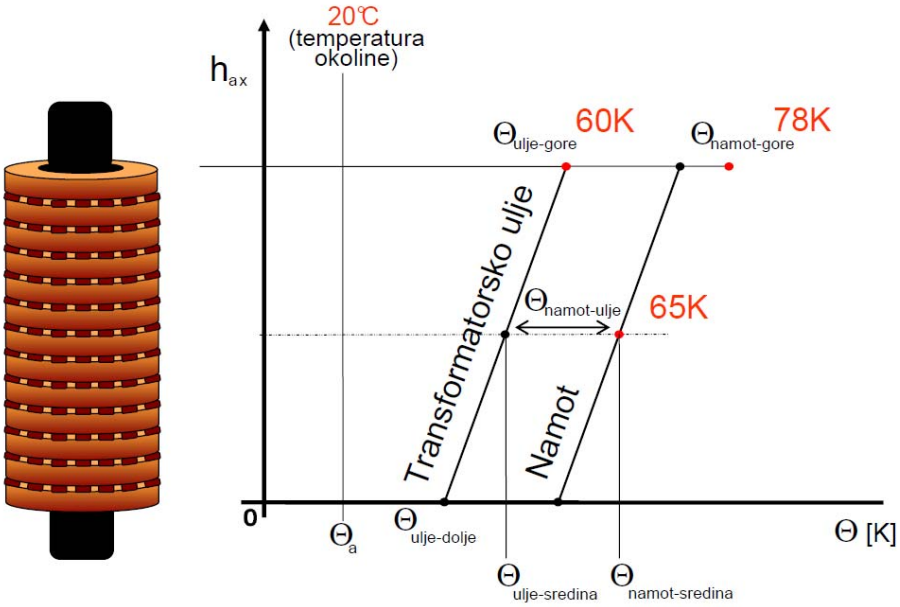
U graničnom sloju se ugrijane čestice rashladnog medija počinju gibati naviše, miješaju se s okolnim hladnijim rashladnim medijem, kojeg na taj način zagrijavaju, sukladno drugom zakonu termodinamike. Ovako zagrijan rashladni medij tjeran uzgonom struji naviše odnoseći sa sobom toplinu, dok na njegovo mjesto dolazi hladniji rashladni medij.

Za neometano cirkuliranje rashladnog medija potrebno je osigurati minimalni razmak između dvaju graničnih slojeva (uljni kanal 5mm) da se izbjegne prevelik otpor rashladnog medija. Radi boljeg odvođenja topline treba koristiti veći broja kanala za hlađenje, jer je tako moguće više specifično opteretiti limove jezgre (indukcija) i/ili namote (gustoća struje). U uljnim transformatorima se toplo ulje iznad namota odvodi u rashladne uređaje iz kojih se s nižom temperaturom vraća u kotao ispod namota. Najtoplija mjesta su namoti i jezgre gdje nastaju gubici, pri čemu su najugroženiji izolacijski materijali u namotima.

Najtoplije mjesto u namotu je teško izmjeriti pa je stoga potrebno kontrolirati srednje zagrijanje namota dok se najtoplije mjesto indirektno provjerava računski ili mjerenjem pomoću specijalnih sondi za mjerenje najtoplijeg mjesta („hot-spot“) u namotima.

Normalno starenje izolacije uljnih transformatora je određeno temperaturom od 98°C, što predstavlja zagrijanje najtoplijeg mjesta u namotu pri temperaturi okoline od 20°C (**slika 2-21.**). Prema Montsingerovom zakonu, trajno povišenje temperature za 6K skraćuje vijek trajanja izolacije na polovicu. Arrhenius ima nešto finiju razdiobu tako da ista zakonitost za skraćenje vijek trajanja je određena za 5,8K kod 98°C i 6,6K kod 120°C [1, 2, 4].

Velika vremenska konstanta zagrijanja ulja (do 4 sata) u odnosu na malu vremensku konstantu zagrijavanja namota (do 15min) mogla bi dovesti do krivog zaključka o temperaturi namota, pa je zato nužno neovisno pratiti temperaturu namota i temperaturu ulja radi pravilnijeg praćenja starenja izolacije i životne dobi transformatora.



Slika 2-21: Pojednostavljena raspodjela temperatura u transformatoru

$\Theta_{\text{ulje-max}}$	maksimalna temperatura ulja (ispod poklopca),
$\Theta_{\text{ulje-gore}}$	temperatura na ulazu u hladnjak,
$\Theta_{\text{ulje-sredina}}$	izračunata vrijednost srednje temperature ulja, $\Theta_{\text{ulje-sredina}}=\Theta_{\text{ulje-max}} - ½\cdot(\Theta_{\text{ulje-gore}}- \Theta_{\text{ulje-dolje}})$
$\Theta_{\text{ulje-dolje}}$	temperatura na izlazu iz hladnjaka,
$\Theta_{\text{namot-gore}}$	maksimalna temperatura namota („hot-spot“),
$\Theta_{\text{namot-sredina}}$	srednja temperatura namota,
$\Delta\Theta_{\text{namot-ulje}}$	temperaturni gradijent namota-ulje,
$\Delta\Theta_{\text{ulje-max}}$	maksimalno zagrijanje ulja (garantirana vrijednost), $\Delta\Theta_{\text{ulje-max}}=\Theta_{\text{ulje-max}} - \Theta_{\text{a}}$
$\Delta\Theta_{\text{namot-sredina}}$	maksimalno zagrijanje namota (garantirana vrijednost) $\Delta\Theta_{\text{namot-sredina}}=\Theta_{\text{namot-sredina}} - \Theta_{\text{a}}$.

Način odvođenja gubitaka ili jednostavno hlađenja transformatora označava se s četiri slovna znaka prema **IEC**-u (**tablica 2-3.**), pri čemu je potrebno obratiti pažnju na redoslijed slovnih oznaka u označavanju rashladnog sustava transformatora (**tablica 2-4.**).

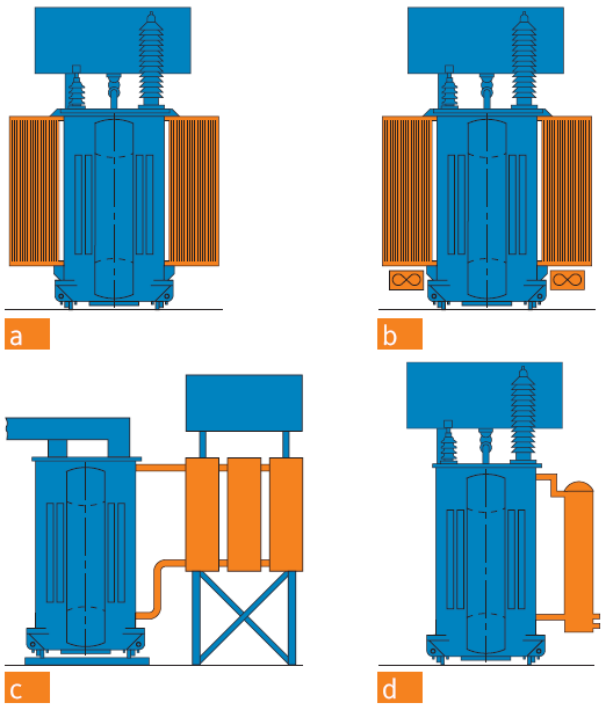
Vrsta rashladnog sredstva	Oznaka
mineralno ulje ili ekvivalentna zapaljiva tekućina s točkom paljenja ≤ 300°C	O
zapaljiva tekućina s točkom paljenja > 300°C	K
nezapaljiva tekućina	L
plin	G
voda	W
zrak	A
Način strujanja rashladnog sredstva	**Oznaka**
prirodno	N
prisilno (neusmjereno u namotima)	F
prisilno (usmjereno u namotima)	D

Tablica 2-3: Oznake načina hlađenja transformatora prema IEC-u

1. slovo	2. slovo	3. slovo	4. slovo
označava rashladno sredstvo u dodiru s namotima		označava rashladno sredstvo u dodiru s vanjskim rashladnim sredstvom	
vrsta sredstva	način strujanja	vrsta sredstva	način strujanja

Tablica 2-4: Redoslijed slovnih oznaka u označavanju rashladnog sustava transformatora

Osnovne vrste hlađenja industrijskih (energetskih) transformatora prikazane su na **slici 2-22.**, pri čemu se radi viših specifičnih opterećenja bakra (namota) kod većih snaga koriste rashladni sustav OFWF i ODWF.



Slika 2-22: Vrste hlađenja uljnih transformatora:
(a) prirodno hlađenje preko ugrađenih hladnjaka ONAN,
(b) dodatno hlađenje preko ugrađenih ventilatora ONAN / ONAF,
(c) hlađenje odvojenim hladnjacima ONAN / ONAF,
(d) voda kao vanjski rashladni medij OFWF / ODWF.

2.2.1.11 Rezime projektne osnove industrijskih transformatora

Industrijski transformatori kao posebna podgrupa energetskih transformatora zahtijevaju od projektanta širok spektar znanja iz područja energetske elektronike, metalurgije, elektrotehnike, strojarstva i tehnologije. Aktivni dio transformatora se sastoji od namota i jezgre, dok sve ostale dijelove nazivamo pasivnim dijelom transformatora, jer ne sudjeluju u neposrednoj transformaciji električne energije. Ovisno o grupi spoja, načinu regulacije, zahtjevima iz tehničke specifikacije ova vrsta transformatora možu imati i nekoliko aktivnih dijelova, stoga je potrebno obratiti posebnu pažnju na njihove funkcionalne veze.

Zanemarivanje pasivnih dijelova industrijskih transformatora je najčešći uzrok havarije, jer su kvarovi ili greške na aktivnom dijelu zanemarivi. Spoj između pojedinih zavoja namota (kratki spoj u namotu), povećana zagrijanja u jezgri/namotima ili oslabljivanje steznog spoja između namota i steznika jezgre se mogu bez velike greške u potpunosti isključiti, jer mogu nastati samo uslijed pojave nedozvoljenih opterećenja u pogonu i otkazivanja elemenata zaštite industrijskog postrojenja.

2.3 FUNKCIONALNE VEZE KOMPONENTI

2.3.1 Komponente industrijskih transformatora

U poglavlju 2.1.2 navedeni su načini regulacije napona na sekundarnoj strani. Direktna regulacija mijenjanjem broja zavoja na primaru je najjednostavnija i najekonomičnija izvedba regulacije napona sekundara.

Nedostatak direktne regulacije je u relativno malom opsegu regulacije napona najviše 17 koraka (18 položaja), što je ograničenje uvjetovano regulacijskom sklopkom. Direktna regulacija se stoga koristi kod regulacije napona pećnih transformatora manjih i većih snaga s ugrađenom prigušnicom, naponskog reda primara do 30 kV.

Pećni transformatori većih snaga i višeg naponskog reda primara izvode se pomoću dva aktivna dijela. Prvi aktivni dio se naziva regulacijski transformator (**RT**). Regulacijski transformator pretvara napon mreže na međunapon od 30 kV. Ovaj međunapon nam služi kao ulazni napon glavnog transformator (**GT**). Glavni transformator vrši konačnu transformaciju na željeni napon i struju sekundara potrebnog za proces industrijskog postrojenja.

U procesu elektrolize i drugim procesima gdje je nužno održavati istosmjernu struju na konstantnoj vrijednosti, potrebno je regulirati sekundarni napon preko primarne strane u intervalu od nazivnog napona do nule. Ova regulacija zahtijeva veći broj koraka što nije fizički moguće izvesti s jednim aktivnim dijelom i osnovnim položajem namota industrijskih transformatora (**slika 2-3.**).

Izvedba s dva aktivna dijela omogućuje izvedbu regulacije predbiranjem (podjela na grubu i finu regulaciju) ili prekretanjem (±). Glavna izolacija, namoti i priključci regulacije regulacijskog transformatora su u potpunosti jednaki onima koje koristimo u izradi energetskih transformatora.

Za naglasiti je da se kod ove izvedbe naponski red regulacijskog transformatora ne razlikuje od naponskog reda glavnog transformatora, te da mu glavni zadatak nije transformacija napona, već fizička izvedba fine regulacije u više koraka. Fina regulacija istosmjernog napona se postiže premagnetiziranim zasićenim prigušnicama (transduktorima, vidi poglavlje 2.2.1.4) ili tiristorima u ispravljačkom postrojenju.

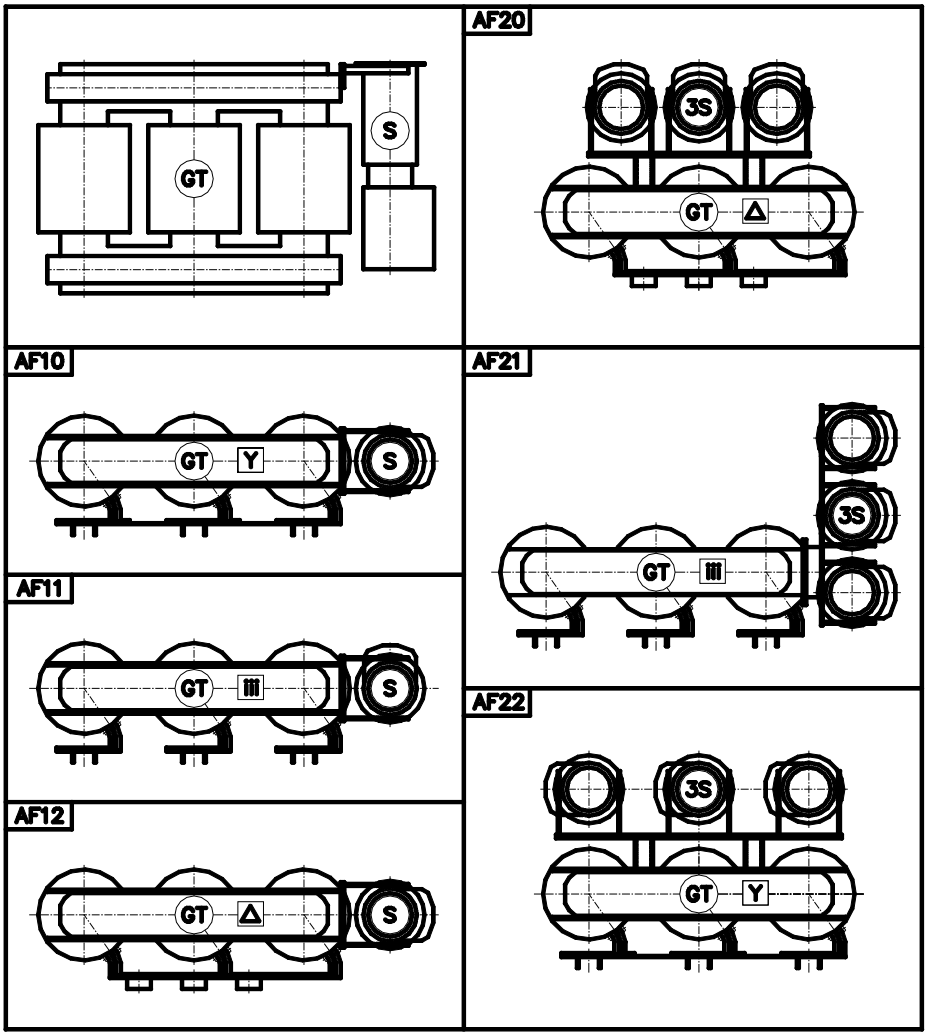
Područje fine regulacije se ograničava na jedan do dva koraka regulacijske sklopke, kako bi se u tom području omogućilo fino glađenje napona koje nije moguće postići grubom regulacijom pomoću sklopke. Svaka promjena koraka regulacije dovodi do trošenja kontakata i onečišćenja ulja sklopke, pa se može zaključiti da transduktori ili tiristori pored glađenja napona omogućuju i zaštitu u radu regulacijske sklopke. Ulje u sklopci je odvojeno od ulja u transformatoru, a konzervator transformatora je izrađen od dvije fizički odvojene komore koje onemogućuju miješanje ulja sklopke i transformatora.

Industrijski transformatori mogu biti izvedeni na više načina, a prilikom izrade osnutka projektnog rješenja potrebno je obratiti pažnju na:

- dimenzije prostorije u koju se smješta transformator,
- položaj i vrsta priključaka između transformatora i industrijskog postrojenja,
- način regulacije napona,
- vrsta hlađenja,
- želje kupca.

2.3.2 Pećni transformatori s direktnom regulacijom

Izvedbe s oznakama AF10 do AF12 su predviđene za izradu pećnih transformatora za naponsku razinu primarne strane do 30 kV i maksimalne fazne struje do 600 A (cca. 35 MVA), dok su izvedbe s oznakama AF20 do AF22 predviđene za izradu pećnih transformatora veće nazivne snage iste naponske razine, maksimalne fazne struje do 1500 A (cca. 130 MVA u spoju Dd0).



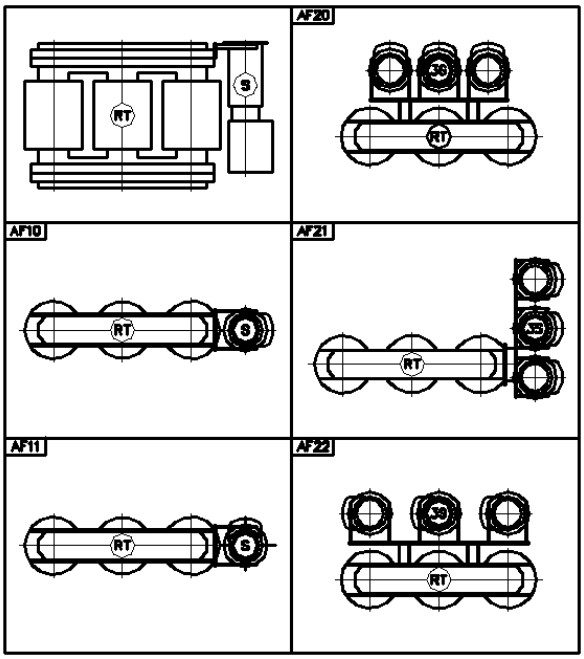
Tablica 2-5: Pećni transformatori s direktnom regulacijom

Karakterističnim izvedbom se objedinjuju više sličnih izvedbi iz gore navedene tablice (**tablica 2-5.**). Tako da se izvedbe AF10, AF11 i AF12 objedinjuju karakterističnom izvedbom AF10, te AF20 i AF22 izvedbom AF20. Na ovaj način svode se dosada izvedeni pećni transformatori s provodnicima na uzdužnoj stranici kotla u tri osnovne forme.

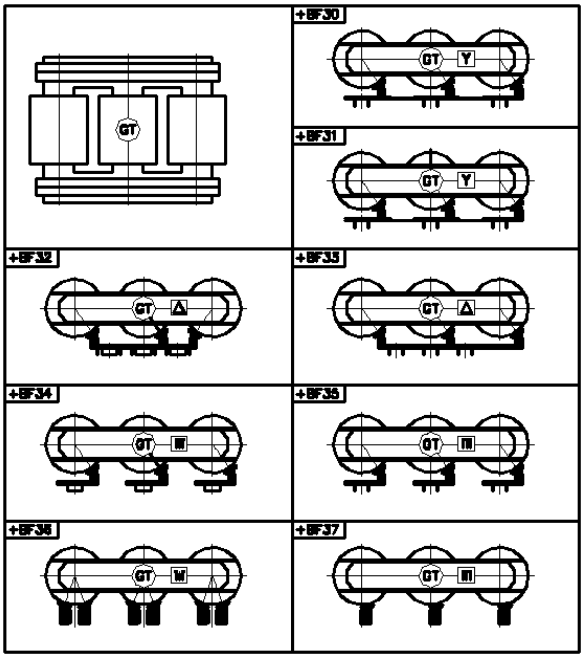
Izvedba AF21 se koristi kod izvedbe pećnih transformatora s prigušnicom u istom kotlu, naravno zarotiranom za 180° u odnosu na **GT**, pri čemu je oblik kvalitativno identičan **GT**.

2.3.3 Pećni transformatori (regulacija ulaznim naponom)

Za ovu vrstu regulacije neophodna su dva aktivna dijela. Regulacijski transformator (**RT**) omogućuje transformaciju visokog napona primara (do 220 kV) na međunapon 30 kV koji služi za napajanje primarnog namota glavnog (pećnog) transformatora (**GT**). Regulacija napona u ovoj izvedbi provodi se na regulacijskom transformatoru, pa je međunapon kojim se napaja glavni transformator već „reguliran“, a samim time i napon sekundara.



Tablica 2-6: Regulacijski transformator



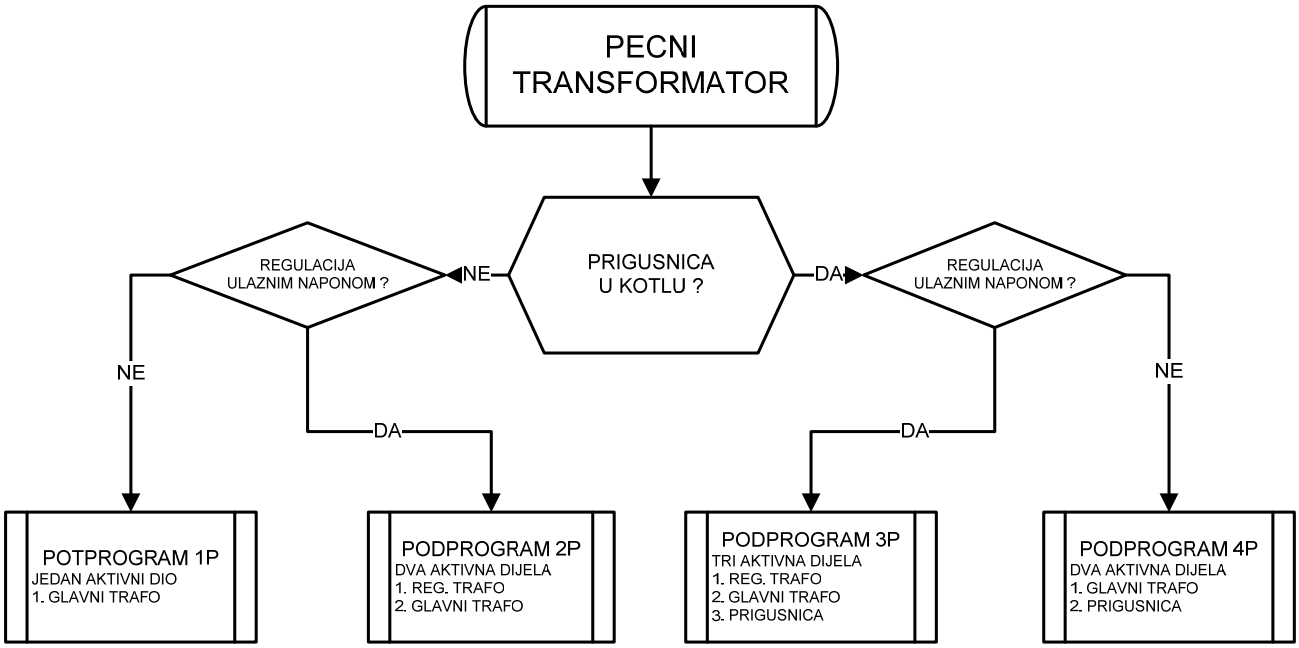
Tablica 2-7: Glavni (pećni) transformator

Na osnovi izvedbi u tablici za regulacijske (**tablica 2-6.**) i glavne transformatore (**tablica 2-7.**) moguće je dobiti 40 različitih kombinacija za pećne transformatore kod kojih se regulacija provodi regulacijom ulaznim naponom.

Izvedbe AF10 i AF11 objedinjuju se izvedbom s oznakom AF10, AF20 i AF22 s AF20. Kod glavnog transformatora izvedbe od BF30 do BF35 se mogu objediniti izvedbom BF30, a BF36 i BF37 s BF36.

Na ovaj način svedene su 40 kombinacija na 6 osnovnih, kojima je moguće opisati do sada izrađene pećne transformatore s dva aktivna dijela i regulacijom ulaznim naponom bez prigušnice. Za izvedbu s prigušnicom u istom kotlu kod regulacije ulaznim naponom koristi se izvedba A22 koja je reprezentant izvedbe A20 i A22.

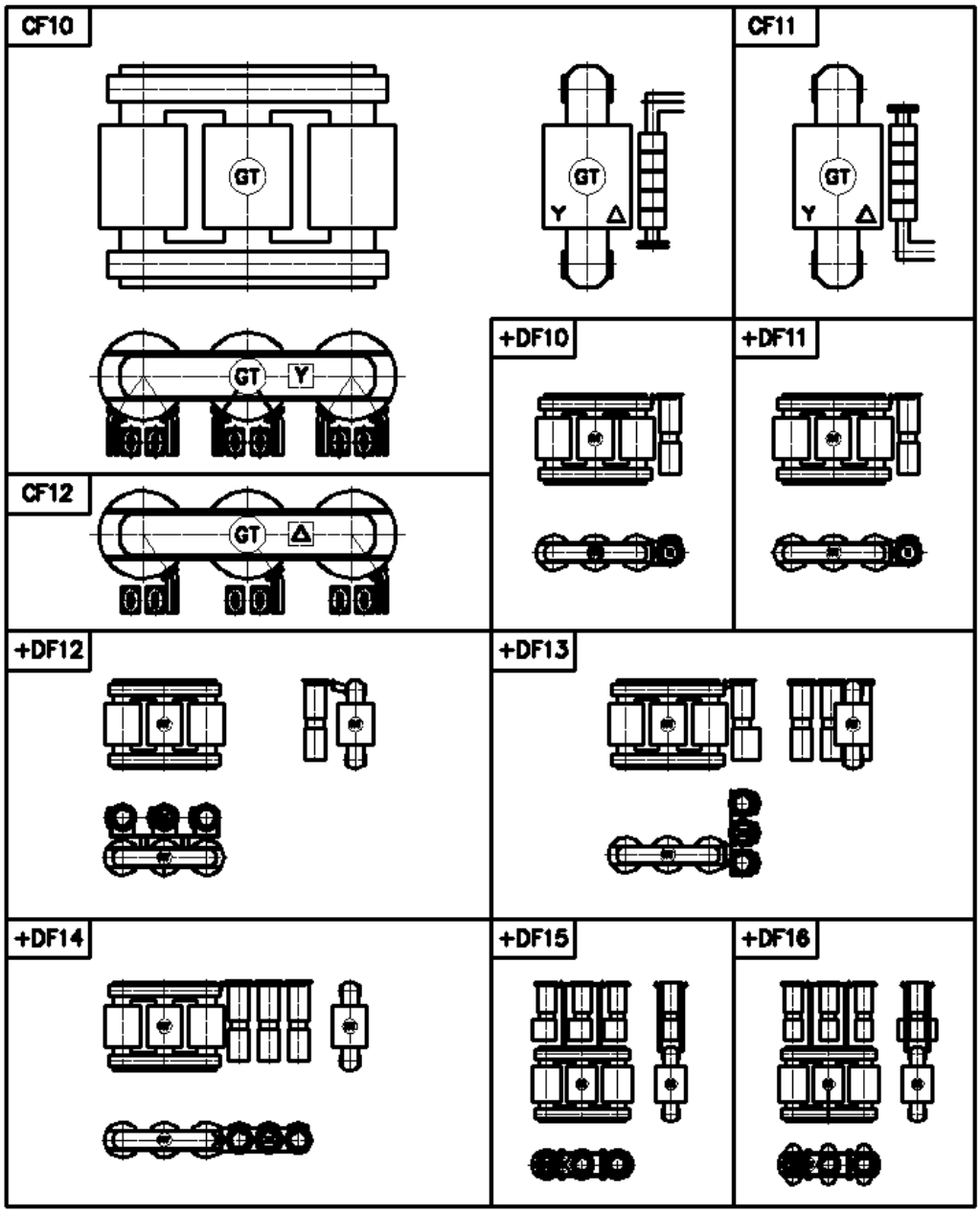
2.3.4 Dijagram toka odlučivanja u projektiranju pećnih transformatora



Slika 2-23: Dijagram toka pećnih transformatora

2.3.5 Ispravljački transformatori (6-pulsna izvedba)

Kao i kod pećnih transformatora, za ovu vrstu regulacije potrebna su dva aktivna dijela. Regulacijskim transformatorom omogućava se veći opseg regulacije radi održavanja konstantne struje sekundara glavnog transformatora nužne za procese (npr. elektrolizu) u industrijskom postrojenju. Transformator u štednom spoju (autotransformator) se nameće kao praktično (optimalno) rješenje za izvedbu regulacijskog transformatora (vidi poglavlje 2.1.3.2).



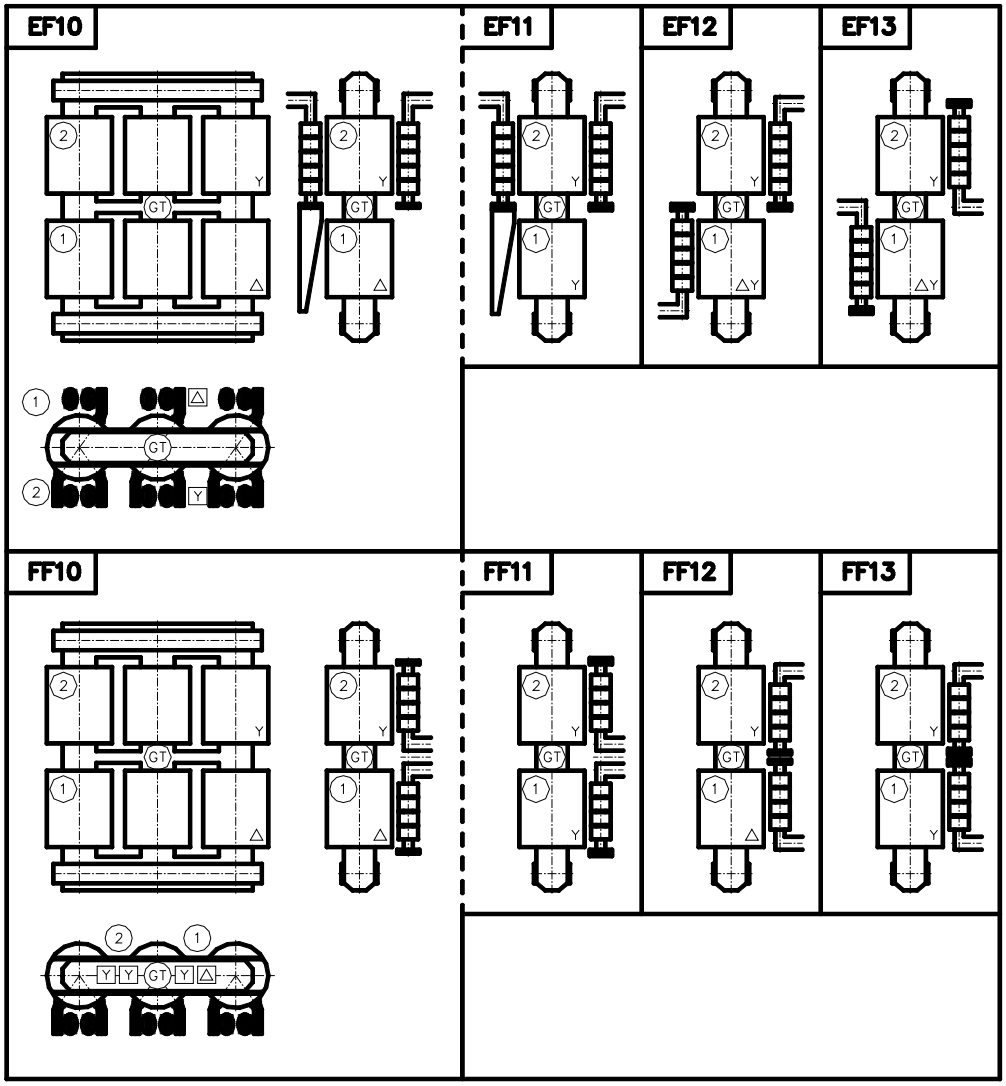
Tablica 2-8: Ispravljački transformatori (jednokatna izvedba)

Nakon komprimiranja preostale su ove karakteristične forme: CF10, DF10, DF12, DF13, DF14 i DF15 (**tablica 2-8.**). Pomoću ovih 5 kombinacija mogu se opisati do sada izrađeni ispravljački transformatori s regulacijom ulaznim naponom i dva aktivna dijela u jednokatnoj izvedbi.

2.3.6 Ispravljački transformatori (12-pulsna izvedba)

Za 12-pulsno upravljanje potrebna su dva 6-pulsna aktivna dijela ili jedan aktivni dio u dvokatnoj izvedbi. Dva aktivna dijela zahtjevaju više prostora u kotlu ili čak dva kotla ispunjena izolacijskim medijem (transformatorskim uljem), tako da se aktivni dio u dvokatnoj izvedbi nameće kao optimalno rješenje za 12-pulsne ispravljačke transformatore.

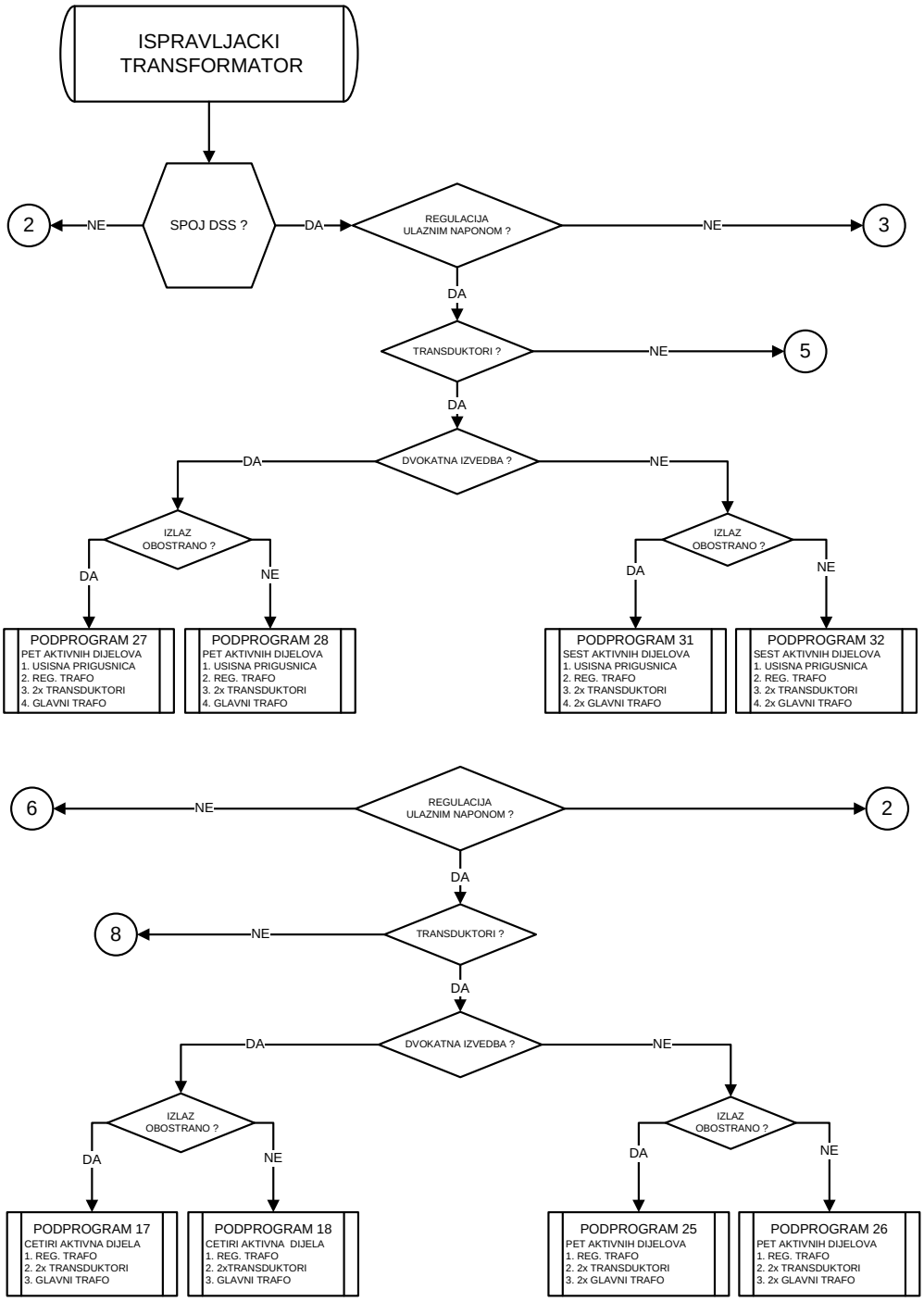
Izvedba s dva aktivna dijela objašnjena je u prethodnom poglavlju, a karakteristične forme za dvokatnu izvedbu dane su u **tablici 2-9**. Regulacijski transformator opisan je u prethodnom poglavlju (**tablica 2-8.**).



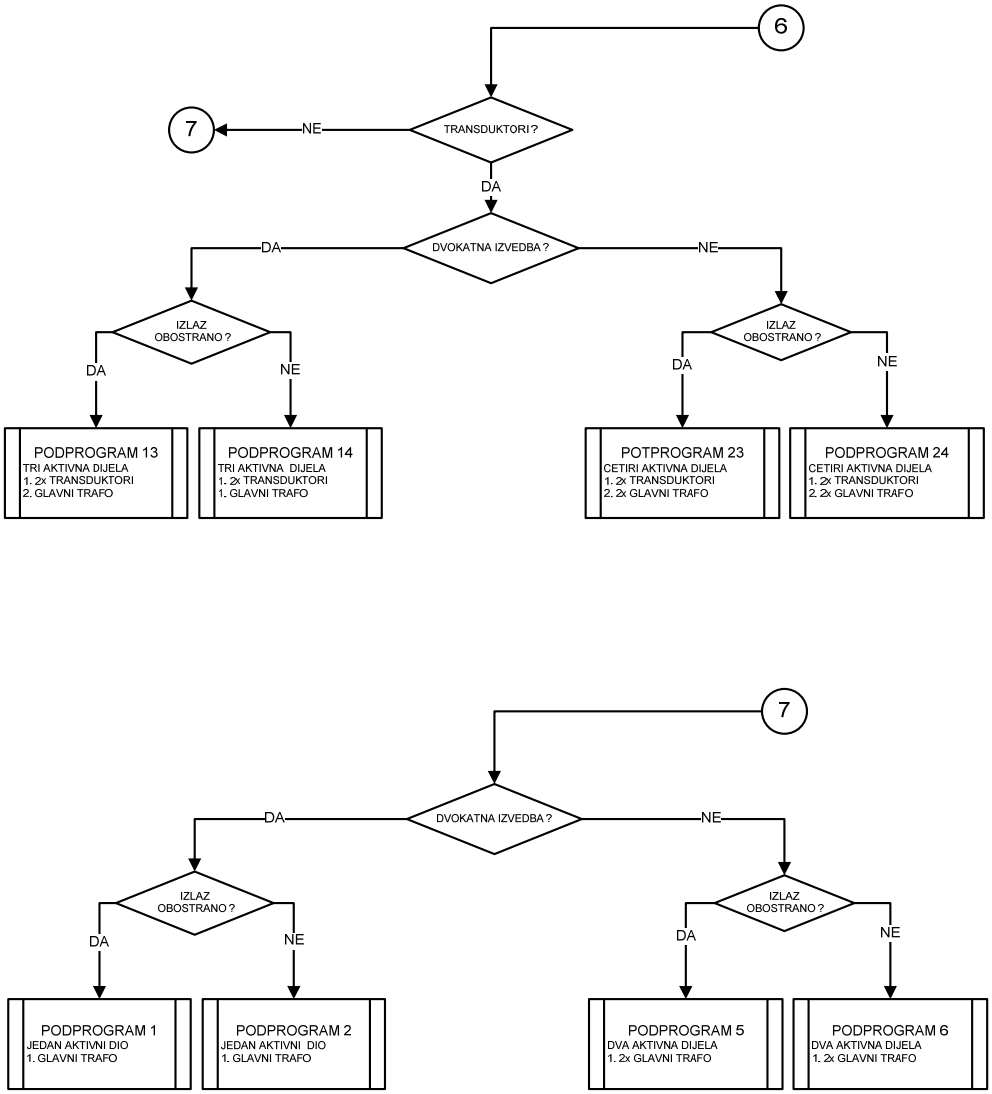
Tablica 2-9: Ispravljački transformatori (dvokatna izvedba)

Nakon komprimiranja preostale su ove karakteristične forme: EF10, FF10, DF10, DF12, DF13, DF14 i DF15. EF10 može se kombinirati samo s DF12 i DF15. Ovih 7 kombinacija opisuju do sada izrađene ispravljačke transformatore s regulacijom ulaznim naponom i dva aktivna dijela, pri čemu je ispravljački transformator izveden u dvakatnoj izvedbi sa i bez međujarma.

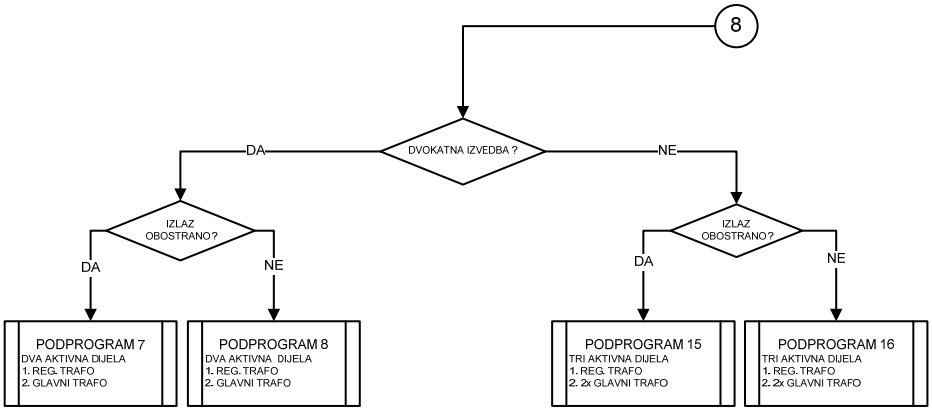
2.3.7 Dijagram toka odlučivanja u projektiranju ispravljačkih transformatora



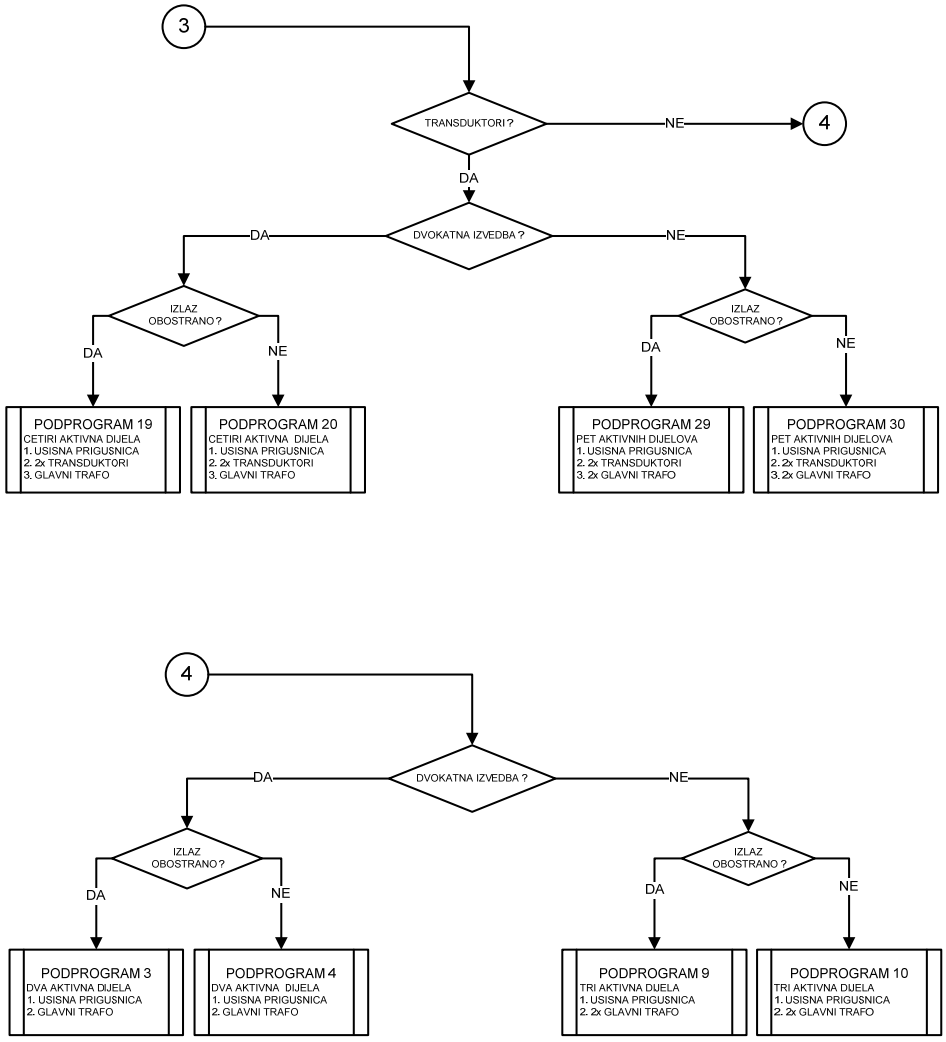
Slika 2-24: Odabir grupe spoja i vrste regulacije za **DB**-spoj



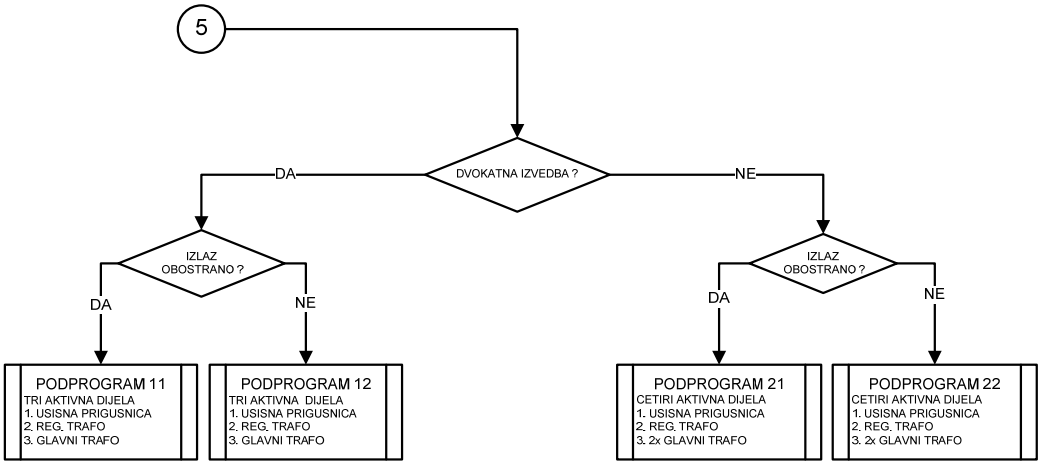
Slika 2-25: Odabir izvedbe aktivnog dijela za **DB** spoj



Slika 2-26: Odabir izvedbe aktivnog dijela bez transduktora za **DB** spoj



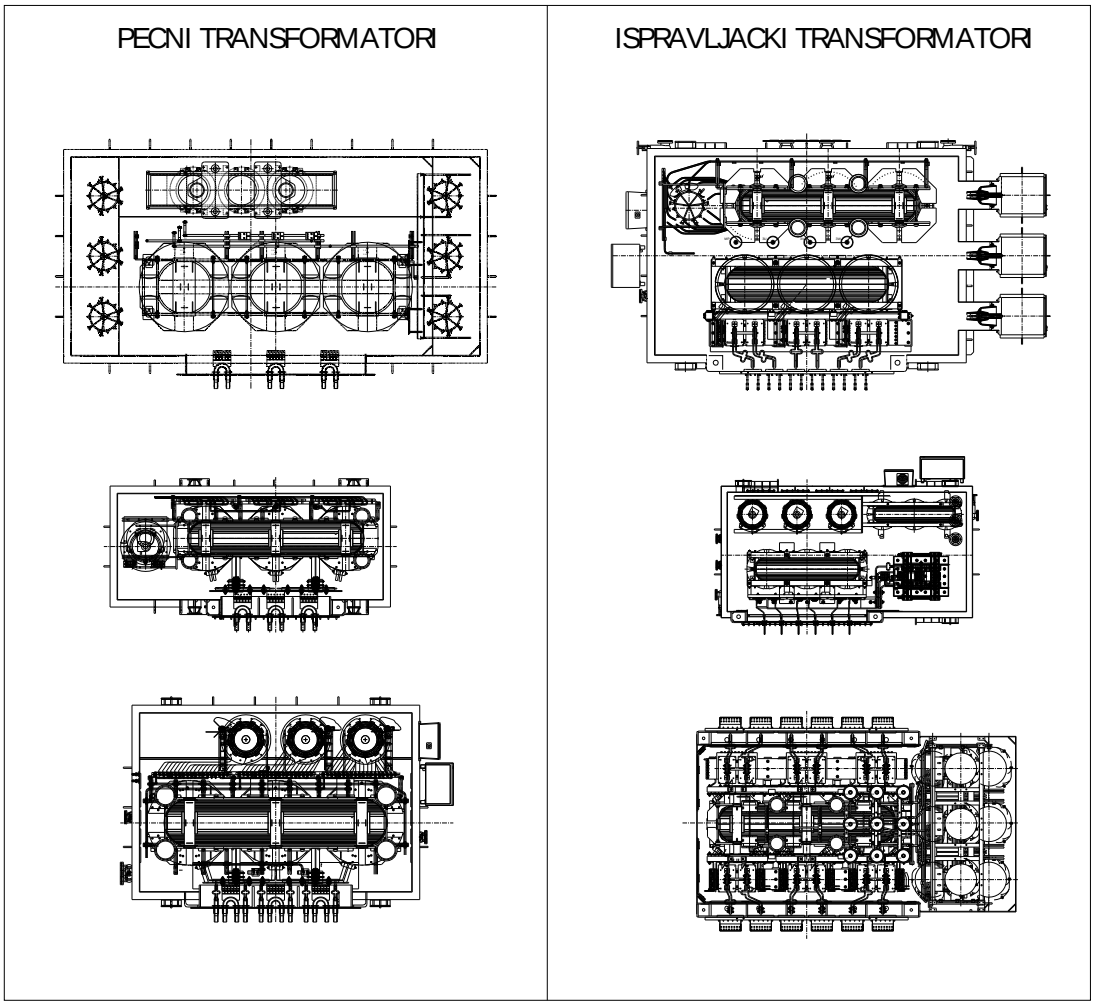
Slika 2-27: Odabir izvedbe aktivnog dijela za **DSS** spoj



Slika 2-28: Odabir izvedbe aktivnog dijela bez transduktora za **DSS** spoj

2.3.8 Primjeri industrijskih transformatora

Konstrukcijska rješenja iz **tablice 2-10.** neka su od izvedbi dosad izrađenih industrijskih transformatora, pri čemu se kod ispravljačkih transformatora najčešće obrađuje konvencionalno glađenje napona transduktorima, a pećni transformatori na sekundarnoj strani ne prelaze iznose struje od 100 kA.



Tablica 2-10. Primjeri industrijskih transformatora

Položaj i veza s industrijskim postrojenjem odlučujući su faktori u izradi projektno-konstrukcijskog rješenja. Izmjene postrojenju ili promjena položaja priključaka s postrojenjem su neprihvatljive iz dva razloga: vrijednost izmjena veća je od vrijednosti transformatora i vrijeme potrebno za izvedbu ovih izmjena direktno utječe na proizvodni proces postrojenja, a time i njegovu rentabilnost.

U današnje vrijeme, kada je povećanje produktivnosti vezano s rentabilnošću postrojenja, pojavljuje se jedan paradoks da se „stari“ transformator, za kojeg je postrojenje izvedeno, zamjenjuje novim kojemu je nazivna snaga i do 20% veća.

Zakon sličnosti u gradnji transformatora govori da će se uslijed ovog zahtjeva (povećanje snage) dimenzije aktivnog dijela, a time i dimenzije transformatora, povećati.

Kako bi se ispunili svi zahtjevi kupca u izradi projektno-konstrukcijskog rješenja potrebno je primijeniti metodu projektiranja od priključaka postrojenja prema transformatoru, što je naravno u suprotnosti s dosadašnjim principima. Stoga je potrebno odabrati adekvatnu metodu i postupak u traženju optimalnog rješenja.

3 METODE OPTIMALNOG PROJEKTIRANJA

3.1 UVOD

Područje projektiranja i optimiranja industrijskih transformatora je nedovoljno istraženo sa znanstvenog aspekta. Proučavanjem literature u kojoj se analizira ova i slična problematika te na osnovi dugogodišnje prakse u konstruiranju utvrđeno je da za projektiranje optimalne konstrukcije ne postoji jedinstveni model i „najbolja“ metoda. Za razvoj metoda optimiranja mjerodavno je praktično iskustvo koje je potrebno potkrijepiti znanstveno postavljenim modelom.

Projektanti i konstrukteri svojim stručnim znanjem koje je sastavni dio projektne baze i neophodnim znanjima iz osnova teorije optimiranja su nezaobilazni partner u izradi potrebnih alata za optimiranje proizvoda i proizvodnih procesa.

Kao korisnici programa za optimiranje koji je pouzdan, točan i jednostavan za korištenje, oni su u mogućnosti kvalitativno i kvantitativno unaprijediti projektno-konstrukcijska rješenja u cilju bolje konkurentnosti na tržištu, pri čemu im je korištenjem jednostavnog alata ostavljeno dovoljno vremena za posvećivanju postavljenom projektno-konstrukcijskom zadatku i njegovom rješavanju.

Slijed projektiranja tehničkog sustava može se podijeliti u dva osnovna koraka:

- izbor strukture sustava (strukturalna sinteza),
- izbor brojčanih vrijednosti parametara strukture (sinteza parametara).

3.1.1 Strukturalna sinteza

Glavni zadatak stvaralačkog djelovanja inženjera (konstruktera) jest strukturalna sinteza. Struktura projektno tehničkog sustava (proizvoda) određena je poznatim skupom elemenata strukture i njihovim međuvezama. Formalne metode rješenja strukturalne sinteze primjenjuju se samo na manji broj zadataka, ako pak gledamo u općenitom smislu ova zadaća je za sada još uvijek neriješena.

Formalizacija problema strukturalne sinteze svoje poteškoće ima u formalno nedefiniranim vezama između pojedinih elemenata i zahtjeva, kvalitativnim i kvantitativnim kriterijima, pod kojima podrazumijevamo neformalni opis funkcioniranja projektnog objekta, zahtjevi vezani za funkcioniranje objekta i naravno nemjerljivim karakteristikama elemenata strukture.

Skup znanja iz različitih područja tehnike, iskustvo u izradi početnog idejnog rješenja, intuicija i kreativnost, stručna literatura, izvedeni projekti, sposobnost generiranja informacija, različite metode projektiranja su temelj (baza) sinteze tehničkih sustava (projekta). Projektnim parametrima se nazivaju sve veličine kojima definiramo elemente strukture i veze između njih.

3.1.2 Cilj projektiranja

U današnje vrijeme svjetske konkurencije od presudne je važnosti da je projektirani sustav (proizvod) najbolji ili što bolji, pri čemu je besprijekorno funkcioniranje neupitno ili bolje rečeno temeljni preduvjet izlaska na tržište.

Postoje različiti kriteriji prema kojima se može neki sustav (proizvod) vrednovati. Neki od kriterija mogu biti cijena, težina, efikasnost, praktičnost, trajnost itd. Odabir dominantnog kriterija predstavlja stratešku odluku na samom početku procesa projektiranja.

Kvantitativna usporedba odabranih kriterija služi za ocjenu kvalitete projektnog sustava (proizvoda) i kao takva mora biti opisana funkcijom projektnih parametara.

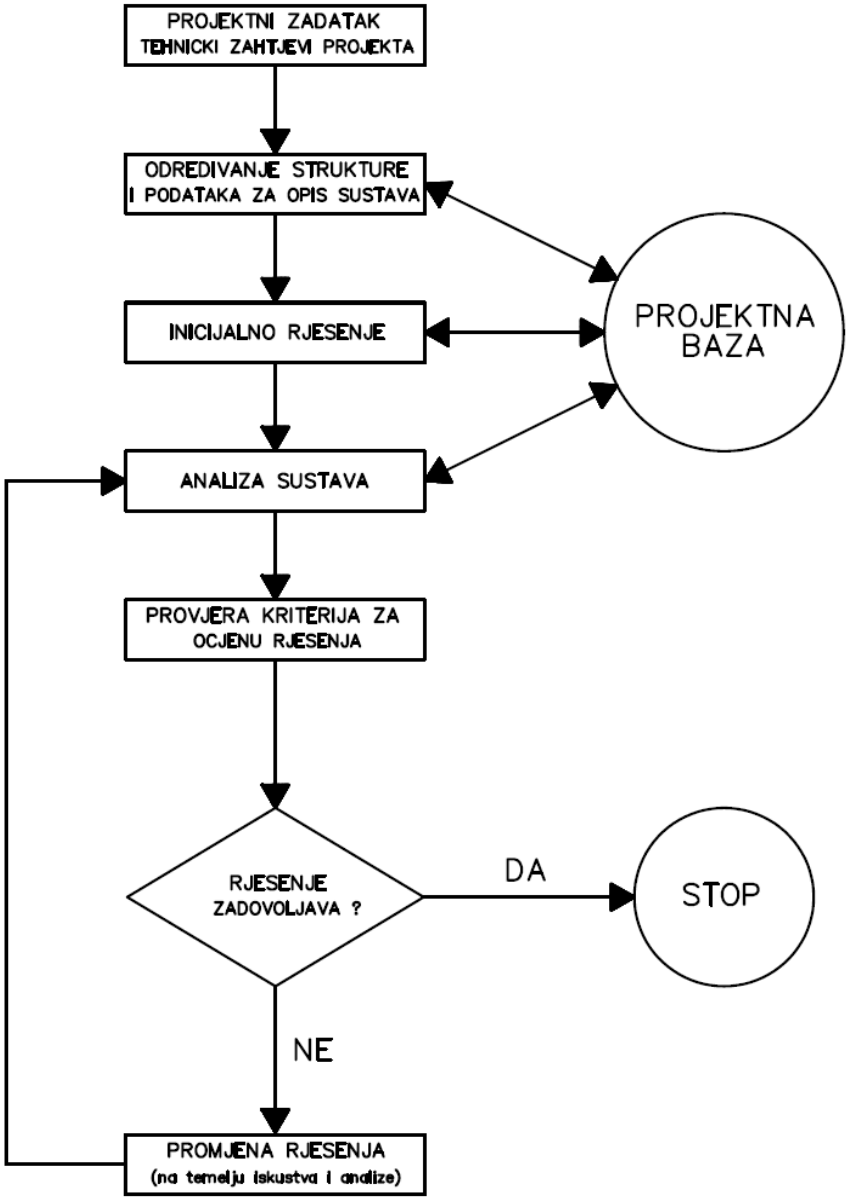
Projektni parametri se u većini slučajeva mogu slobodno izabrati, pošto su isti već međusobno vezani unaprijed zadanim uvjetima ili ograničenjima. Međusobna ovisnost parametara mora biti u procesu projektiranja ispunjena.

Ovo vodi zaključku da je sam proces projektiranja iterativni proces (postupak) određivanja strukture i projektnih parametara projektnog sustava (proizvoda). Završno projektno rješenje mora zadovoljavati (ispunjavati) sve kriterije i zahtjeve projekta.

3.1.3 Proces projektiranja

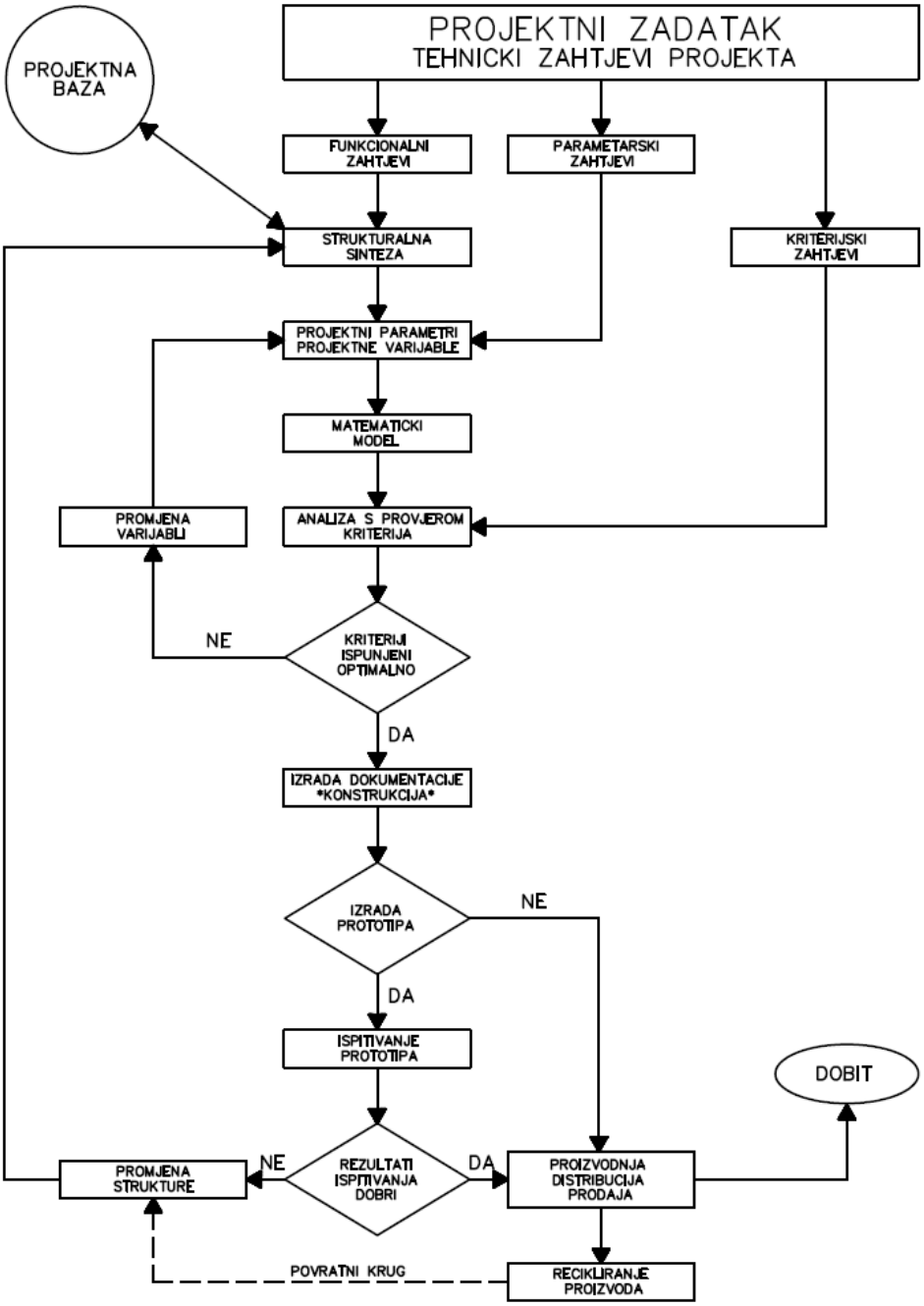
Metode i procesi projektiranja mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe:

- proces konvencionalnog projektiranja,



Slika 3-1: Proces konvencionalnog projektiranja

- proces optimalnog projektiranja.



Slika 3-2: Proces optimalnog projektiranja

3.1.4 Metode rješavanja

Metode rješavanja optimizacijskog modela se dijele na

- analitičke metode,
- grafičke metode,
- numeričke metode,
- eksperimentalne metode,
- egzaktne metode.

Korištenje ili odabir određene metode u čvrstoj je sprezi s samim optimizacijskim procesom, pri čemu je potrebno obratiti pažnju na samu efikasnost i učinkovitost metode koju se koristi.

Analitičke metode se zasnivaju na klasičnom diferencijalnom ili varijacionom računu i koriste se kod jednostavnijih i nelinearnih problema. Grafičke metode se koriste za rješavanje jednostavnih problema s najviše dvije varijable te se rješenje nalazi iz grafičkog prikaza funkcije cilja. Problemi s n-varijabli su pogodni za rješavanje iterativnim postupkom pomoću računala uz korištenje različitih numeričkih metoda. Ekstremi funkcije cilja mogu se pronaći i direktnom eksperimentalnom izmjenom projektnih varijabli, pri čemu se vrijeme potrebno za dobivanje rješenja može u nekim slučajevima znatno reducirati u odnosu na rješavanje jednom od numeričkih metoda.

3.1.5 Višeciljno optimiranje

U praksi, kada se problemi ne pojednostavljuju, praktično svako donošenje neke odluke jest konfliktnog karaktera. Takva situacija je posljedicom rješavanja različitih (projektnih) zahtjeva, koji mogu biti posve suprotne naravi.

Primjer: povećati broj konstrukcija, smanjiti broj pogrešaka u izradi tehničke dokumentacije, izbjegavati prekovremeni rad i smanjiti broj zaposlenih.

U takvim se situacijama potpunim ostvarivanjem jednog cilja negativno utječe na druge ciljeve. Optimalno rješenje takvih kompleksnih problema i zahtjeva ne leži u optimizaciji pojedinih ciljeva već u minimalizaciji razlika ostvarenih i željenih ciljeva. Kroz višeciljnu (višekriterijalnu) optimizaciju treba postići „optimalni kompromis ciljeva“, a ne optimum samih (pojedinačnih) ciljeva. Takvo rješenje postavljanog optimizacijskog modela naziva se Paretov optimum ili nedominantno rješenje.

3.2 OSNOVNE FAZE INŽENJERSKE OPTIMIZACIJE

Proces inženjerske optimizacije zahtjeva određenu multidisciplinarnost znanja i iskustva. Poznavanje problema je prvi i osnovni preduvjet koji omogućuje projektantu postavljanje dobrog fizikalno-matematičkog modela. Znanja iz teorije optimizacije, slabosti i prednosti pojedinih modela, programiranje, samo su neka od znanja koje je potrebno posjedovati kako bi se proces inženjerske optimizacije mogao primijeniti za izradu fizikalnog modela s adekvatnim matematičkim algoritmom. Proces rada inženjera se u praksi može u velikoj mjeri standardizirati, pri čemu je moguće uočiti slijedeće faze.

3.2.1 Definicija problema

Sam proces počinje uočavanjem problema, njegovim promatranjem i prepoznavanjem sličnosti i različitosti na temelju poznatih postavki iz teorije konstruiranja i optimiranja, u nekim slučajevima empirijski isključujući faktore koji u bitnome ne utječu na funkcionalnost samog problema (fizikalnog modela).

3.2.2 Fizikalni model

Svaki model, pa i ovaj, nije savršen i u sebi sadrži pojednostavljenja, aproksimacije, potrebne korelacije između pojedinih dijelova modela i samim time izvor mogućih pogrešaka. Modeliranje je najsloženiji korak u procesu optimizacije, jer je projektant prisiljen gledati unaprijed i na taj način isključivati moguće prepreke u izradi zadovoljavajućeg modela. Tako da se modeliranje sastoji od definiranju osnovnih fizikalnih veličina potrebnih za opis problema, njihove međusobne funkcionalne ovisnosti, različita ograničenja i parametre, potrebno je naglasiti da je u određivanju ovih elemenata potrebno „isključiti“ intuiciju samog projektanta. Samo takav fizikalni model je moguće kasnije opisati matematičkim modelom.

3.2.3 Matematički model

Nakon što je fizikalni model osmišljen moguće je pristupiti određivanju potrebnih varijabli, međusobne ovisnosti varijabli i matematičke izraze veza. Precizno definiranje modela se provodi određivanjem izraza koji definiraju parametre, varijable, ograničenja i kriterije optimalnosti.

Definiranje varijabli spada u određivanje potrebnih elemenata optimizacije, pri čemu one predstavljaju višak internih stupnjeva slobode fizikalnog modela, tj. slobodnih parametara postavljenog problema. Višak slobode u modelu, varijable optimiranja osiguravaju postojanje beskonačnog skupa rješenja promatranog modela te na ovaj način ispunjavaju pretpostavku za određivanje optimalnih rješenja. Sljedeći element projektnog zadatka je definiranje kriterija izvrsnosti, pri čemu oni presuđuju o tome koja su rješenja problema najbolja, ovi su pak kriteriji neophodni za matematičku izgradnju funkcije cilja. Ograničenja na kraju predstavljaju uvjete koja rješenja moraju zadovoljavati i mogu potjecati iz prirode fizikalnog problema, praktičnih uvjeta (dopuštene dimenzije) ili pak iz postojećih propisa ili normi.

3.2.4 Algoritam

Algoritam mora sadržavati potrebne radnje, računske korake, redoslijed, uvjetovanosti i ostale neophodne elemente za dobivanje jednoznačnog rješenja numeričkim putem. Algoritmi koji su bili postavljani u predračunalno doba bili su prilagođeni računanju ručno ili grafičkim postupcima te su sadržavali mnogobrojna zanemarivanja i pojednostavljenja. Suvremeni algoritmi su prilagođeni provođenju na računalu i temelje se na numeričkim postupcima analize.

Suvremeni algoritmi mora posjedovati slijedeća svojstva:

- jednostavnost algoritma i njegove primjene,
- brzina (numerička učinkovitost algoritma),
- stabilnost (neosjetljivost na numeričke probleme),
- općenitost (primjena na pripadnoj kategoriji problema),
- točnost rješenja (mora biti zadovoljavajuća, test na postojećim rješenjima),
- ograničena upravljivost (mala ili nikakva promjena parametara odnosno sintakse programa),
- adoptivnost (sposobnost učenja i razvijanja).

Kada govorimo o svojstvima algoritma nesmije se zaboraviti i kritički se osvrnuti na mane koje svaki od njih posjeduje. Iluzorno je očekivati da algoritam istovremeno može zadovoljiti sve ove gore navedene zahtjeve, zato naravno postoji cijeli niz metoda koje se koriste za posebna područja primjene.

3.2.5 Programski alat

Za implementiranje odabranog algoritma i rješavanje problema na računalu moguće je koristiti gotove specijalizirane programe za optimalizaciju te se tada korisničko programiranje svodi na programsko kodiranje matematičkog modela, odnosno funkcije, njegovih ograničenja, te simulacije odziva sustava.

3.2.6 Rješavanje (optimiranje)

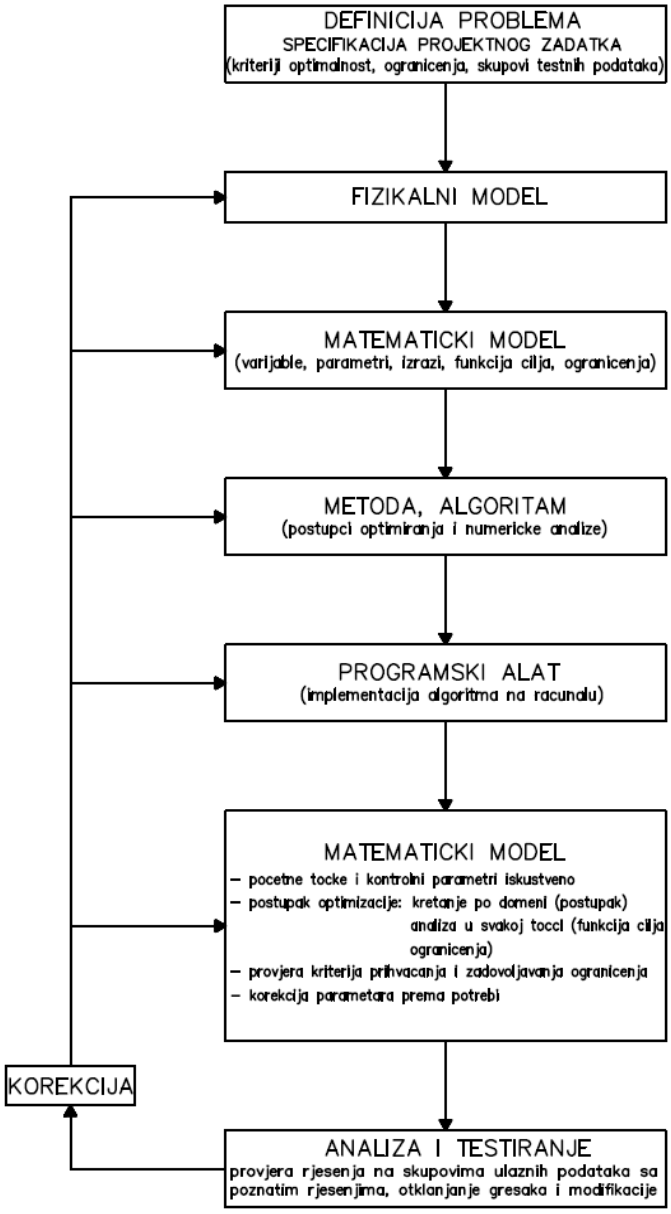
Sam proces rješavanja problema sastoji se od sljedećih osnovnih koraka:

- odabiranje početnih točki te kontrolnih parametara koji su iskustveno dani,
- sam postupak optimizacije s kretanjem po domeni, pri čemu je neophodna analiza u svakoj točki određena funkcijom cilja s pripadajućim ograničenjima,
- provjera kriterija prihvaćanja (odbijanja) i zadovoljavanje ograničenja,
- korekcija parametara u cilju finog podešavanja dobivenih rješenja.

3.2.7 Analiza i testiranje

Završni korak koji indirektno verificira postavljeni fizikalni (matematički) model, algoritam te naravno programski postupak dobivanja rješenja. Proces testiranje je poželjno provesti na skupovima podataka za koje su poznate ulazne veličine i pripadajuće fizikalno rješenje. Pogreške u rezultatima na taj je način lakše uočiti, pri čemu je neophodno da je iste moguće ocijeniti i locirati, kako bi se moglo pristupiti prema mjestu nastajanje adekvatnoj promjeni fizikalno-matematičkog modela, samog algoritma (programa).

Samo tada je moguće uz prepravke i korekcije modela ili algoritma doći do željenog cilja, a samim time i ispunjenju zadanih uvjeta u procesu inženjerske optimizacije. (**slika 3-3.**).



Slika 3-3: Faze inženjerske optimizacije

4 PROBLEM IZREZIVANJA I PAKIRANJA

4.1 UVOD U PROBLEM IZREZIVANJA I PAKIRANJA

Optimiranja u projektiranju industrijskih transformatora se u osnovi bavi iskorištenjem zadanog prostora, pri ćemu je neophodno zadržati funkcionalne veze između komponenti transformatora i industrijskog postrojenja. Ovaj zaključak je izveden iz dosadašnjih projektnih rješenja i tehničkih zahtjeva zamjenskih industrijskih transformatora (vidi poglavlje 2.3).

Problem iskorištenja prostora ili materijala je poznat već stoljećima, no ozbiljnija teoretska razmatranja na ovom području započeta su sredinom prošlog stoljeća i kao pionire na tom području možemo navesti **Dantzinga**, **Kantorovića** i **Zagallera**, pri čemu se njihova prvobitna teoretska razmatranja svode na veze između linearnog programiranja i oblikovanja („krojenja“) pravokutnih oblika [17, 18, 24].

Glavnih pokretača istraživanja na ovom području je mogućnost primjene rješenja ovog problema u različitim granama industrije u cilju boljeg iskorištenja prostora i materijala.

Jedna od glavna odlika današnjih računala je da mogu u kratkom vremenu egzaktno riješiti probleme koji u sebe uključuju složene algoritme i računske operacije. No bez obzira na sva tehnološka dostignuća i razvoj postignut u računarskoj znanosti, problem oblikovanja i pakiranja dosadašnjim metodama nije rješiv u stvarnom vremenu.

Za praktične probleme oblikovanja i pakiranja koji spadaju u razred **NP-teških** problema teško je očekivati da će se rješenja algoritma problema naći u polinomijalnom vremenu, tj. poznati algoritmi za rješavanje ovog problema su u najboljem slučaju eksponencijalne složenosti ili bolje rečeno vrijeme izvođenja je eksponencijalnog rasta. Za ilustraciju, to znači da se ovaj problem ne može dosadašnjim algoritmima riješiti tisućama godina. Pitanje je kako pristupiti takvom problemu. Inženjerska praksa nas uči da često nije potrebno riješiti problem egzaktno, tj. dovoljno ga je riješiti približno. U tu svrhu se koriste nekakve iskustvene metode čija je učinkovitost eksperimentalno potvrđena. Ove metode nazivamo heuristikama.

Popis literature vezane uz ovu relativno mladu temu je vrlo opsežan i sadrži nekoliko tisuća objavljenih znanstvenih radova, članaka, disertacija pri čemu bez pretjerivanja se može zaključiti da je to samo vrh ledenog brijega. Stoga je neophodno navesti nekoliko nezaobilaznih autora na tom području **Dyckhoff** [17] i **Hopper** [18].

Znanstvena istraživanja i radovi su na ovom području pisani na engleskom jeziku stoga će biti korištena pripadajuća nomenklatura u cilju lakšeg praćenja u izvornoj literaturu, pri čemu će neophodna objašnjenja biti dana u obliku teksta i / ili slika.

Dyckhoff je već 1990. predstavio kategorizaciju za problem oblikovanja i pakiranja koja obuhvaća ove četiri kategorije [17]:

- dimenzionalnost problema,
- određivanje cilja,
- vrsta posude (die Kisten, bins),
- vrsta predmeta (die Elemente, items).

Klasifikaciju iz 1990. godine dopunjavali su različiti autori u cilju boljeg opisivanja samog problema kojima se bave mnogobrojna znanstvena istraživanja na ovom području.

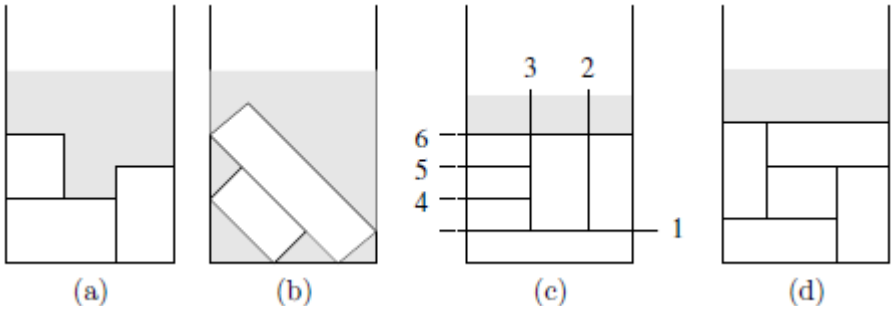
4.2 DVODIMENZIONALNO IZREZIVANJE I PAKIRANJE

Dvodimenzionalni problem oblikovanje i pakiranja se pojavljuje u praksi na više načina. Bez obzira da li se govori o oblikovanju ili pakiranju njihova osnovna struktura je jednaka. Postavka osnovnog problema može se tretirati na potpuno identičan način bez obzira da li se izrezuju ploče (beskonačna traka) u predmete određenih oblika i dimenzija (dijelove) ili se pakira predmete određenih oblika i dimenzija u posude.

Problem **2D** pakiranja dijelimo u dvije osnovne grupe:

- **dvodimenzionalno bin pakiranje (2BP)**: posude nepromjenjive duljine i širine potrebno je ispuniti predmetima različitih dimenzija, pri čemu je potrebno minimizirati broj posuda,
- **dvodimenzionalno strip pakiranje (2SP)**: traku (die Streife, strip) beskonačne duljine i nepromjenjive širine potrebno je ispuniti predmetima različitih dimenzija, pri čemu je potrebno minimizirati duljinu trake.

Tipovi dvodimenzionalnog pakiranja:



Slika 4-1: Tipovi pakiranja
(a) pravokutno (b) nepravokutno
(c) giljotinski rez (d) slobodno pakiranje

Klasifikaciju **2D** pakiranja proširuju se prema **Lodi**, **Martello, Vigo** [23] na:

2BP (SP)|O|G:elementi imaju određenu (stalnu) orijentaciju i zahtjeva se giljotinski rez,

2BP (SP)|R|G:elementi se mogu rotirati za 90° i zahtjeva se giljotinski rez,

2BP (SP)|O|F:elementi imaju određenu (stalnu) orijentaciju i rez je proizvoljan (slobodan),

2BP (SP)|R|F:elementi se mogu rotirati za 90° i rez je proizvoljan (slobodan).

Dosadašnji algoritmi za **2BP** (**2SP**) se baziraju na kombinaciji jednostavnih heuristika s metaheuristikama (opće heuristike) kao što su simulirano hlađenje, genetski algoritam i tabu pretraživanje. **2BP (2SP)** se može riješiti optimalno u prihvatljivom vremenu ako se rješava nad malim skupom ulaznih podataka. Heuristički način rješavanja vodi ka rješenjima koji teoretski nemaju garanciju da su optimalna, ali su u slučaju **2BP**-a praktično prihvatljiva.

Osnovna podjela heurističkih metoda za problem pakiranja je:

- konstruktivne (konstrukcije specifične problemu),
- poboljšavajuće (lokalno pretraživanje, opće heuristike (metaheuristike)),
- hibridne.

Za odabir položaja elemenata u posude koriste se strategije koje su razvijene za **2SP** gdje su elementi postavljeni na traku (objekt) neograničene duljine, pri čemu je duljinu beskonačne trake potrebno minimizirati. Svaki od elemenata biti će postavljen prema unaprijed određenom pravilu.

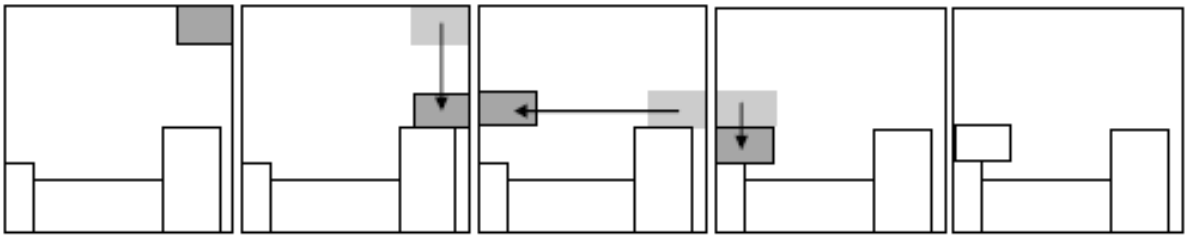
Za postavljanje elementa nije bitno da li je posuda zatvorena (**2BP**) ili otvorena (**2SP**). Stoga je uz male prepravke algoritma moguće postaviti elemente u zatvorenu posudu, pri čemu je potrebno osigurati dovoljno prostora za sve elemente kako prilikom pakiranja ne bi izvirivali iz posude.

Traženje zadovoljavajuće metode je vrlo zahtjevan i opsežan posao. U sljedećim poglavljima će biti navedeni znanstvenici koji su se bavili teoretskim i praktičnim proučavanjima na tom području, pri čemu je naravno izostavljanje nekih nenamjerno.

4.2.1 Heurističke metode određivanja položaja

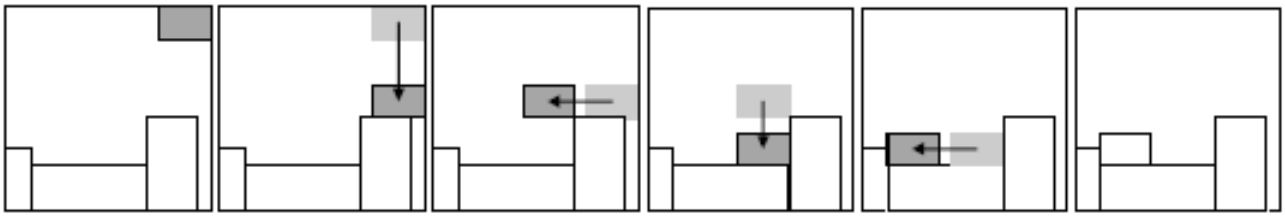
Heuristički (grč.“heuriskein“-„naći“ ili „otkriti“) algoritmi (metode) i metode umjetne inteligencije su osobito prikladne za rješavanje slabo definiranih problema, koji se ne mogu dobro matematički formulirati. Ove metode se koriste i za dobro definirane probleme koji bi se u teoriji mogli riješiti matematičkim metodama, ali se od toga odustaje zbog nedostataka (i / ili nepouzdanosti) podataka. Od matematičkih (egzaktnih) metoda isto će se odustati ako je vrijeme za izvođenje programa za korisnika neprihvatljivo, tako da heuristički algoritmi trebaju posjedovati dobru formulaciju s implementiranim pravilima koja omogućavaju njeno „dobro“ prosječno ponašanje i osobinu da rade u razumnom vremenu. Isto tako, heuristički algoritmi nisu jednoznačno određeni. Pojedini dijelovi heurističkih algoritama se razlikuju ovisno o situaciji u kojoj se koriste. Ti su dijelovi uglavnom funkcije cilja i njihovo definiranje znatno utječe na efikasnost algoritma.

BL (Bottom-Left) algoritam za postavljanje elemenata u posudu predložio je **Jakob** [21] u svom genetskom algoritmu za pakiranje mnogokutnih elemenata. Svaki element će na početku biti postavljen svojim gornjim rubom unutar posude. Nakon toga će element biti izmjenično translatiran prema dolje i ulijevo koliko je to moguće. Ovaj postupak će se provoditi dok element ne zauzme stabilno stanje u kojem se više ne može pomicati (**slika 4-2**.). Ovaj algoritam naginje nepotpunom ispunjenju posude (pojava praznina između elemenata u posudi), koji se u slijedećem koraku ne mogu ispuniti. Efikasnost ispunjenja posude strogo ovisi o redoslijedu kojim ćemo elemente postavljati u posudu.



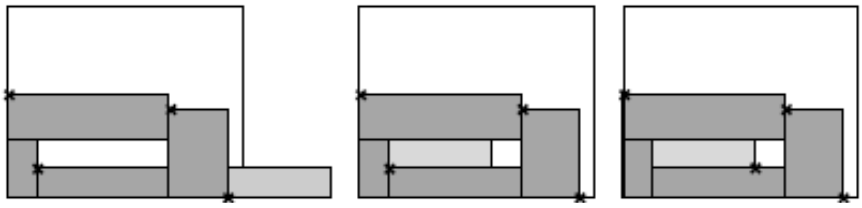
Slika 4-2: Postavljanje s **BL** algoritmom

BLLT (Liu&Teng's Bottom-Left) algoritam je poboljšani algoritam **BL** koji su **Liu i Teng** [22] obradili u svojem istraživanju za problem ortogonalnog pakiranja pravokutnika. Poboljšanje se sastoji u tome da se prioritet daje pomaku elementa prema dolje u vertikalnom smjeru, a ne ulijevo u horizontalnom smjeru kako je dano algoritmom **BL**. Kao i kod **BL** algoritma element će na početku biti postavljen svojim gornjim rubom unutar posude. Nakon toga će element biti izmjenično translatiran prema dolje i ulijevo, s ograničenjem da se objekt može pomicati ulijevo samo do onog trenutka kada je ponovno omogućeno pomicanje objekta prema dolje. Ovaj postupak će se provoditi dok element ne zauzme stabilno stanje u kojem se više ne može pomicati (**slika 4-3.**).



Slika 4-3: Postavljanje s **BLLT** algoritmom

BLF (Bottom left Fill) algoritam je poboljšana verzija **BL** (**BLLT**) pri čemu se uzima u obzir ispunjenje praznina između elemenata. Ova metoda je opisana u **BL** za **BP** heuristici **Chazelle** [15]. Olakšavanje pri rješavanja ovog problema predložila je **Hopper** [18], pri čemu je za već postavljene elemente potrebno odrediti koordinate gornjeg lijevog ugla i donjeg desnog ugla. Između ovih dviju točaka „kutova" moguće je postaviti pseudopravokutnik („pravokutnik praznine") koji je potrebno usporediti s sljedećim elementom koji želimo pakirati. Ukoliko je element manji ili jednak pseudopravokutniku potrebno ga je ispuniti (**slika 4-4**.).

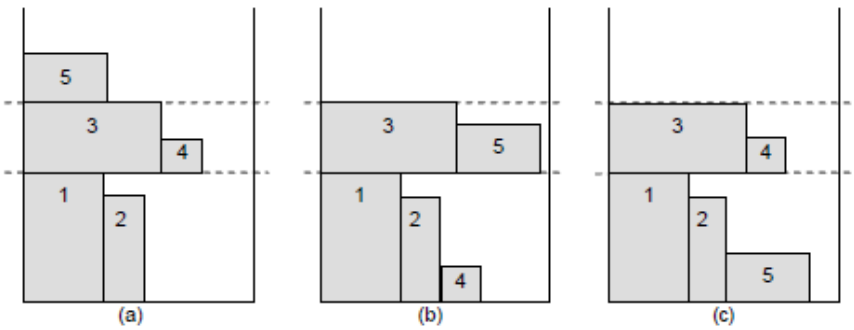


Slika 4-4: Postavljanje s **BLF** algoritmom

SH (Shelf-Packing) je sigurno najjednostavniji algoritam za kompaktno ispunjenje posude pravokutnim elementima, ovaj algoritam u praksi koristimo kod slaganja knjiga na police. Knjige ćemo prvo sortirati po visini, a zatim jednu pored druge. Ukoliko nemamo više mjesta na polici, jednostavno ćemo prijeći na slijedeću i nastaviti već opisani postupak.

Kod **2BP** (**2SP**) se radi o takozvanom hibridnom nivo–orijentiranom postupku, pri čemu se elementi postavljaju s lijeva na desno, gdje je visina prvog nivoa određena visinom prvog elementa (**slika 4-5**.).

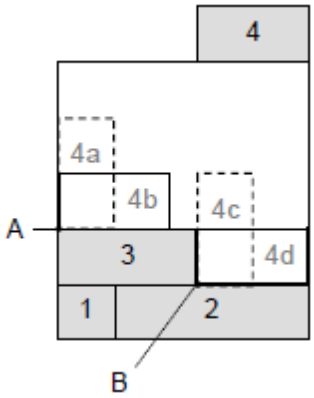
- **NFDH** Next Fit Decreasing Height: element će biti postavljen u posljednju razinu,
- **FFDH** First Fit Decreasing Height: element će biti postavljen u prvu moguću razinu,
- **BFDH** Best Fit Decreasing Height: element će biti postavljen u ravninu koja ima najmanju širinu ostatka.



Slika 4-5: SH algoritam za **2SP** (a) **NFDH,** (b) **FFDH** i (c) **BFDH**

TP (Touching Perimeter) algoritam je relativno mlad i predložen je od strane **Lodi** [23] u okviru njegovih istraživanja vezanih u **2BP** probleme. Ovaj algoritam ne pokušava ispuniti praznine nego ih želi od samog početka izbjeći. Postavljanje elemenata je bazirano na **BL** algoritmu, pri čemu se ispituje iznos površine elementa te se najbolje rješenje odabire na osnovu iznosa duljine bridova s susjednim elementima i posudom.

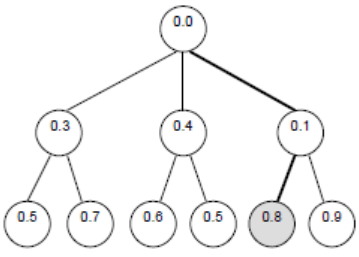
Postavljanje elemenata je dano redoslijedom 1-2-3-4. Postoje dvije osnovne točke za ispunjenje posude A i B, pri čemu imamo četiri moguće kombinacije 4a, 4c vertikalno / 4b, 4d horizontalno. Položaj 4d je najbolji pošto je suma dodirnih bridova najveća.(**slika 4-6.**).



Slika 4-6: Postavljanje s **TP** algoritmom

4.2.2 Heurističke metode lokalnih pretraživanja

HC (Hill Climbing) ili algoritam penjanja uzbrdo po svom načinu optimiranje pripada familiji algoritama lokalnog pretraživanja. Temeljen je na logici uspona: algoritam počinje od nekog rješenja i ukoliko postoji element koji bolje optimizira funkciju, novo rješenje postaje taj element. Postupak se ponavlja do zadnjeg elementa pri čemu je neophodno odrediti dobar redoslijed postavljanja elemenata u posudu. Ispunjenjem ovih preduvjeta postavljanje algoritma se može pojednostaviti. Na **slici 4-7.** vidljivo je kako će se algoritam penjanja uzbrdo ponašati kod problema pakiranja i odmah se uočava da smo zastoli na lokalnom optimumu pošto je penjanje završilo ukupnom vrijednošću 0,8.



Slika 4-7: HC s prikazom penjanja

Lokalni optimum: pretraživanje je doseglo prividni optimalni položaj koji je lošiji od stvarnog optimuma. Svaki daljnji korak bi vodio prema lošijem rješenju, pa je potrebno pretraživanje prekinuti. Plato je pozicija pri čemu je svaki sljedeći korak jednako loš tako da se sam algoritam ne može odlučiti u kojem bi smjeru dalje tražio.

Globalni optimum je traženo rješenje algoritma. Mora se naglasiti da je ovaj algoritam moguće nedeterministički manipulirati ukoliko je poznat globalni optimum i na taj način izbjeći zastajanje na lokalnom optimumu ili platou.

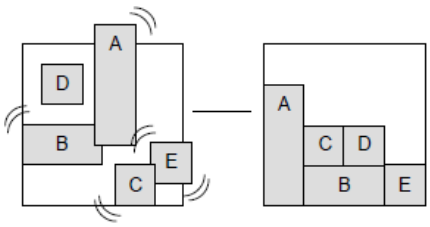
LS (Local Search) ili algoritam lokalnog pretraživanja nastoji pronaći optimalno rješenje problema smanjujući prostor pretraživanja. Ovaj algoritam možemo opisati u nekoliko koraka. Prvo se odabere rješenje i izmjeri se njegova vrijednost (ili valjanost; ovisno o problemu koji se promatra). Zatim se pretražuju susjedi odabranog rješenja i u ovisnosti o njihovim vrijednostima se izabire najbolji. Susjedi su pri tome definirani problemom koji se promatra. Sada se iterativnim postupkom nastoji naći optimalno rješenje. Trajanje algoritma je određeno brojem iteracija, bez obzira je li pronađeno rješenje, pa ga svrstavamo u nezavršene algoritme, kao i većinu općih heurističkih algoritama. Bitno je uočiti da algoritam zamjene sa najboljim susjedom može dovesti do neprestanog alterniranja dvaju susjeda u izboru rješenja, pa algoritam neće postići stabilizaciju u globalnom optimumu. Taj problem je moguće riješiti odabirom dobre funkcije cilja (funkcije transformacije trenutnog rješenja), tj. odabirom dovoljno velikog lokalnog prostora pretraživanja (odabirom dovoljno velikog broja susjeda ukoliko je moguće), ili malim preinakama algoritma.

4.2.3 Opće heurističke metode

SA (Simulated Annealing) simulirano hlađenje jedan je od stohastičkih optimizacijskih algoritama, a razlikuje se od algoritama lokalnog pretraživanja po tome što omogućuje bijeg iz lokalnog optimuma. Algoritam je nastao po analogiji sa procesom metalurškog kaljenja, čiji je cilj oplemenjivanje metala tako da on postane čvršći. Ako želimo postići čvrstoću metala, potrebno je kristalnu rešetku metala pomjeriti tako da ima minimalnu potencijalnu energiju. U procesu metalurškog kaljenja metal se prvo zagrijava do visoke temperature, a potom se, nakon kraćeg zadržavanja na toj temperaturi, polagano hladi do sobne temperature. Prebrzo hlađenje bi moglo uzrokovati pucanje metala. Posljedica toga je da atomi metala nakon procesa kaljenja tvore pravilnu kristalnu rešetku. Time je postignut i energetski minimum kristalne rešetke (**slika 4-8.**).

U skladu s navedenim, **SA** će sadržavati parametar temperature, a funkciju kojoj želimo odrediti globalni optimum možemo promatrati kao energiju rešetke, ukoliko određujemo minimum, odnosno negativnu energiju rešetke, ukoliko određujemo maksimum. Algoritam počinje odabirom nekog početnog rješenja, a početna temperatura ima relativno veliku vrijednost. Postojeće rješenje se zamjenjuje sa boljim, ali se može zamijeniti i sa lošijim uz određenu vjerojatnost prihvaćanja. Ta vjerojatnost se određuje odabirom slučajnog broja β iz intervala [0,1] i uvjeta da je β manje od ($exp(F(staro) – F(novo) / T$), gdje je $F(x)$ funkcija za koju se traži globalni minimum, a T temperatura.

Vjerojatnost da će biti odabrano lošije rješenje je veće kada je veća temperatura. To znači da je u početku prostor pretrage rješenja dosta velik i da se smanjuje padom temperature, a pri kraju procesa je usko lokaliziran. Ponašanje funkcije je uvelike određeno početnom vrijednosti temperature i njenom brzinom padanja. Najčešće temperatura opada eksponencijalno s parametrom β iz intervala $0<\beta<1$ (β je blizak jedinici). Za premali β hlađenje je prebrzo (pucanje metala) i veća je vjerojatnost upada u lokalni optimum. Za preveliki β temperatura presporo pada, i zbog velike vjerojatnosti da se u početku zamjenjuju bolja rješenja s lošijim, algoritam ima svojstvo da nasumično pretražuje veliki prostor rješenja. To dodatno usporava rad, te se β nastoji odabrati da bude dovoljno velik, ali da temperatura pri kraju procesa bude niska. Time se rješenje pred kraj procesa stabilizira u lokalnom području. Zbog velike osjetljivosti na koeficijent β, posebnu pažnju valja obratiti pri njegovom odabiranju.



Slika 4-8: SA s prikazom samostalnog pozicioniranja elemenata u posudi

TS (Tabu Search) tabu pretraživanje kombinira osnovni algoritam lokalnog pretraživanja sa kratkotrajnom memorijom koja mu omogućuje bijeg iz lokalnog optimuma i izbjegavanje alternacije dvaju rješenja. Cilj je odrediti optimum zadane funkcije. U tu svrhu, algoritam koristi posebnu tabu listu koja služi kao kratkotrajna memorija. U njoj pamti rješenja odabrana unatrag nekoliko prethodnih koraka. Rješenja koja se nalaze u tabu listi se ne mogu pojaviti kao rješenje u sljedećem koraku. Time je definiran dopušteni skup rješenja u sljedećem koraku.

Ponašanje algoritma ovisi o veličini tabu liste i veličina se podešava tako da ne bude premala, jer to može dovesti do cikličkog ponavljanja rješenja, niti prevelika, jer to može dovesti do znatnog usporenja algoritma. Kada se odredi novo rješenje, iz tabu liste se po principu **FIFO** (*first in, first out*) strukture izbacuje jedno rješenje i stavlja novo. Algoritam se obavlja dok god se ne zadovolji kriterij zaustavljanja ili se svako moguće rješenje nalazi u tabu listi.

Ovako jednostavno definiran algoritam moguće je unaprijediti. Umjesto da se stavljaju rješenja u tabu listu, što često nije učinkovito zbog mogućeg zapisa rješenja, mogu se u tabu listu staviti samo atributi koji opisuju rješenje. Time se gube neke informacije o rješenju (jer različita rješenja mogu imati iste atribute), ali se dobiva na brzini i jednostavnosti pretrage i korištenja tabu liste. Opis rješenja atributima može dovesti i do toga da se u sljedećim koracima ne mogu pojaviti rješenja koja imaju isti opis kao i rješenje odabrano u nekom od prethodnih koraka, a to može uzrokovati ispuštanjem dobrih rješenja.

Da bi se to izbjeglo, uvodi se usisni kriterij koji omogućava da se rješenje pojavi premda ga tabu lista zabranjuje. Najčešće je usisni kriterij tako postavljen da se usisavaju ona rješenja koja su bolja od trenutno najboljeg. Osim kratkotrajne memorije, algoritam može koristiti i dugotrajnu memoriju koja posjeduje informacije od početka djelovanja algoritma. Ona može koristiti algoritmu kao strateška potpora, a uglavnom je zasnovana na jednom od četiri principa:

- svježine (za svako rješenje (ili atribut) najbliža iteracija u kojem je rješenje odabrano),
- učestalosti (za svako rješenje (ili atribut) broj njegova odabira),
- kvalitete (razlučivanje potencijalno dobra rješenja od loših),
- utjecaja (informacije o najkritičnijim odlukama).

EA (Evolutionary algorithms) evolucijski algoritmi su posebna skupina metaheuristika za rješavanja optimizacijskih problema. Inspiraciju vuku iz Darwinove evolucijske teorije koja tumači da u prirodi vlada neprestana borba za opstanak. Drugim riječima, u prirodi neprestano teče proces prilagođavanja vrsta okolini u kojoj žive, a sve sa ciljem da se uspije u toj okolini opstati. Pri tome se u određenoj populaciji neke vrste, dobra svojstva nastoje očuvati, a loša svojstva nastoje zamijeniti boljima. Uvjeti u prirodi određuju koje će jedinke opstati i to izabiranje nazivamo procesom selekcije.

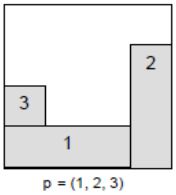
Vrste se razmnožavanjem spašavaju od izumiranja. Jedinke koje nastaju razmnožavanjem u pravilu nasljeđuju svojstva roditelja, ali zbog mutacija neka od tih svojstava mogu biti promijenjena. Mutacije omogućavaju promjenu svojstava i nastajanje novih svojstava i ključ su prilagodbe vrsta novim uvjetima u prirodi.

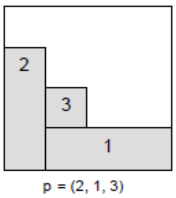
Evolucijski algoritmi prate proces evolucije, pa uglavnom svi sadrže:

- operator promjene koji oponaša razmnožavanje i mutaciju, a cilj mu je unošenje raznolikosti u skup rješenja,
- operator selekcije čija je namjena navođenje skupa rješenja k globalnom optimumu.

Da bi se optimizirala funkcija, potrebno je varijable funkcije koje optimiziramo prikazati u pogodnom obliku (kod).Varijable predstavljaju *fenotipove* jedinki i njihovim kodiranjem dobivamo *kromosome* koji predstavljaju *genotipove* jedinki. Kromosomi se sastoje od *gena Funkcija dobrote* (*funkcija procjene*) određuje kvalitetu pojedinog rješenja (**slika 4-9.**). EA je algoritam zasnovan na populaciji rješenja, a populaciju čine jedinke koje se mogu križati i mutirati.

Na početku rada algoritma se odabire populacija (inicijalizacija) i procjeni se svaka jedinka u populaciji. Inicijalizacija populacije se uglavnom obavlja slučajnim odabirom, no bilo kakve apriorne spoznaje o optimalnom rješenju se mogu uzeti u obzir prilikom inicijalizacije. Nakon inicijalizacije ulazi se u iterativni postupak, koji traje dok nije zadovoljen zaustavni kriterij. Zaustavni kriterij može biti zadovoljen ukoliko je zadovoljena optimalna razina (uvjetovana poznavanjem optimuma) ili ako istekne evolucijsko vrijeme. U svakom ciklusu se najprije odabiru parovi roditelja sa dobrim svojstvima. Roditelji sa dobrim svojstvima se križaju u nadi da će rekombinacijom gena stvoriti dijete s boljim svojstvima. Procesom križanja nastaju djeca koja ulaze u proces mutacije. Mutacija omogućava širu pretragu prostora rješenja i bijeg iz lokalnog optimuma. Zadnja faza je izbor jedinki za sljedeću generaciju i predstavlja prirodnu selekciju: jedinke dobrih svojstava ulaze u sljedeću generaciju, dok jedinke loših svojstava izumiru.





Slika 4-9: Modifikacijama genotipova mogu biti dobiveni novi fenotipovi
(**BL-**algoritam kao heuristika položaja elemenata u posudi)

Evolucijski algoritmi se dijele na ove četiri osnovne skupine:

- evolucijske strategije,
- evolucijsko programiranje,
- genetski algoritmi,
- genetsko programiranje.

ES (Evolutionary Strategies) evolucijske strategije koriste realni vektor za prikaz jedinke, a mutacija i selekcija su glavne tehnike pretrage prostora. Mutacijom se svakoj komponenti vektora dodaje slučajna vrijednost distribuirana po Gaussovoj razdiobi, pri čemu algoritam posjeduje svojstvo samo-adaptacije standardne devijacije u svakoj iteraciji. Odabir roditelja je slučajan, tj. po uniformnoj razdiobi. Selekcija je deterministička i mogu se razabrati dvije osnovne strategije. (λ, μ)-ES strategija izabire za sljedeću generaciju μ najboljih jedinki od λ stvorene djece. (μ+λ)-ES strategija izabire za sljedeću generaciju μ najboljih jedinki iz λ stvorene djece i μ najboljih jedinki roditelja. Algoritam se uglavnom koristi pri manjim populacijama, a prednost mu je brzina i činjenica da dobro optimizira probleme koji se svode na funkcije realnih varijabli.

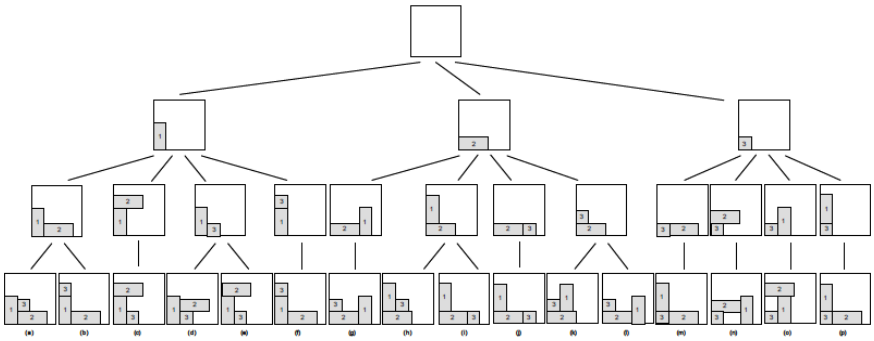
EP (Evolutionary Programing) evolucijsko programiranje je nastalo na ideji da se simulirajući evoluciju kao proces učenja pokuša stvoriti umjetnu inteligenciju. Pri tome su se koristili konačni automati stanja. Danas se evolucijsko programiranje uglavnom koristi za numeričku optimizaciju. EP nema točno utvrđen standard, a današnje inačice jako slične evolucijskim strategijama. Osnovna karakteristika EP-a je da nema križanja među jedinkama, pa je mutacija glavni operator promjene. Kod EP-a se mogu koristiti različiti načini prikaza jedinke i različiti načini ostvarivanja mutacije.

GA (Genetic Algorithms) genetski algoritmi se uglavnom koriste prilikom diskretnih optimizacijskih problema i onih koji se na to mogu svesti. Ne karakterizira ga brzina izvođenja, ali se uz manje izmjene može primijeniti na širok skup problema. Osnovni GA koristi binarni vektor (niz bitova) za prikaz jedinke i uniformno križanje. Mutacija se svodi na promjenu bitova na nekim pozicijama, pri čemu je vjerojatnost promjene pojedinog bita konstantna. U selekciji se jednostavno svi roditelji zamjene sa djecom. Složeniji verzije GA imaju izmijenjene načine križanja, mutacije i selekcije. Ipak, većina funkcija u algoritmu i dalje ostaje stohastička što održava populaciju raznolikom i sprječava prebrzu konvergenciju k suboptimalnom rješenju.

GP (Genetic Programing) genetsko programiranje je karakteristično po tome što rješenje nekog problema pokušava pronaći tako da stvara program koji će ga riješiti. Da bi se to postiglo potrebna je velika populacija, a rješavanje problema je relativno sporo. Za prikaz jedinki je pogodno upotrijebiti strukturu grafa. Mutacije su moguće, ali nisu potrebne. Mutacijama se mijenja struktura grafa (promjena čvorova), dok se križanjem izmjenjuju podstabla. Zbog načina rješavanja problema, GP se primjenjuje u područjima strojnog učenja.

4.2.4 Egzaktne metode

Rješenja različitih kombinacija moguće je prikazati u obliku stabla odlučivanja, kod kojeg se grananje provodi tako da se u svakom koraku slijedeće razine pakira novi element u posudu. Potrebno je naglasiti da je ovaj deterministički način pogodan kod malog broja elemenata pakiranja uz posebna ograničenja (npr. rotacija). Svi čvorovi iste razine imaju jednak broj elemenata, pri čemu složenost problema raste uvođenjem orijentacije pakiranog elementa. Listovi drveta predstavljaju rješenja pakiranja, gdje nije moguće pakirati nove elemente u posudu pošto su svi elementi već upakirani ili jednostavno nema dovoljno mjesta za sljedeći element (**slika 4-10.**).



Slika 4-10: Prikaz kompleksnosti stabla kod pakiranja tri različita elemenata u posudu (bez oktogonalne rotacije elemenata)

Stablo odlučivanja predstavlja posebnu metodu u kojoj se realan problem prikazuje u obliku stabla koje se grana u više mogućih alternativnih rješenja. Primjenjuje se za pronalaženje rješenja problema u uvjetima neizvjesnosti i rizika kod kojih problem odlučivanja ima više alternativnih rješenja. Grafički se može predstaviti stablom gdje se granama predstavljaju alternativni pravci sa određenom vjerojatnošću pojavljivanja, a čvorovi mjesta odlučivanja.

Na taj način formira se lanac povezanih i međuzavisnih odluka koje utječu i opredjeljuju osnovnu, odnosno konačnu odluku. Rješavanje problema metodom stabla odlučivanja vrši se tako što se vrše izračunavanja očekivanih vrijednosti za pojedine čvorove odlučivanja idući od krajnjih rezultata prema početnim. Bira se ona mogućnost koja donosi najveću očekivanu vrijednost u početnom čvoru odlučivanja.

B&B (Branch & Bound) grananje i ograničavanje je proširena metoda odlučivanja stablom kod koje se svaka vrijednost čvora stabla uzima u obzir. U ovom slučaju se ne uzima mogućnost koja donosi najveću vrijednost već određivanje grane koja vodi optimalnom rješenju, ostala grananja se u daljnjem postupku zanemaruju. Ovaj dio postupka **B&B** se zove grananje (branching). Sljedeći korak je ograničavanje (bounding) metodom gornjih (dosad najbolje rješenja) i donjih (pogodno dopunjavanje parcijalnih rješenja u aktualnom čvoru) ograničenja.

Ukoliko je donje ograničenje razmatranog čvora veće od gornjeg ograničenja, tada se razmatrani čvor može zanemariti. Što će naravno značiti da se svi dijelovi drveta ispod odbačenog čvora u daljnjem postupku zanemaruju pošto je svako parcijalno rješenje automatski lošije od do sada najboljeg rješenja.

B&B metode ne zahtjeva određivanje položaja ili način slaganja elemenata u posudu. Ova metoda daje egzaktno rješenje na osnovu svih mogućih rješenja pakiranja.

4.3 ODABIR METODE

Na osnovu dijagrama toka za pećne i ispravljačke transformatore (vidi poglavlje 2.3), odabrana su dva reprezentanta industrijskih transformatora opisanih potprogramima 4P i 32 (**slika 2-23.** i **2-24.**).

Ove reprezentante je potrebno u potpunosti proanalizirati. Na kompleksnijem reprezentantu s više aktivnih dijelova biti će izrađen model i primijenit će se jedna od gore navedenih metoda za rješavanje problema izrezivanja i pakiranja u cilju optimalnog iskorištenja prostora kućišta (kotla) transformatora, uz potpuno zadovoljenje uvjeta danih tehničkom specifikacijom.

5 OPTIMIZACIJSKI MODEL INDUSTRIJSKIH TRANSFORMATORA

5.1 PRIMJER IZRADE PEĆNOG TRANSFORMATORA

5.1.1 Tehnička specifikacija pećnog postrojenja i transformatora

Potrebno je izraditi pećni transformator za standardnu peć kapaciteta 120t promjera 6,5m s grafitnim elektrodama promjer 610mm.

Osnovne vrijednosti pećnog transformatora za standardnu peć kapaciteta 120t:

i	[-]	…položaj regulacije (i=18,17…1),
u_K	[%]	…napon kratkog spoja transformatora bez prigušnice (7%),
S_N	[MVA]	…nazivna snaga (120MVA),
GSp	[-]	…grupa spoja (trokut ili zvijezda) (Dd0),
U_P	[kV]	…napon primara (33kV),
I_{NP}	[A]	…nazivna struja primara (2100A),
U_{SMAX}	[V]	…maksimalni napon sekundara (1250V),
U_{SMIN}	[V]	…minimalni napon sekundara (750V),
$U_{SKONST.}$	[V]	…minimalni napon sekundara za konstantnu snagu (1050V),
I_{NSMAX}	[kA]	…nazivna struja sekundara (66,4kA).

Regulaciju napona će biti provedena na primarnoj strani transformatora direktnom regulacijom u 17 koraka (18 položaja).

Regulaciju dodatnog otpora (0…2(3)Ω) serijske prigušnice za stabilizaciju luka se može provesti u naponskom (sklopkom) ili beznaponskom (premještaćem) stanju u 5 koraka (6 položaja).

5.1.2 Proračun pećnog transformatora

Uvrštanjem nazivne snage pećnog transformatora u empirijsku formulu (9) dobiven je početni izraz za napon po zavoju niskonaponske strane transformatora.

$$\frac{U}{w} = 13{,}5 \times \sqrt{S_N} = 13{,}5 \times \sqrt{120} = 147{,}885 \approx 148\,\mathrm{V}/zavoju\ .$$

Ova okvirna vrijednost pomaže kod odabira približnog broja zavoja za niskonaponski namot w_{ZS}

$$w_{ZS} = \frac{U_{SMIN} + U_{SMAX}}{2} \Big/ \frac{U}{w} = \frac{1250 + 750}{2} \Big/ 148 = 6{,}757[zavoja].$$

Odabrani broj zavoja sekundara je 7 zavoja (w_{ZS}=7). Za rad peći je posebno važna ujednačenost između pojedinih koraka na sekundarnoj strani, stoga je neophodno za svaki korak odrediti računski napon sekundaru s pripadajućim naponom po zavoju.

- napon između dva položaja sekundara:

$$\Delta U_{\mathrm{S}} = \frac{U_{\mathrm{SMAX}} - U_{\mathrm{SMIN}}}{(n-1)} = \frac{1250-750}{(18-1)} = 29{,}41\mathrm{V}$$

- napon svih položaja sekundara:

položaj **18** $U_{\mathrm{S18}} = U_{\mathrm{SMAX}} - 0 = 1250\mathrm{V}$

položaj **17** $U_{\mathrm{S17}} = U_{\mathrm{S18}} - \Delta U_{\mathrm{S}} = 1250 - 29{,}41 = 1220{,}6 \approx 1221\mathrm{V}$

položaj **16** $U_{\mathrm{S16}} = U_{\mathrm{S17}} - \Delta U_{\mathrm{S}} = 1220{,}6 - 29{,}41 = 1191{,}2 \approx 1191\mathrm{V}$

….

položaj **1** $U_{\mathrm{S1}} = U_{\mathrm{S2}} - \Delta U_{\mathrm{S}} = 779{,}44 - 29{,}41 = 750{,}03 \approx 750\mathrm{V}$

- napon po zavoju svih položaja sekundara:

položaj **18** $\frac{U_{\mathrm{S18}}}{w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{1250}{7} = 178{,}57\mathrm{V}$

položaj **17** $\frac{U_{\mathrm{S17}}}{w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{1220{,}6}{7} = 174{,}37\mathrm{V}$

….

položaj **1** $\frac{U_{\mathrm{S1}}}{w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{750{,}03}{7} = 107{,}15\mathrm{V}$

- za konstantan napon primara od 33kV i pripadajući napona po zavoju računski je određen broj zavoja svakog koraka primara:

položaj **18** $w_{\mathrm{ZP18}} = \frac{U_{\mathrm{P}}}{U_{\mathrm{S18}} / w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{33000}{178{,}57} = 184{,}80 \approx 185\,\mathrm{zavoja}$

položaj **17** $w_{\mathrm{ZP17}} = \frac{U_{\mathrm{P}}}{U_{\mathrm{S17}} / w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{33000}{174{,}37} = 189{,}25 \approx 189\,\mathrm{zavoja}$

….

položaj **1** $w_{\mathrm{ZP1}} = \frac{U_{\mathrm{P}}}{U_{\mathrm{S1}} / w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{33000}{107{,}15} = 307{,}97 \approx 308\,\mathrm{zavoja}.$

Ove računske vrijednosti zavoja primarnog namota s regulacijom i sekundara potrebno je uskladiti s tehnološkim procesom. Pri usklađivanju moguća su odstupanja dobivenih računskih vrijednosti koje je potrebno zadržati u dozvoljenim tolerancijama propisanim međunarodnim standardima.

Pri ovoj vrsti regulacije napon se regulira u nejednakim koracima pa se regulacijski namot mora grupirati s različitim brojem zavoja po koraku, što utječe na kompliciranost i neekonomičnost u izradi viševojnog cilindričnog regulacijskog namota.

Pri terećenju transformatora na maksimalni iznos sekundara, induciraju se visoki naponi u neprotjecanom dijelu regulacijskog namota, stoga je te slučajeve potrebno posebno obraditi i neprotjecani dio regulacijskog namota dodatno zaštititi posebnim zaštitnim prigušnim **RC**-elementima koji se spajaju između dva (ili više) kritična koraka regulacije.

Radi bolje preglednosti rezultati su prikazani u dvije tablice. **Tablica 5-1**. daje pregled napona sekundara i primara, s usporedbom računskih i stvarnih vrijednosti. **Tablica 5-2.** daje pregled struja sekundara i primara. Ovim tablicama omogućeno je praćenje svih promjena u izradi električnog proračuna pećnog transformatora.

Broj zavoja transformatora												
i [-]	ΔU_S [V] r	U_{Si} [V] r	w_{ZS} [-]	U_{Si} / w_{ZS} [V] r	U_P [V]	w_{ZPN} [-] r	w_{ZPN} [-] s	U_{Si} / w_{ZS} [V] s	Δw_{ZP} [-]	U_{Si} [V] s	ΔU_{Si} [V]	ΔU_S [V] s
18		1250	7	178,571	33000	185	185	178,378		1248,6	-1,4	
17		1221	7	174,370	33000	189	190	173,684	5	1215,8	-4,8	32,9
16		1191	7	170,169	33000	194	195	169,231	5	1184,6	-6,6	31,2
15		1162	7	165,967	33000	199	200	165,000	5	1155,0	-6,8	29,6
14		1132	7	161,766	33000	204	205	160,976	5	1126,8	-5,5	28,2
13		1103	7	157,564	33000	209	210	157,143	5	1100,0	-2,9	26,8
12		1074	7	153,363	33000	215	216	152,778	6	1069,4	-4,1	30,6
11		1044	7	149,161	33000	221	222	148,649	6	1040,5	-3,6	28,9
10		1015	7	144,960	33000	228	228	144,737	6	1013,2	-1,6	27,4
9	29,41	985	7	140,759	33000	234	234	141,026	6	987,2	1,9	26,0
8		956	7	136,557	33000	242	240	137,500	6	962,5	6,6	24,7
7		926	7	132,356	33000	249	249	132,530	9	927,7	1,2	34,8
6		897	7	128,154	33000	258	258	127,907	9	895,3	-1,7	32,4
5		868	7	123,953	33000	266	267	123,596	9	865,2	-2,5	30,2
4		838	7	119,751	33000	276	276	119,565	9	837,0	-1,3	28,2
3		809	7	115,550	33000	286	286	115,385	10	807,7	-1,2	29,3
2		779	7	111,349	33000	296	296	111,486	10	780,4	1,0	27,3
1		750	7	107,147	33000	308	306	107,843	10	754,9	4,9	25,5

Tablica 5-1: Tablica struja i napona pećnog transformatora

Objašnjenje oznaka iz **Tablice 5-1.**

i [-] …položaj regulacije (i=18,17…1),

ΔU_S [V] r …napon između dva susjedna koraka napon sekundara (računska vrijednost),

U_{Si} [V] r …napon sekundara za svaki položaj regulacije (računska vrijednost),

w_{ZS} [-] …broj zavoja namota sekundara,

U_{Si} / w_{ZS}[V] r …napon po zavoju sekundara za svaki položaj regulacije,

U_P [kV] …napon primara (33kV),

w_{ZPN} [-] r …ukupni broj zavoja namota primara svakog položaj (računska vrijednost),

w_{ZPN} [-] s …ukupni broj zavoja namota primara svakog položaj (stvarna vrijednost),

U_{Si} / w_{ZS}[V] s …napon po zavoju sekundara za svaki položaj regulacije (stvarna vrijednost),

Δw_{ZP} [-] …broj zavoja između dva položaj,

U_{Si} [V] s …napon sekundara svakog položaj regulacije (stvarna vrijednost),

ΔU_S [V] s …napon između dva susjedna koraka napon sekundara (stvarna vrijednost),

ΔU_{Si} [V] …razlika između računske i stvarne vrijednost za svaki položaj sekundara.

Proces rada elektrolučne peći je podijeljen u dva područja:

- konstantne snage,
- konstantne struje.

Za područje rada pod konstantnom snagom poželjna je fina regulacija napona i struja, dok je u području rada pod konstantnom strujom fino reguliranje napona nebitno (taljenje i rafiniranje):

- za nazivnu struju primara u području konstantne snage koriste se sljedeći izraz:

položaj **18** $I_{\mathrm{NP18}} = \dfrac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{P18}}} = \dfrac{120000}{\sqrt{3} \cdot 33} = 2099{,}34 \approx 2100\mathrm{A}$

….

položaj **11** $I_{\mathrm{NP11}} = \dfrac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{P11}}} = \dfrac{120000}{\sqrt{3} \cdot 33} = 2099{,}34 \approx 2100\mathrm{A}$

- za nazivnu struju primara u području konstantne struje koriste se sljedeći izraz:

položaj **10** $I_{\mathrm{NP10}} = I_{\mathrm{NS10}} \dfrac{U_{\mathrm{S10(S)}}}{U_{\mathrm{P10}}} = 66{,}362 \dfrac{1013{,}2}{33} = 2037{,}4\mathrm{A}$

….

položaj **1** $I_{\mathrm{NP1}} = I_{\mathrm{NS1}} \dfrac{U_{\mathrm{S1(S)}}}{U_{\mathrm{P1}}} = 66{,}362 \dfrac{754{,}9}{33} = 1518{,}1\mathrm{A}$

- za faznu struju primara koriste se sljedeći izrazi (spoj u trokut):

položaj **18** $I_{\mathrm{FP18}} = \dfrac{I_{\mathrm{NP18}}}{\sqrt{3}} = \dfrac{2037{,}4}{\sqrt{3}} = 1176{,}3\mathrm{A}$

….

položaj **1** $I_{\mathrm{FP1}} = \dfrac{I_{\mathrm{NP1}}}{\sqrt{3}} = \dfrac{1518{,}1}{\sqrt{3}} = 876{,}5\mathrm{A}$

- za nazivnu struju sekundara u području konstantne snage koriste se sljedeći izrazi:

položaj **18** $I_{\mathrm{NS18}} = \dfrac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{S18(s)}}} = \dfrac{120000}{\sqrt{3} \cdot 1248{,}6} = 55487{,}7 \approx 55488\mathrm{A}$

….

položaj **11** $I_{\mathrm{NS11}} = \dfrac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{S11(s)}}} = \dfrac{120000}{\sqrt{3} \cdot 1040{,}5} = 66585{,}3362 \approx 66585\mathrm{A}\,.$

Za područje rada pod konstantnom strujom nazivna struja iznosi 66362A. Fazna struja sekundara za spoj trokut se računa prema slijedećem izrazu,

položaj **18** $I_{\mathrm{FP18}} = \dfrac{I_{\mathrm{NS18}}}{\sqrt{3}} = \dfrac{55487{,}7}{\sqrt{3}} = 32035{,}8 \approx 32036\mathrm{A}$ itd.

Ukoliko se usporede izračunate vrijednosti dane u **tablicama 5-2.** i **5-3.** uočavaju se minimalne razlike u strujama i naponima koje su unutar dozvoljenih tolerancija.

Struje transformatora							
i [-]	I_{NP} [A]	I_{FP} [A]	I_{NS} [A]	I_{FS} [A]	S_{Ni} [MVA]	S_{Ni} [%]	
18	2099,5	1212,1	55486	32035	120	100	KONSTANTNA SNAGA
17	2099,5	1212,1	56985	32900	120	100	
16	2099,5	1212,1	58485	33766	120	100	
15	2099,5	1212,1	59984	34632	120	100	
14	2099,5	1212,1	61484	35498	120	100	
13	2099,5	1212,1	62984	36364	120	100	
12	2099,5	1212,1	64783	37403	120	100	
11	2099,5	1212,1	66583	38442	120	100	
10	2037,4	1176,3	66362	38314	116,5	97,0	KONSTANTNA STRUJA
9	1985,2	1146,1	66362	38314	113,5	94,6	
8	1935,6	1117,5	66362	38314	110,6	92,2	
7	1865,6	1077,1	66362	38314	106,6	88,9	
6	1800,5	1039,5	66362	38314	102,9	85,8	
5	1739,8	1004,5	66362	38314	99,4	82,9	
4	1683,1	971,7	66362	38314	96,2	80,2	
3	1624,2	937,8	66362	38314	92,8	77,4	
2	1569,4	906,1	66362	38314	89,7	74,8	
1	1518,1	876,5	66362	38314	86,8	72,3	

Tablica 5-2: Tablica struja i snaga pećnog transformatora

Objašnjenje oznaka iz **Tablice 5-2.**

i	[-]	…položaj regulacije (i=18,17…1),
I_{NP}	[kA]	…nazivna struja svakog položaja primara,
I_{FP}	[kA]	…fazna struja svakog položaja primara,
I_{NS}	[kA]	…nazivna struja svakog položaja sekundara,
I_{FS}	[kA]	…fazna struja svakog položaja sekundara,
S_{Ni}	[MVA]	…nazivna snaga svakog položaja,
S_{Ni}	[%]	…nazivna snaga svakog položaja u postotcima.

Tablice 5-1. i **5-2.** daju pregled svih informacija neophodnih za izradu pećnog transformatora, no sve ove informacije nisu neophodne za optimiranje procesa u elektrolučnoj peći. Stoga je potrebno izraditi **tablicu 5-3.** koja će sadržavati samo informacije neophodne za proces elektrolučne peći.

Tablica napona i struja za kupca					
Visokonaponskastrana			Niskonaponskastrana		
Položaj	Napon / V	Struja / A	Napon / V	Struja / A	
18	33000	2099	1250	55 426	KONSTANTNA SNAGA
17		2099	1221	56 742	
16		2099	1191	58 171	
15		2099	1162	59 635	
14		2099	1132	61 203	
13		2099	1103	62 812	
12		2099	1074	64 508	
11		2099	1044	66 362	
10		2037	1015	66 362	KONSTANTNA STRUJA
9		1985	985		
8		1936	956		
7		1866	926		
6		1801	897		
5		1740	868		
4		1683	838		
3		1624	809		
2		1569	779		
1		1518	750		

Tablica 5-3: Tablica struja i napona za kupca

5.2 KRUŽNI DIJAGRAM ELEKTROLUČNE PEĆI

5.2.1 Pećni transformator (bez prigušnice)

Potrebno je odrediti maksimalnu struju za područje konstantne snage (položaj **11)** prema slijedećem izrazu:

$$I_{\mathrm{NS11}} = \frac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{S11(t)}}} = \frac{120 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1044} = 66362{,}1 \approx 66362\,\mathrm{A}$$

reaktancija pećnog transformator može se odrediti iz napona kratkog spoja prema izrazu:

$$X_0 = \frac{u_{\mathrm{K}} \cdot U_{\mathrm{S11}}^2}{100 \cdot S_{\mathrm{N}}} = \frac{7\% \cdot (1044)^2}{100\% \cdot 120 \cdot 10^{-3}} = 0{,}636\,\mathrm{m\Omega}$$

otpor pećnog transformator može se odrediti prema izrazu:

$$R_0 = \frac{U_{\mathrm{S11}}}{I_{\mathrm{NS11}}} \cdot \cos 45° = \frac{1044}{66362} \cdot \cos 45° = 0{,}011\,\mathrm{m\Omega}\,.$$

5.2.2 Prigušnica (spojena u seriju unutar trokuta (fazna struja))

Nazivnu struju trofazne prigušnice može se odrediti prema izrazu:

$$I_{\mathrm{PRN}} = \frac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{P}}} = \frac{120 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 33} = 2099{,}46 \approx 2100\,\mathrm{A}$$

faznu struju trafazne prigušnice može se odrediti prema izrazu:

$$I_{\mathrm{PRF}} = \frac{S_{\mathrm{N}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\mathrm{P}}} = \frac{120 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot 33} = 1212{,}12 \approx 1212\,\mathrm{A}$$

traženi otpor prigušnice (R_{PR}) je 2(3)Ω, a određen je tehničkom specifikacijom. Na osnovu izraza može se odrediti jalova snaga prigušnice:

$$Q_{\mathrm{PR}} = {I_{\mathrm{PRN}}}^2 \cdot R_{\mathrm{PR}} \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 2099{,}46^2 \cdot 2(3) \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 26{,}43(39{,}69)\,\mathrm{Mvar}$$

nazivni napon prigušnice može se odrediti prema izrazu:

$$U_{\mathrm{PR}} = 3 \cdot R_{PR} \cdot I_{PRF} = 3 \cdot 2(3) \cdot 1212 = 7272(10908)\,\mathrm{V}$$

napon kratkog spoja prigušnice u_{KPR} dan ovim izrazom:

$$u_{\mathrm{KPR}} = \frac{U_{\mathrm{PR}}}{U_{\mathrm{P}}} \cdot 100 = \frac{7272(10908)}{33 \cdot 10^3} \cdot 100 = 22(33)[\%]$$

otpor prigušnice može se zanemariti tj.

$$R_{\mathrm{P}} \approx 0\mathrm{m}\Omega$$

reaktanciju pećnog transformatora i prigušnice može se promatrati kao sumu pojedinih reaktancija.

$$u_{\mathrm{UK}} = u_{\mathrm{K}} + u_{\mathrm{KPR}} = 7 + 22(33) = 29(40)[\%]$$

reaktanciju pećnog transformator s prigušnicom može se odrediti prema izrazu:

$$X_0^{\mathrm{UK}} = \frac{u_{\mathrm{UK}} \cdot U_{\mathrm{S11}}^2}{100 \cdot S_{\mathrm{N}}} = \frac{29(40)\% \cdot (1044)^2}{100\% \cdot 120 \cdot 10^3} = 2{,}634(3{,}633)\mathrm{m}\Omega\,.$$

5.2.3 Elektrolučna peć

Reaktancija kratkog spoja visokostrujnog kruga elektrolučne peći (iskustvena vrijednost)

$$X = 2{,}8\mathrm{m}\Omega$$

otpor kratkog spoja visokostrujnog kruga elektrolučne peći (iskustvena vrijednost)

$$R_{\mathrm{V}} = 0{,}35\mathrm{m}\Omega$$

ukupna reaktancija

$$X_{\mathrm{U}} = X_0^{\mathrm{UK}} + X = 2{,}634(3{,}633) + 2{,}8 = 5{,}434(6{,}433) \approx 5{,}43(6{,}43)\mathrm{m}\Omega$$

ukupni otpor

$$R_{\mathrm{U}} = R_0 + R_{\mathrm{V}} + R_{\mathrm{P}} = 0{,}011 + 0{,}35 + 0 = 0{,}361 \approx 0{,}36\mathrm{m}\Omega$$

reaktancija pogona uz konstantni faktor k=1,15(odabrana vrijednost)

$$X_{\mathrm{B}} = k \cdot X_{\mathrm{U}} = 1{,}15 \cdot 5{,}43(6{,}43) = 6{,}2445(7{,}39) \approx 6{,}25(7{,}4)\mathrm{m}\Omega$$

granica kratkog spoja (kut između faza u kratkom spoju)

$$\varphi_{\mathrm{K}} = \arctan\left(\frac{X_{\mathrm{U}}}{R_{\mathrm{U}}}\right) = \arctan\left(\frac{6{,}25(7{,}4)}{0{,}36}\right) = 86{,}7°(87{,}2°)$$

$$\cos\varphi_{\mathrm{K}} = \cos 86{,}7°(87{,}2°) \approx 0{,}058(0{,}048)\,.$$

5.2.4 Konstrukcija kružnog dijagrama

5.2.4.1 Koordinatni sistem kružnog dijagrama

Na apscisi je potrebno ucrtati maksimalnu vrijednost nazivne snage (120MVA), dok je na ordinati potrebno ucrtati maksimalnu vrijednost reaktivne (jalove) snage koja je po iznosu jednaka nazivnoj snazi (120Mvar) ove vrijednosti je potrebno spojiti kružnicom s centrom u ishodištu koordinatnog sustava. Nakon tog je potrebno ucrtati fazne kuteve za φ=30° (cos 30°=0,866 granica stabilnosti), φ=45° (cos 45°=0,707 granica maksimalne snage) i φ=86,7° (cos 86,7°(87,2°)=0,058(0,048) granica kratkog spoja).

5.2.4.2 Određivanje jalove i nazivne snage

Jalova snaga je određena za različite vrijednosti fazne struje sekundara prema sljedećim izrazima:

za 30kA $Q_{30\text{kA}} = 3 \cdot I^2 \cdot k \cdot X_{\text{U}} = 3 \cdot 30^2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3} = 16{,}875(19{,}98) \approx 16{,}9(20)\text{Mvar}$,

za 40kA $Q_{40\text{kA}} = 3 \cdot I^2 \cdot k \cdot X_{\text{U}} = 3 \cdot 40^2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3} = 30(35{,}5)\text{Mvar}$,

za 50kA $Q_{50\text{kA}} = 3 \cdot I^2 \cdot k \cdot X_{\text{U}} = 3 \cdot 50^2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3} = 46{,}875(55{,}5) \approx 46{,}9(55{,}5)\text{Mvar}$,

za 60kA $Q_{50\text{kA}} = 3 \cdot I^2 \cdot k \cdot X_{\text{U}} = 3 \cdot 60^2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3} = 67{,}5(79{,}92) \approx 67{,}5(80)\text{Mvar}$,

za 66,4kA $Q_{66{,}4\text{kA}} = 3 \cdot I^2 \cdot k \cdot X_{\text{U}} = 3 \cdot 66{,}4^2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3} = 82{,}668(97{,}87) \approx 82{,}7(98)\text{Mvar}$.

U koordinatni sistem je potrebno ucrtati kvadratno podjeljenu os za nazivnu struja koja je paralelna s apscisom i ima zajedničko ishodište.

Nazivnu snagu za različite napone može se odrediti prema slijedećem izrazu

- za najveći napona 1250V

$$S_{1250} = \frac{U_{\text{S18}}{}^2}{2 \cdot k \cdot X_{\text{U}}} = \frac{1250^2}{2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3}} = 125(105{,}6)\text{MVA}$$

- za srednji napona (izračunati) 1044V

$$S_{1044} = \frac{U_{\text{S11}}{}^2}{2 \cdot k \cdot X_{\text{U}}} = \frac{1044^2}{2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3}} = 87{,}194(73{,}64) \approx 87{,}2(73{,}6)\text{MVA}$$

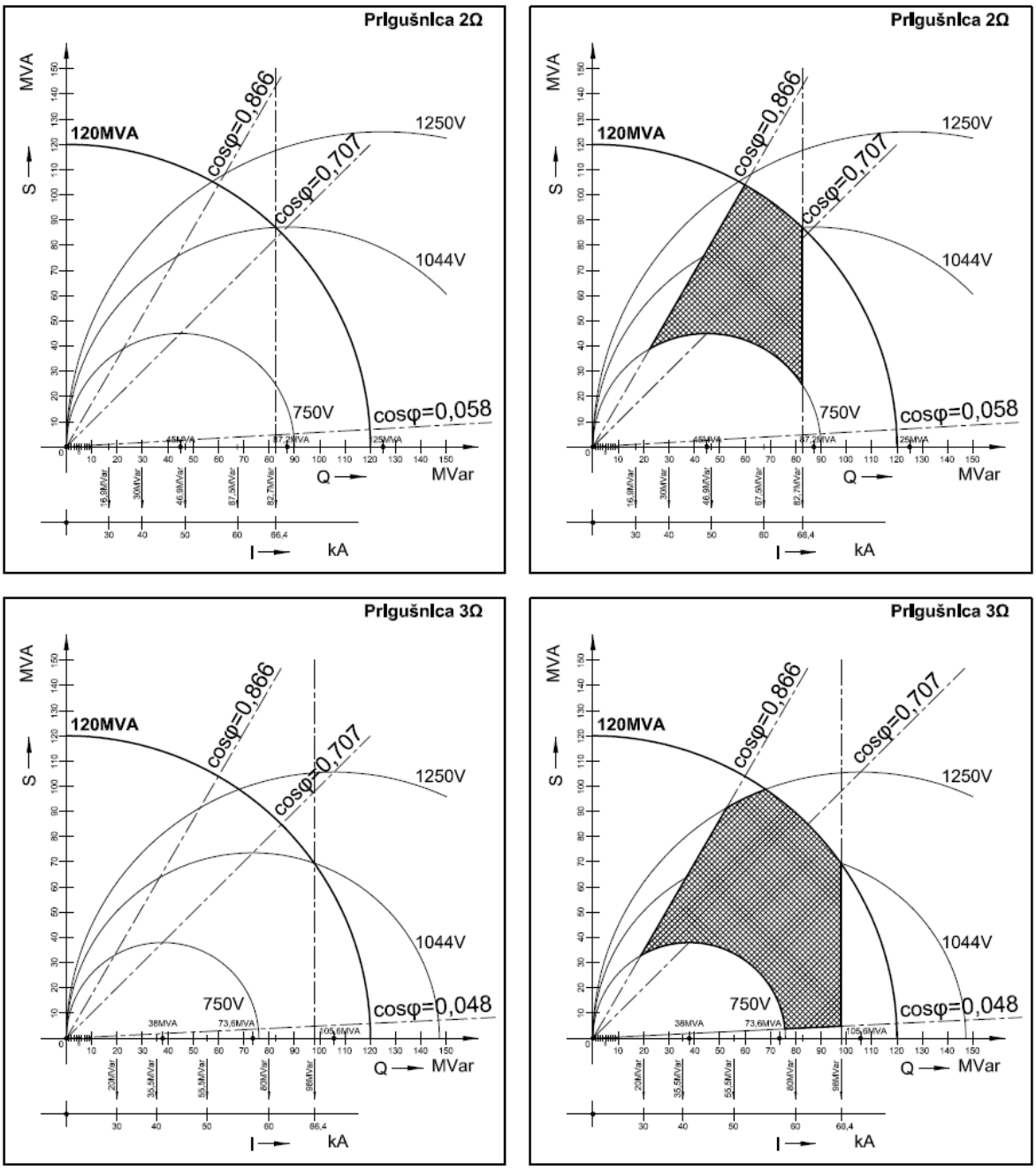
- za najmanji napona 750V

$$S_{750} = \frac{U_{\text{S1}}{}^2}{2 \cdot k \cdot X_{\text{U}}} = \frac{750^2}{2 \cdot 6{,}25(7{,}4) \cdot 10^{-3}} = 45(38)\text{MVA}.$$

U kružni dijagram je potrebno ucrtati krivulje za izračunate snage pojedinih naponskih nivoa, tako što se ishodište kružnih dijagrama nalazi na apscisi s iznosom koji je računski određen.

Potrebno je u pojednostavljenom kružnom dijagramu označiti područje rada peći koje je omeđeno krivuljama (**slika 5-1.**).

I_{NS11}, S_N, U_{NS18}, cos30°=0,866, U_{NS1},cos86,7°(87,2°)=0,058(0,048).

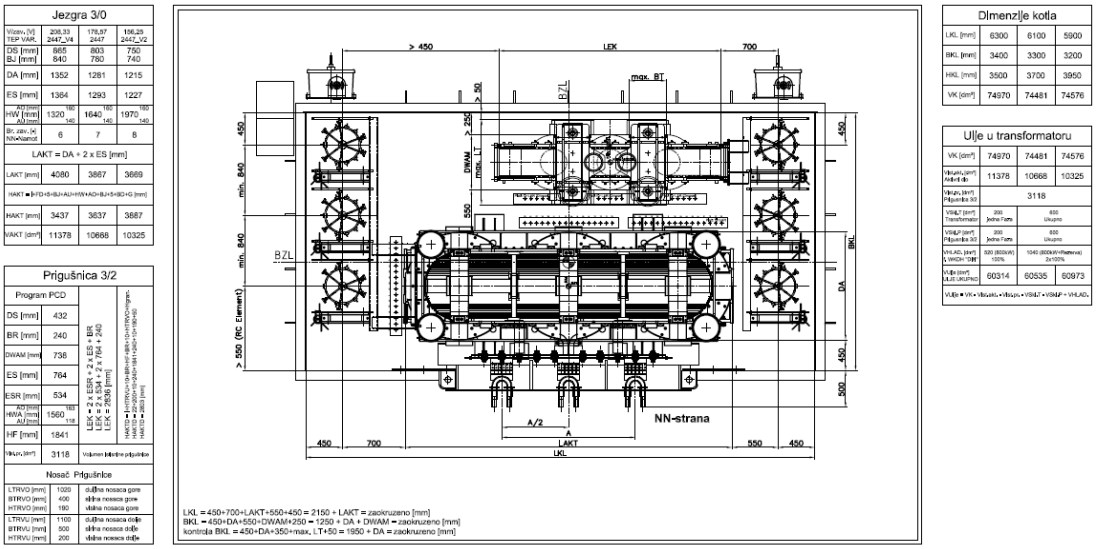


Slika 5-1: Kružni dijagram za elektrolučnu peć prema tehničkoj specifikaciji

5.3 KONSTRUKCIJSKO RJEŠENJE PEĆNOG TRANSFORMATORA

5.3.1 Regulacija prigušnice u naponskom stanju

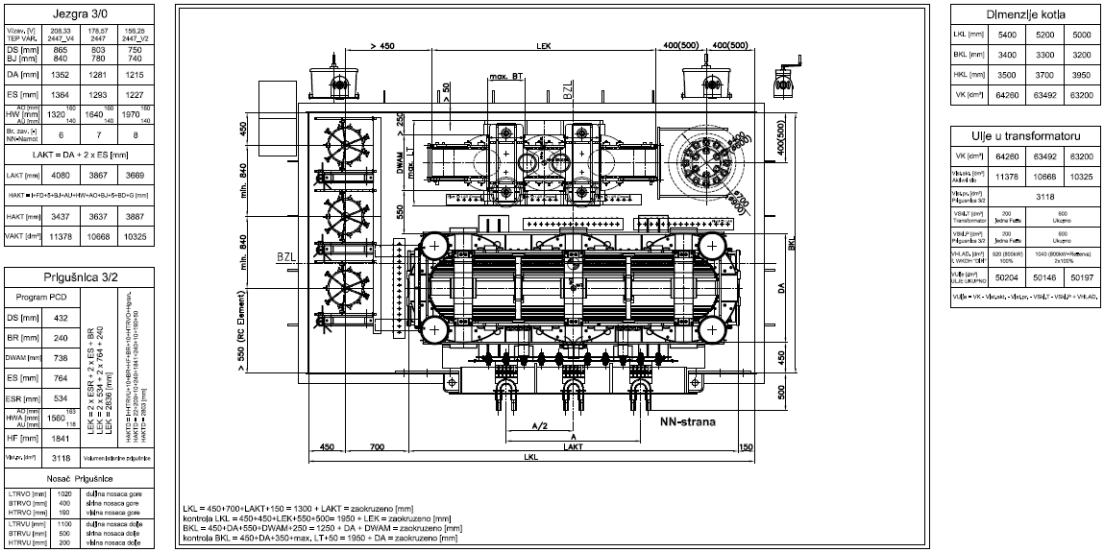
Na osnovu dimenzija dobivenih korištenjem programa za proračun i optimiranje aktivnog dijela dobiveni su podaci za izradu pećnog transformatora s prigušnicom (za stabilizaciju luka) upravljivom u naponskom stanju s tri jednofazne sklopke (**slika 5-2.**).



Slika 5-2: Pećni transformatora s ugrađenom prigušnicom reguliranom u naponskom stanju

5.3.2 Regulacija prigušnice u beznaponskom stanju

Dimenzije aktivnih dijelova pećnog transformatora su nepromjenjene, tako da se optimiraju dimenzije kotla pećnog transformatora. Za regulaciju otpora prigušnice u beznaponskom stanju koristi se jedan trofazni premještač (**slika 5-3.**).



Slika 5-3: Pećni transformatora s ugrađenom prigušnicom reguliranom u beznaponskom stanju

5.4 PRIMJER IZRADE ISPRAVLJAČKOG TRANSFORMATORA

5.4.1 Tehnička specifikacija ispravljačkog postrojenja

Potrebno je izraditi 12-pulsni ispravljački transformator u DSS spoju s transduktorima (s finom regulacija istosmjernog napona 20V) za elektrolizu cinka s faznim pomakom od +7,5°, pri čemu se provodnici sekundara nalaze u liniji na istoj strani kućišta transformatora uz ograničenje transportne visine (max.3600mm), provodnici primara se nalaze na čeonoj strani, dok se provodnici usisne prigušnice nalaze na poklopcu kućišta. Transformator će biti priključen direktno na mrežu pomoću visokonaponskih kablova (132kV ±5%) koji će biti dovedeni iz fundamenta ispravljačkog postrojenja. Regulacija će biti izvedena u medukrugu (34 koraka), pri čemu je promjenu napona na sekundaru određena naponom ispravljačkog postrojenja (509V-152V). Kompenzacija jalove snage ili popravak faktora snage ispravljača u cilju potiskivanja štetnih utjecaja viših harmonika na mrežu biti će provedena pomoću tercijarnog namota (20Mvar). Provodnici tercijarnog namota biti će priključeni 30kV kablovima.

Osnovne vrijednosti istosmjernog postrojenja ovog primjera su:

I_{dNA} [kA] …nazivna istosmjerna struja postrojenja (130kA),

a [-] …broj istosmjernih grupa postrojenja (1),

I_{dNG} [kA] …nazivna istosmjerna struja jedne grupe (130kA),

b [-] …broj istosmjernih grupa DSS spoja (2),

U_{dN} [V] …nazivni istosmjerni napon (301V),

d [-] …promjena napona u ispravljaču (0,123),

$\frac{U_{UP150}}{U_{di}}$ [-] …omjer napona usisne prigusnice (150Hz) i idealnog napona sekundara, ovisnog o upravljačkom kutu ispravljača α~22° (0,328),

f [Hz] …frekvencija,

U_M [V] …nazivni napon mreže (132kV s mogućom tolerancijom ±5%).

Izračunate vrijednosti [8]…[14]:

$$I_{dN} = \frac{I_{dNG}}{2} = \frac{130}{2} = 65\text{kA}$$ …istosmjerna struja grupe DSS spoja,

$$I_S = \frac{I_{dN}}{2 \times \sqrt{3}} = \frac{65}{2 \times \sqrt{3}} = 18{,}764\text{kA}$$ …struja sekundara GT-a,

$$I_{UP} = \frac{I_{dN}}{2} = \frac{65}{2} = 32{,}5\text{kA}$$ …struja usisne prigušnice,

$$I_{UPG} = 2 \times 2 \times \frac{I_{dN}}{2} = 2 \times 2 \times \frac{65}{2} = 2 \times 2 \times 32{,}5\text{kA}$$ …ukupna struja usisne prigušnice,

$$U_{\mathrm{di}} = \frac{U_{\mathrm{dN}}}{(1-d)} = \frac{301}{(1-0{,}1236)} = 343{,}45\mathrm{V}$$ …idealni napon sekundara GT-a,

$$U_{\mathrm{UP}} = \frac{U_{\mathrm{UP150}}}{U_{\mathrm{di}}} \times U_{\mathrm{di}} = 0{,}328 \times 343{,}45 = 112{,}64\mathrm{V}$$ …napon usisne prigušnice,

$$U_{\mathrm{so}} = \frac{U_{\mathrm{di}} \times \pi \times \sqrt{6}}{9} = \frac{343{,}45 \times \pi \times \sqrt{6}}{9} = 293{,}87\mathrm{V}$$ …izmjenični napon sekundara GT-a,

$$U_{\mathrm{sou}} = \frac{U_{\mathrm{di}} \times \pi \times \sqrt{2}}{3} = \frac{343{,}45 \times \pi \times \sqrt{2}}{3} = 508{,}63\mathrm{V}$$ …ulančani izmjenični napon sek. GT-a,

$$S_{\mathrm{di}} = U_{\mathrm{di}} \times I_{\mathrm{dN}} = 343{,}45 \times 65 = 22{,}324\mathrm{MVA}$$ …idealna snaga istosmjerne struje spoja,

$$S_{\mathrm{P}} = \frac{S_{\mathrm{di}} \times \pi}{3} = \frac{22{,}324 \times \pi}{3} = 23{,}378\mathrm{MVA}$$ …snaga primarne strane grupe GT-a,

$$S_{\mathrm{S}} = 2 \times \frac{S_{\mathrm{di}} \times \pi \times \sqrt{2}}{6} = 2 \times \frac{22{,}324 \times \pi \times \sqrt{2}}{6} = 2 \times 16{,}53\mathrm{MVA}$$

…snaga sekundarne strane grupe GT-a,

$$S_{\mathrm{T1R}} = b \times S_{\mathrm{P}} = 2 \times 23{,}378 = 46{,}76\mathrm{MVA}$$ …snaga primarne strane RT-a,

$$S_{\mathrm{T2G}} = b \times S_{\mathrm{S}} = 2 \times 2 \times 16{,}53\mathrm{MVA}$$ …snaga sekundarne strane GT-a,

$$S_{\mathrm{UPG}} = 2 \times b \times I_{\mathrm{UP}} \times U_{\mathrm{UP}} = 2 \times 2 \times 32{,}5 \times 112{,}64 = 14{,}643\mathrm{MVA}$$

…snaga usisne prigušnice UP.

5.4.2 Ispravljački transformator (**IsT** ili **GT**)

Uvrštanjem snage sekundara zvijezde jedne grupe u empirijsku formulu (9) dobiva se početni izraz za napon po zavoju niskonaponske strane transformatora

$$\frac{U}{w} = 13{,}5 \times \sqrt{S_{\mathrm{N}}} = 13{,}5 \times \sqrt{16{,}53} = 54{,}88 \approx 55\,\mathrm{V}/zavoju$$

ova okvirna vrijednost će pomoći kod odabira broja zavoja za niskonaponski namot w_{ZS}

$$w_{\mathrm{ZS}} = \frac{U_{\mathrm{so}}}{\frac{U}{w}} = \frac{293{,}87}{55} = 5{,}34[zavoja]$$

zbog konstrukcijskih razloga odabrano je w_{ZS} =6 zavoja i za njega se izračunava stvarni napon po zavoju koji će se dalje koristiti u proračunu

$$U_{so}/w_{ZS} = 293{,}87/6 = 48{,}978\,\mathrm{V}/zavoju\,.$$

U slijedećem koraku je potrebno odrediti naponski nivo za međukrug u kojem će se nalaziti sklopka, koja će omogućiti regulaciju u zadanim okvirima s potrebnim brojem koraka. O stupnju izolacije međukruga ovise razne komponente transformatora, a samim time i njegova cijena. Stoga je potrebno obratiti pažnju na

- izvedbu izolacija (do 36kV standardna izvedba izolacije, cijena sklopke),
- izvedba namota (do 36kV slojni namot, nekomplicirana izvedba, vrijeme izrade i sl.),
- struje do 1000A (cijena sklopke, izvedba priključaka u međukrugu),
- veza izmedu glavnog i regulacijskog transformatora (završna montaža, lokalna zagrijanja u spojnim elementima i sl.).

Odabrana je vrijednost od 35,2kV te iz izraza za snagu primarne strane jedne grupe dobivena je slijedeća vrijednost struje 6 pulsnog ispravljačkog transformatora

$$S_P = \sqrt{3}\times I_{MK}\times U_{MK} \Rightarrow I_{MK} = \frac{S_P}{\sqrt{3}\times U_{MK}} = \frac{23380}{\sqrt{3}\times 35{,}2} = 383{,}47 \approx 383{,}5\mathrm{A}$$

potrebna struja sklopke je dvostruko veća što se računa iz sheme spoja (**slike 5-1.** i **5-2.**) uz korištenje prvog Kirchhoffog zakona

$$I_{SK} = 2\times I_{MK} = 2\times 383{,}5 = 767\mathrm{A}$$

sljedeći korak je određivanje broja zavoja primara međukruga spojenog u trokut, pri čemu je potrebno obratiti pažnju na pozitivni fazni pomak od 7,5°.

$$w_{PKD} = \frac{U_{PLD}}{U_{so}/w_{ZS}} = \frac{35200}{48{,}978} = 718{,}66 \approx 719[zavoja]$$

w_{PKD} [-] …fiktivni broj zavoja faze spoj trokut (za nepodijeljeni namot),

U_{PLD} [V] …najviši napon međukruga (35,2kV),

U_{so}/w_{ZS} [V] …stvarni napon po zavoju (48,978V),

$$w_{1D} = \frac{U_{PLD}\times \sin(60° - \alpha)}{U_{so}/w_{ZS}\times \sin 120°} = \frac{35200\times \sin(60° - 7{,}5°)}{48{,}978\times \sin 120°} = 658{,}4 \approx 659\,[zavoja]$$

gdje je:

w_{1D} [-] …ukupni broj zavoja glavnog dijela podijeljenog namota (na stupu faze),

$$w_{2D} = \frac{U_{PLD} \times \sin\alpha}{U_{so}/w_{ZS} \times \sin 120°} = \frac{35200 \times \sin 7{,}5°}{48{,}978 \times \sin 120°} = 108{,}3 \approx 108\,[zavoja]$$

gdje je:

w_{2D} [-] …ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podijeljenog namota,

ili pomoću kosinusovog poučka:

$$w_{PKD} = \sqrt{w_{1D}^2 + w_{2D}^2 - 2 \times w_{1D} \times w_{2D} \times \cos 120°} = \sqrt{659^2 + 108^2 - 2 \times 659 \times 108 \times \cos 120°} = 719{,}1 \approx 719$$

pri tome se na kraju dobije stvarni iznos kuta α:

$$\alpha_{STVD} = \arctan\frac{\sqrt{3}}{2 \times \frac{w_{1D}}{w_{2D}} + 1} = \arctan\frac{\sqrt{3}}{2 \times \frac{659}{108} + 1} = 7{,}47 \approx 7{,}5°$$

Na isti način je određen broja zavoja primara međukruga spojenog u zvijezdu s istim pomakom

$$w_{PKY} = \frac{U_{PLY}}{U_{so}/w_{ZS}} = \frac{20323}{48{,}978} = 414{,}94 \approx 415\left[zavoja\right]$$

w_{PKY} [-] …fiktivni broj zavoja faze (za nepodijeljeni namot),

U_{PLY} [V] …napon primara u nazivnom položaju (20,323kV),

U_{so}/w_{ZS} [V] …stvarni napon po zavoju (vidi spoj u trokut) (48,978V),

$$w_{1Y} = \frac{U_{PLY} \times \sin(60° - \alpha)}{U_{so}/w_{ZS} \times \sin 120°} = \frac{20323 \times \sin(60° - 7{,}5°)}{48{,}978 \times \sin 120°} = 380{,}12 \approx 380\,[zavoja]$$

$$w_{2Y} = \frac{U_{PLY} \times \sin\alpha}{U_{so}/w_{ZS} \times \sin 120°} = \frac{20323 \times \sin 7{,}5°}{48{,}978 \times \sin 120°} = 62{,}53 \approx 63\,[zavoja]$$

ili pomoću kosinusovog poučka:

$$w_{PKY} = \sqrt{w_{1Y}^2 + w_{2Y}^2 - 2 \times w_{1Y} \times w_{2Y} \times \cos 120°} = \sqrt{380^2 + 63^2 - 2 \times 380 \times 63 \times \cos 120°} = 415{,}1 \approx 415$$

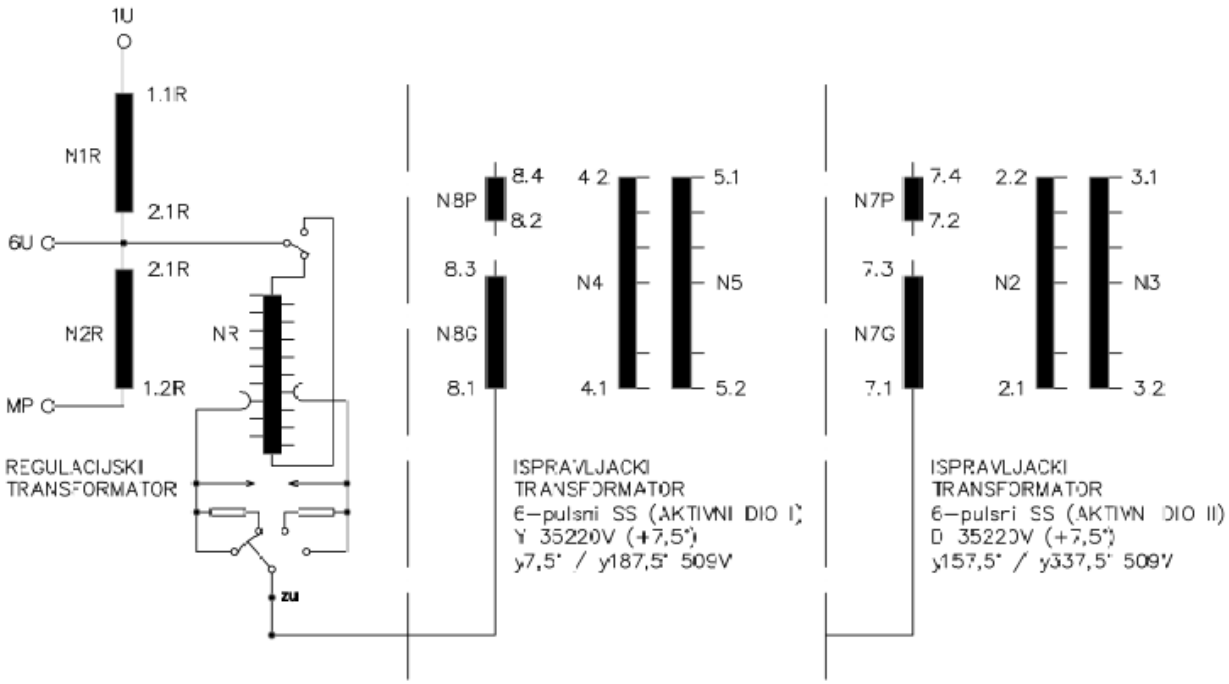
pri tome se na kraju dobije stvarni iznos kuta α:

$$\alpha_{STVY} = \arctan\frac{\sqrt{3}}{2 \times \frac{w_{1Y}}{w_{2Y}} + 1} = \arctan\frac{\sqrt{3}}{2 \times \frac{380}{63} + 1} = 7{,}55 \approx 7{,}5°\,.$$

Ovako su određeni osnovni parametrid 2x6 (ili 12-pulsni) pulsnih ispravljačkih transformatora s faznim pomakom od 7,5° na primarnoj strani i **DSS** spoju na ispravljačkoj (sekundarnoj) strani s dvostrukom usisnom prigušnicom.

5.4.3 Regulacijski transformator (**RT**)

Parametre regulacijskog transformatora u štednom spoju s tercijarnim namotom se određuju prema **slici 5-4.** i **5-5**.



Slika 5-4: Jednofazni (shematski) prikaz ispravljačkog transformatora s regulacijom u međukrugu

$N8G=w_{1Y}$[-] …spoj Y ukupni broj zavoja glavnog dijela podjeljenog namota (380),

$N8P=w_{2Y}$[-] …spoj Y ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podjeljenog namota (63),

$N7G=w_{1D}$[-] …spoj D ukupni broj zavoja glavnog dijela podjeljenog namota (659),

$N7P=w_{2D}$[-] …spoj D ukupni broj zavoja pomoćnog dijela podjeljenog namota (108).

Uz primjenu literature [1] do [6] dobivene su ove vrijednosti za:

snagu „zajedničkog“ namota $N2R$:

$$S_{N2R} = U_{PLD} \times I_{SK} = 35{,}200 \times 767 = 26998{,}4\text{A}$$

struju „serijskog“ namota $N1R$:

$$I_{N1R} = S_{N1R} / U_{M} = 26998{,}4 \times 132 = 204{,}53A \approx 204\text{A}$$ pri cemu je $S_{N2R} \approx S_{N1R}$

struju „zajedničkog“ namota $N2R$:

$$I_{N2R} = I_{SK} - I_{N1R} = 767 - 204 = 563\text{A}$$

snagu transformatora u štednom spoju za izračunate vrijednosti struja i napona:

$$S_{\mathrm{N}} = \{S_{\mathrm{N1R}} + S_{\mathrm{N2R}}\}/2 = \left\{\sqrt{3}\times(U_{\mathrm{M}} - U_{\mathrm{PLD}})\times I_{\mathrm{N1R}} + \sqrt{3}\times U_{\mathrm{PLD}}\times(I_{\mathrm{SK}} - I_{\mathrm{N1R}})\right\}/2$$

$$S_{\mathrm{N}} = \left\{\sqrt{3}\times(132-35{,}2)\times 204 + \sqrt{3}\times 35{,}2\times(767-204)\right\}/2 = 34264{,}12\mathrm{kVA}$$

orijentacijsku vrijednost napona po zavoju regulacijskog transformatora iz izraza:

$$U_{\mathrm{RT}^*}\!\!\diagup_{w} = 13{,}5\times\sqrt{S_{\mathrm{N}}} = 13{,}5\times\sqrt{34{,}26412} = 79{,}02\mathrm{V}$$

ukupni broj zavoja regulacijskog transformatora u štednom spoju:

$$NR\mathrm{U} = N1R + N2R = U_{\mathrm{M}}/\sqrt{3}/\left(U_{\mathrm{RT}^*}\!\!\diagup_{w}\right) = 132000/\sqrt{3}/79{,}02 = 964{,}44 \approx 964[zavoja]$$

za ukupni broj zavoja izračunat je stvarni napon po zavoju:

$$U_{\mathrm{RT}}\!\!\diagup_{w} = U_{\mathrm{M}}/\sqrt{3}/NR\mathrm{U} = 132000/\sqrt{3}/946 = 79{,}056V$$

broj zavoja „zajedničkog“ namota $N2R$ (najviši napon):

$$N2R = U_{\mathrm{PLD}}/\sqrt{3}/\left(U_{\mathrm{RT}}\!\!\diagup_{w}\right) = 35200/\sqrt{3}/79{,}056 = 257{,}1 \approx 257[zavoja]$$

broj zavoja „serijskog“ namota $N1R$:

$$N1R = (U_{\mathrm{M}} - U_{\mathrm{PLD}})/\sqrt{3}/\left(U_{\mathrm{RT}}\!\!\diagup_{w}\right) = (132000-35200)/\sqrt{3}/79{,}056 = 706{,}94 \approx 707[zavoja].$$

Regulaciju napona će biti provedena prekretanjem tako da će se dodavati i oduzimati zavoje koraka i time regulirati napon u međukrug, pa je potrebno prema naponu ispravljača odrediti opseg regulacije.

Najveći napon regulacije (pretpostavljena vrijednost 35,2kV) na osnovu izračunatih vrijednosti ispravljačkog transformatora za najviši napon ispravljača 509V:

$$UR_{\mathrm{MAX}} = \frac{U_{\mathrm{souMax}}\times w_{\mathrm{PKD}}}{\sqrt{3}\times w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{509\times 719}{\sqrt{3}\times 6} = 35216\mathrm{V}$$

najniži napon regulacije uz izračunate vrijednosti ispravljačkog transformatora za najniži napon ispravljača 152V:

$$UR_{\mathrm{MIN}} = \frac{U_{\mathrm{souMin}}\times w_{\mathrm{PKD}}}{\sqrt{3}\times w_{\mathrm{ZS}}} = \frac{152\times 719}{\sqrt{3}\times 6} = 10516\mathrm{V}\,.$$

broj zavoja „regulacijskog“ namota NR_{MIN} (najniži napon):

$$NR_{\mathrm{MIN}} = UR_{\mathrm{MIN}}/\sqrt{3}/\left(U_{\mathrm{RT}}\!\!\diagup_{w}\right) = 10516/\sqrt{3}/79{,}056 = 76{,}8 \approx 77[zavoja]$$

zajednički namot je potrebno podijeliti u dva dijela konstantni NR_K i regulacijski NR_R prema slijedećem izrazi:

$$N2R = NR_{\mathrm{K}} \pm NR_{\mathrm{R}}$$

pri ćemu je za NR_K:

$$NR_{\mathrm{K}} = \left(NR_{\mathrm{MAX}} + NR_{\mathrm{MIN}}\right)/2 = \left(257 + 77\right)/2 = 167\left[zavoja\right]$$

pri ćemu je za NR_{R}:

$$NR_{\mathrm{R}} = \left(NR_{\mathrm{MAX}} - NR_{\mathrm{MIN}}\right)/2 = \left(257 - 77\right)/2 = 90\left[zavoja\right]$$

dakle zajednički namot ima ove vrijednosti broja zavoja:

$$N2R = 167 \pm 90\left[zavoja\right].$$

Regulaciju napona treba provesti u 34 koraka (35 položaja) s ograničenjem maksimalne vrijednosti napona primara u intervalu od 138,6kV do 125,4kV. Regulacijski je namot izveden sa ukupno 34 koraka (35 položaja) sa po 6 zavoja po koraku. Po dva koraka u gornjem i donjem području služe samo za kompenzaciju varijacija (mrežnog) napona napajanja te se normalno (pri nazivnom mrežnom naponu) ne koriste pri regulaciji. Preostalih 30 koraka služe za regulaciju napona u zadanom području. Tako da će napon ispravljačke strane padati od maksimalne prema minimalnoj vrijednosti za napon koraka unutar zadanog područja regulacije.

$$\left(U_{\mathrm{souMax}} - U_{\mathrm{souMin}}\right)/N_F = \left(509 - 152\right)/30 = 11{,}9\mathrm{V}$$

Za ovako odabranu regulaciju potrebno je izračunate vrijednosti napona i struja za sve položaje regulacije.

Potrebne vrijednosti za izradu tablice (**tablica 5-4.**)

U_{sou} [V] …509V ulančani izmjenični napon sek. GT-a,

w_{PKD} [-] …719,1 fiktivni broj zavoja faze (za nepodijeljeni namot)
računska vrijednost,

NR_{K} [-] …167 konstantni broj zavoja zajedničkog namota regulacijskog transformatora u štednom spoju,

w_{ZS} [-] …6 broj zavoja niskonaponske strane GT-a,

w_{SR} [-] …6 broj zavoja jednog koraka regulacije RT-a,

$NR\mathrm{U}$ [-] …964 ukupni broj zavoja RT-a u štednom spoju,

$N2R$ [-] …257 broj zavoja „zajedničkog“ namota
(za maksimalni napon ispravljača 509V),

S_{T1R} [MVA] …46,76 snaga primarne strane RT-a.

KORAK I

Napon na sekundaru 509V (nazivni položaj Pos.33):

- napona u međukrugu:

$$U_{\mathrm{ZK(509)}} = w_{\mathrm{PKD}} \times U_{\mathrm{sou(509)}} / w_{\mathrm{ZS}} / \sqrt{3} = 719{,}1 \times 509 / 6 / \sqrt{3} = 35220{,}5\mathrm{V}$$

- napona po zavoju u međukrugu:

$$U_{\mathrm{W(509)RT}} = U_{\mathrm{ZK(509)}} / N2R / \sqrt{3} = 35220{,}5 / 257 / \sqrt{3} = 79{,}123\mathrm{V}$$

- napon na primarnoj strani RT-a:

$$U_{\mathrm{PRIM(509)}} = \sqrt{3} \times U_{\mathrm{W(509)RT}} \times NRU / 1000 = \sqrt{3} \times 79{,}123 \times 964 / 1000 = 132{,}111\mathrm{kV}$$

- struja na primarnoj strani RT-a:

$$I_{\mathrm{R(509)}} = S_{\mathrm{T1R}} / U_{\mathrm{sou(509)}} / U_{\mathrm{sou(509)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{PRIM(509)}} \Rightarrow$$
$$= 46{,}76 / 509 \times 509 \times 1000 / \sqrt{3} / 132{,}111 = 204{,}35\mathrm{A}$$

- odstupanje napona na primarnoj strani:

$$ON_{(509)} = (1 - 132000 / U_{\mathrm{PRIM(509)}}) \times 100 = (1 - 132000 / 132111) \times 100 = 0{,}084\% .$$

KORAK II

Napon na sekundaru 509V-11,9V=497,1V (Pos.32):

- napona u međukrugu:

$$U_{\mathrm{ZK(497,1)}} = w_{\mathrm{PKD}} \times U_{\mathrm{sou(497,1)}} / w_{\mathrm{ZS}} / \sqrt{3} = 719{,}1 \times 497{,}1 / 6 / \sqrt{3} = 34397{,}0\mathrm{V}$$

- napona po zavoju u međukrugu:

$$U_{\mathrm{W(497,1)RT}} = U_{\mathrm{ZK(497,1)}} / \left(N2R_{(509)} - w_{\mathrm{SR}}\right) / \sqrt{3} = 34397{,}0 / (257 - 6) / \sqrt{3} = 79{,}120\mathrm{V}$$

- napon na primarnoj strani RT-a:

$$U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} = \sqrt{3} \times U_{\mathrm{W(497,1)RT}} \times NRU / 1000 = \sqrt{3} \times 79{,}120 \times 964 / 1000 = 132{,}107\mathrm{kV}$$

- struja na primarnoj strani RT-a:

$$I_{\mathrm{R(497,1)}} = S_{\mathrm{T1R}} / U_{\mathrm{sou(509)}} \times U_{\mathrm{sou(497,1)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} \Rightarrow$$
$$= 46{,}76 / 509 \times 497{,}1 \times 1000 / \sqrt{3} / 132{,}107 = 199{,}58\mathrm{A}$$

- odstupanje napona na primarnoj strani:

$$ON_{(497,1)} = (1 - 132000 / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}}) \times 100 = (1 - 132000 / 132107) \times 100 = 0{,}081\% \text{ itd.}$$

Naponska tablica

Zavoji namota	
Serijski VT	797
Zajednicki VT	167
Korak regul.	6
Primar IT (rac.)	719,1
Sekundar IT	6
S_N / [MVA]	46,76
S_F / [MVA]	0,00

Struje u namotima RT

Pos.	R	U_{sou} [V]	U_{zk} (IT) [V]	Zavoji (RT) PRIMAR	Zavoji (RT) SEKUNDAR	U_W (RT) [V/zav.]	U_{ZK} (RT) [V]	U_{PRIM} [V]	Odst. Nap. [%]	$I_{R(Usek)}$ [A]	$I_{P(Usek)}$ [A]	I_{SK} [A]
35	17	509,0	35 220	964	269	75,593	35 220	126 218	-4,581	213,9	552,6	766,5
34	16	509,0	35 220	964	263	77,318	35 220	129 097	-2,249	209,1	557,4	766,5
33	**15**	**509,0**	**35 220**	**964**	**257**	**79,123**	**35 220**	**132 111**	**0,084**	**204,4**	**562,2**	**766,5**
32	14	497,1	34 397	964	251	79,120	34 397	132 107	0,081	199,6	566,9	766,5
31	13	485,2	33 574	964	245	79,117	33 574	132 102	0,077	194,8	571,7	766,5
30	12	473,3	32 750	964	239	79,114	32 750	132 097	0,073	190,0	576,5	766,5
29	11	461,4	31 927	964	233	79,111	31 927	132 092	0,070	185,3	581,2	766,5
28	10	449,5	31 103	964	227	79,108	31 103	132 086	0,065	180,5	586,0	766,5
27	9	437,6	30 280	964	221	79,105	30 280	132 081	0,061	175,7	590,8	766,5
26	8	425,7	29 456	964	215	79,101	29 456	132 075	0,057	171,0	595,6	766,5
25	7	413,8	28 633	964	209	79,097	28 633	132 068	0,052	166,2	600,3	766,5
24	6	401,9	27 810	964	203	79,093	27 810	132 062	0,047	161,4	605,1	766,5
23	5	390,0	26 986	964	197	79,089	26 986	132 054	0,041	156,6	609,9	766,5
22	4	378,1	26 163	964	191	79,084	26 163	132 047	0,035	151,9	614,6	766,5
21	3	366,2	25 339	964	185	79,079	25 339	132 039	0,029	147,1	619,4	766,5
20	2	354,3	24 516	964	179	79,074	24 516	132 030	0,023	142,3	624,2	766,5
19	1	342,4	23 693	964	173	79,069	23 693	132 021	0,016	137,6	629,0	766,5
18	0	330,5	22 869	964	167	79,063	22 869	132 011	0,008	132,8	633,7	766,5
17	-1	318,6	22 046	964	161	79,056	22 046	132 000	0,000	128,0	638,5	766,5
16	-2	306,7	21 222	964	155	79,049	21 222	131 989	-0,009	123,2	643,3	766,5
15	-3	294,8	20 399	964	149	79,042	20 399	131 976	-0,018	118,5	648,0	766,5
14	-4	282,9	19 575	964	143	79,034	19 575	131 963	-0,028	113,7	652,8	766,5
13	-5	271,0	18 752	964	137	79,025	18 752	131 948	-0,039	108,9	657,6	766,5
12	-6	259,1	17 929	964	131	79,016	17 929	131 932	-0,051	104,2	662,3	766,5
11	-7	247,2	17 105	964	125	79,005	17 105	131 915	-0,065	99,4	667,1	766,5
10	-8	235,3	16 282	964	119	78,994	16 282	131 895	-0,079	94,6	671,9	766,5
9	-9	223,4	15 458	964	113	78,981	15 458	131 874	-0,096	89,9	676,7	766,5
8	-10	211,5	14 635	964	107	78,967	14 635	131 850	-0,114	85,1	681,4	766,5
7	-11	199,6	13 811	964	101	78,951	13 811	131 824	-0,134	80,3	686,2	766,5
6	-12	187,7	12 988	964	95	78,933	12 988	131 794	-0,156	75,5	691,0	766,5
5	-13	175,8	12 165	964	89	78,912	12 165	131 760	-0,182	70,8	695,7	766,5
4	-14	163,9	11 341	964	83	78,889	11 341	131 721	-0,212	66,0	700,5	766,5
3	-15	152,0	10 518	964	77	78,862	10 518	131 676	-0,246	61,2	705,3	766,5
2	-16	152,0	10 518	964	71	85,527	10 518	142 804	7,565	56,5	710,1	766,5
1	-17	152,0	10 518	964	65	93,422	10 518	155 986	15,377	51,7	714,8	766,5

Tablica 5-4: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 167 zavoja

Na osnovu izračunatih vrijednosti može se zaključiti da ovim rješenjem nisu ispunjeni zahtjevi iz tehničke dokumentacije. Kako bi bili ispunjeni zadani parametri ispravljačkog postrojenja potrebno je povećati broj zavoja „zajedničkog“ namota za jedan korak odnosno 6 zavoja i smanjiti broj zavoja „serijskog“ namota za isti iznos. (**tablica 5-5.**)

Naponska tablica

Zavoji namota	
Serijski VT	791
Zajednicki VT	173
Korak regul.	6
Primar IT (rac.)	719,1
Sekundar IT	6
S_N / [MVA]	46,76
S_F / [MVA]	0,00

Struje u namotima RT

Pos.	R	U_{sou} [V]	U_{zk} (IT) [V]	Zavoji (RT) PRIMAR	Zavoji (RT) SEKUNDAR	U_W (RT) [V/zav.]	U_{ZK} (RT) [V]	U_{PRIM} [V]	Odst. Nap. [%]	$I_{R(Usek)}$ [A]	$I_{P(Usek)}$ [A]	I_{SK} [A]
35	17	509,0	35 220	964	275	73,944	35 220	123 464	-6,914	218,7	547,8	766,5
34	16	509,0	35 220	964	269	75,593	35 220	126 218	-4,581	213,9	552,6	766,5
33	15	509,0	35 220	964	263	77,318	35 220	129 097	-2,249	209,1	557,4	766,5
32	**14**	**509,0**	**35 220**	**964**	**257**	**79,123**	**35 220**	**132 111**	**0,084**	**204,4**	**562,2**	**766,5**
31	13	497,1	34 397	964	251	79,120	34 397	132 107	0,081	199,6	566,9	766,5
30	12	485,2	33 574	964	245	79,117	33 574	132 102	0,077	194,8	571,7	766,5
29	11	473,3	32 750	964	239	79,114	32 750	132 097	0,073	190,0	576,5	766,5
28	10	461,4	31 927	964	233	79,111	31 927	132 092	0,070	185,3	581,2	766,5
27	9	449,5	31 103	964	227	79,108	31 103	132 086	0,065	180,5	586,0	766,5
26	8	437,6	30 280	964	221	79,105	30 280	132 081	0,061	175,7	590,8	766,5
25	7	425,7	29 456	964	215	79,101	29 456	132 075	0,057	171,0	595,6	766,5
24	6	413,8	28 633	964	209	79,097	28 633	132 068	0,052	166,2	600,3	766,5
23	5	401,9	27 810	964	203	79,093	27 810	132 062	0,047	161,4	605,1	766,5
22	4	390,0	26 986	964	197	79,089	26 986	132 054	0,041	156,6	609,9	766,5
21	3	378,1	26 163	964	191	79,084	26 163	132 047	0,035	151,9	614,6	766,5
20	2	366,2	25 339	964	185	79,079	25 339	132 039	0,029	147,1	619,4	766,5
19	1	354,3	24 516	964	179	79,074	24 516	132 030	0,023	142,3	624,2	766,5
18	0	342,4	23 693	964	173	79,069	23 693	132 021	0,016	137,6	629,0	766,5
17	-1	330,5	22 869	964	167	79,063	22 869	132 011	0,008	132,8	633,7	766,5
16	-2	318,6	22 046	964	161	79,056	22 046	132 000	0,000	128,0	638,5	766,5
15	-3	306,7	21 222	964	155	79,049	21 222	131 989	-0,009	123,2	643,3	766,5
14	-4	294,8	20 399	964	149	79,042	20 399	131 976	-0,018	118,5	648,0	766,5
13	-5	282,9	19 575	964	143	79,034	19 575	131 963	-0,028	113,7	652,8	766,5
12	-6	271,0	18 752	964	137	79,025	18 752	131 948	-0,039	108,9	657,6	766,5
11	-7	259,1	17 929	964	131	79,016	17 929	131 932	-0,051	104,2	662,3	766,5
10	-8	247,2	17 105	964	125	79,005	17 105	131 915	-0,065	99,4	667,1	766,5
9	-9	235,3	16 282	964	119	78,994	16 282	131 895	-0,079	94,6	671,9	766,5
8	-10	223,4	15 458	964	113	78,981	15 458	131 874	-0,096	89,9	676,7	766,5
7	-11	211,5	14 635	964	107	78,967	14 635	131 850	-0,114	85,1	681,4	766,5
6	-12	199,6	13 811	964	101	78,951	13 811	131 824	-0,134	80,3	686,2	766,5
5	-13	187,7	12 988	964	95	78,933	12 988	131 794	-0,156	75,5	691,0	766,5
4	-14	175,8	12 165	964	89	78,912	12 165	131 760	-0,182	70,8	695,7	766,5
3	-15	163,9	11 341	964	83	78,889	11 341	131 721	-0,212	66,0	700,5	766,5
2	-16	152,0	10 518	964	77	78,862	10 518	131 676	-0,246	61,2	705,3	766,5
1	-17	152,0	10 518	964	71	85,527	10 518	142 804	7,565	56,5	710,1	766,5

Tablica 5-5: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 173 zavoja

Ovo minimalno prekoračenje iznosa napona primara potrebno je usaglasiti sa kupcem, pri čemu su vrijednosti negativne tolerancije za pogon ispravljačkog postrojenja kritične, jer tada nije moguće postići očekivanu snagu potrebnu za stabilan proces ispravljača. Naglašeno je da rad ispravljača ima neželjenu nuspojavu izobličenje osnovnog harmonika. Viši harmonici mogu izazvati rezonancije s elementima mreže, a s tim u vezi znatna izobličenja napona. Zato je potrebno popraviti faktor snage ispravljača odnosno kompenzirati jalovu snagu te samim time potisnuti neželjene više harmonike na iznos koji onemogućava nastanak štetnih pojava u mreži. Širenje viših harmonika u mrežu umanjuje se filterima koji služe za kompenzaciju jalove snage. U ovom slučaju filter će biti priključen na izvode „zajedničkog“ namota regulacijskog transformatora prema **tablici 5-6.** na naponu 23,693kV.

Utjecaj snage filtera na iznose struja ispravljačkog transformatora prikazani su u konačnoj tablici (**tablica 5-6.**) na osnovu koje će korištenjem optimizacijskih programa biti izračunate geometrijske vrijednosti svih komponenti neophodnih za izradu modela.

Konačne vrijednosti struja pod utjecajem filtera (npr. za (Pos.31) 497,1V):

- struja na primarnoj strani RT-a:

$$I_{\mathrm{R(497,1)}} = \begin{bmatrix} \left(S_{\mathrm{T1R}} / U_{\mathrm{sou(509)}} \times U_{\mathrm{sou(497,1)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}}\right)^2 + \\ \left(S_{\mathrm{F}} / U_{\mathrm{ZK(342,4)}} \times U_{\mathrm{ZK(497,1)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}}\right)^2 \end{bmatrix}^{1/2}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \left(46{,}76 / 509 \times 497{,}1 \times 1000 / \sqrt{3} / 132{,}107\right)^2 + \\ \left(20 / 23{,}693 \times 34{,}397 \times 1000 / \sqrt{3} / 132{,}107\right)^2 \end{bmatrix}^{1/2} = 236{,}5\mathrm{A}$$

- struja na filteru („zajedničkom“ namotu) RT-a:

$$I_{\mathrm{P(497,1)}} = \begin{bmatrix} \left(S_{\mathrm{T1R}} / U_{\mathrm{sou(509)}} \times U_{\mathrm{sou(497,1)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{ZK(497,1)}} / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} \times \left(U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} - U_{\mathrm{ZK(497,1)}}\right)\right)^2 + \\ \left(S_{\mathrm{F}} / U_{\mathrm{ZK(342,4)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} \times \left(U_{\mathrm{PRIM(497,1)}} - U_{\mathrm{ZK(497,1)}}\right)\right)^2 \end{bmatrix}^{1/2}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \left(46{,}76 / 509 \times 497{,}1 \times 1000 / \sqrt{3} / 34{,}397 / 132{,}107 \times \left(132{,}107 - 34{,}397\right)\right)^2 + \\ \left(20 / 23{,}693 \times 1000 / \sqrt{3} / 132{,}107 \times \left(132{,}107 - 34{,}397\right)\right)^2 \end{bmatrix}^{1/2} = 671{,}8\mathrm{A}$$

- struja u međukrugu:

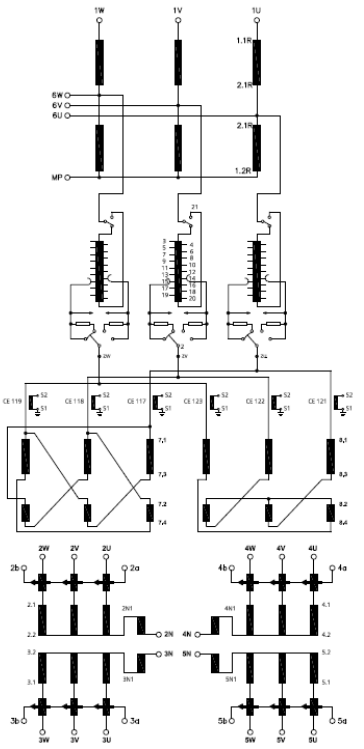
$$I_{\mathrm{SK(497,1)}} = S_{\mathrm{T1R}} / U_{\mathrm{sou(509)}} \times U_{\mathrm{sou(497,1)}} \times 1000 / \sqrt{3} / U_{\mathrm{ZK(497,1)}} \Rightarrow$$
$$= 46{,}76 / 509 \times 497{,}1 \times 1000 / \sqrt{3} / 34{,}397 = 766{,}5\mathrm{A}.$$

Naponska tablica

Zavoji namota	
Serijski VT	791
Zajednicki VT	173
Korak regul.	6
Primar IT (rac.)	719,1
Sekundar IT	6
S_N / [MVA]	46,76
S_F / [MVA]	20,00

										Struje u namotima RT		
Pos.	R	U_{sou} [V]	U_{zk} (IT) [V]	Zavoji (RT) PRIMAR	Zavoji (RT) SEKUNDAR	U_W (RT) [V/zav.]	U_{ZK} (RT) [V]	U_{PRIM} [V]	Odst. Nap. [%]	$I_{R(Usek)}$ [A]	$I_{P(Usek)}$ [A]	I_{SK} [A]
35	17	509,0	35 220	964	275	73,944	35 220	123 464	-6,914	259,1	649,2	766,5
34	16	509,0	35 220	964	269	75,593	35 220	126 218	-4,581	253,5	654,9	766,5
33	15	509,0	35 220	964	263	77,318	35 220	129 097	-2,249	247,8	660,5	766,5
32	**14**	**509,0**	**35 220**	**964**	**257**	**79,123**	**35 220**	**132 111**	**0,084**	**242,2**	**666,2**	**766,5**
31	13	497,1	34 397	964	251	79,120	34 397	132 107	0,081	236,5	671,8	766,5
30	12	485,2	33 574	964	245	79,117	33 574	132 102	0,077	230,9	677,5	766,5
29	11	473,3	32 750	964	239	79,114	32 750	132 097	0,073	225,2	683,1	766,5
28	10	461,4	31 927	964	233	79,111	31 927	132 092	0,070	219,5	688,8	766,5
27	9	449,5	31 103	964	227	79,108	31 103	132 086	0,065	213,9	694,4	766,5
26	8	437,6	30 280	964	221	79,105	30 280	132 081	0,061	208,2	700,1	766,5
25	7	425,7	29 456	964	215	79,101	29 456	132 075	0,057	202,6	705,7	766,5
24	6	413,8	28 633	964	209	79,097	28 633	132 068	0,052	196,9	711,4	766,5
23	5	401,9	27 810	964	203	79,093	27 810	132 062	0,047	191,3	717,1	766,5
22	4	390,0	26 986	964	197	79,089	26 986	132 054	0,041	185,6	722,7	766,5
21	3	378,1	26 163	964	191	79,084	26 163	132 047	0,035	180,0	728,4	766,5
20	2	366,2	25 339	964	185	79,079	25 339	132 039	0,029	174,3	734,0	766,5
19	1	354,3	24 516	964	179	79,074	24 516	132 030	0,023	168,7	739,7	766,5
18	0	342,4	23 693	964	173	79,069	23 693	132 021	0,016	163,0	745,3	766,5
17	-1	330,5	22 869	964	167	79,063	22 869	132 011	0,008	157,4	751,0	766,5
16	-2	318,6	22 046	964	161	79,056	22 046	132 000	0,000	151,7	756,6	766,5
15	-3	306,7	21 222	964	155	79,049	21 222	131 989	-0,009	146,0	762,3	766,5
14	-4	294,8	20 399	964	149	79,042	20 399	131 976	-0,018	140,4	767,9	766,5
13	-5	282,9	19 575	964	143	79,034	19 575	131 963	-0,028	134,7	773,6	766,5
12	-6	271,0	18 752	964	137	79,025	18 752	131 948	-0,039	129,1	779,2	766,5
11	-7	259,1	17 929	964	131	79,016	17 929	131 932	-0,051	123,4	784,9	766,5
10	-8	247,2	17 105	964	125	79,005	17 105	131 915	-0,065	117,8	790,6	766,5
9	-9	235,3	16 282	964	119	78,994	16 282	131 895	-0,079	112,1	796,2	766,5
8	-10	223,4	15 458	964	113	78,981	15 458	131 874	-0,096	106,5	801,9	766,5
7	-11	211,5	14 635	964	107	78,967	14 635	131 850	-0,114	100,8	807,5	766,5
6	-12	199,6	13 811	964	101	78,951	13 811	131 824	-0,134	95,2	813,2	766,5
5	-13	187,7	12 988	964	95	78,933	12 988	131 794	-0,156	89,5	818,8	766,5
4	-14	175,8	12 165	964	89	78,912	12 165	131 760	-0,182	83,9	824,5	766,5
3	-15	163,9	11 341	964	83	78,889	11 341	131 721	-0,212	78,2	830,1	766,5
2	-16	152,0	10 518	964	77	78,862	10 518	131 676	-0,246	72,6	835,8	766,5
1	-17	152,0	10 518	964	71	85,527	10 518	142 804	7,565	66,9	**841,4**	766,5

Tablica 5-6: Tablica struja i napona za „zajednički“ namot s 173 zavoja i priključenim filterom od 20Mvar-a



Slika 5-5: Trofazni (shematski) prikaz ispravljačkog transformatora s regulacijom u međukrugu

5.4.4 Dimenzioniranje glavnih komponenti

Ograničenje transportne visine upućuje na standardnu jednokatnu izvedbu **GT**-a. Neophodno je izraditi dva **GT**-a svaki u 6-pulsnoj izvedbi s usisnom prigušnicom. Usisnu prigušnicu se može izvesti kao jednostruku (6-pulsna izvedba) i dvostruku (12-pulsna izvedba). Dvostruka izvedba je optimalno rješenje jer je broj steznih elemenata upola manji.
Usisna prigušnica se mora nalaziti između dva 6-pulsna **GT**-a, kako bi duljina priključaka obaju sistema bila približno jednaka. Položaj **GT**-a određuje položaj aktivnog dijela **RT**-a, a samim time i položaj regulacijskih sklopki.

5.4.4.1 Regulacijski transformator (**RT**)

Na osnovu rezultata dobivenih korištenjem programa za proračun i optimiranje aktivnog dijela dobivene su slijedeće (osnovne) vrijednosti za izradu modela. Za regulaciju napona primara potrebne su tri jednofazne sklopke u otvorenom spoju (**slika 5-5.**). Kako bismo izbjegli neželjene nesimetrije u pogonu transformatora neophodna je aktivna zaštita u paralelnom radu regulacijskih sklopki.

Dimenzije regulacijskog transformatora (**RT**):

$D_{S(RT)}$ [mm] …545mm promjer jezgre,

$B_{S,J(RT)}$[mm] …520mm visina najvećeg paketa jezgre (visina jarma i stupa su kod jezgre 3/0 jednaki),

$E_{S(RT)}$ [mm] …1100mm razmak između stupova jezgre,

$H_{P(RT)}$ [mm] …2160mm visina prozora,

$D_{N(RT)}$ [mm] …1042mm vanjski promjer zadnjeg namot gledanog od jezgre,

$E_{SK(RT)}$[mm] …1000mm razmak između sklopki (ovisi o izvedbi priključaka),

$E_{SKJ(RT)}$[mm] …1100mm razmak između sklopke i najbližeg stupa (vidi $E_{SK(RT)}$),

$D_{SK(RT)}$[mm] …≈585mm promjer sklopke (računska vrijednost),

$A_{L(RT)}$ [mm] …≈100mm prostor za priključke i ugradnju aktivnog dijela,

$H_{PD(RT)}$[mm] …35mm debljina donje prečke za standardnu jezgru,

$H_{IS(RT)}$[mm] …5mm debljina izolacije između jezgre i donje (gornje) prečke,

$H_{PG(RT)}$[mm] …10mm debljina gornje prečke za standardnu jezgru,

$O_{(RT)}$ [mm] …40mm okvir za stabilizaciju potpore između gornje prečke i poklopca kotla.

Na osnovu sljedećih izraza računaju su dimenzije modela **RT**-a:

- duljina modela (**RT**)-a:

$$L_{RT} = A_{L(RT)} + D_{N(RT)}/2 + 2 \times E_{S(RT)} + E_{SKJ(RT)} + 2 \times E_{SK(RT)} + D_{SK(RT)}/2 + A_{L(RT)}$$
$$L_{RT} = 100 + 1042/2 + 2 \times 1100 + 1100 + 2 \times 1000 + 585/2 + 100 = 6313{,}5 \approx 6350\text{mm}$$

- širina modela (**RT**)-a:

$$B_{RT} = D_{N(RT)} + 5/2 \times A_{L(RT)}$$
$$B_{RT} = 1042 + 5/2 \times 100 = 1292 \approx 1300\text{mm}$$

- visina modela (**RT**)-a:

$$H_{\mathrm{RT}} = H_{\mathrm{PD(RT)}} + H_{\mathrm{IS(RT)}} + B_{\mathrm{J(RT)}} + H_{\mathrm{P(RT)}} + H_{\mathrm{IS(RT)}} + H_{\mathrm{PG(RT)}} + O_{\mathrm{(RT)}} + 35$$
$$H_{\mathrm{RT}} = 35 + 5 + 520 + 2160 + 520 + 5 + 10 + 40 + 35 = 3330 \approx 3350\mathrm{mm}.$$

5.4.4.2 Ispravljački transformator s transduktorima (**GT+T**)

Osnovne komponente ispravljačkog transformatora s transduktorima:

- jezgra s drvenim steznim sustavom (sušena bukovina),
- bakre šine priključaka sekundarne strane,
- transduktori (magnetske prigušnice).

Magnetske prigušnice se koriste za finu regulaciju istosmjernog napona na sekundarnoj strani. Za ovu regulaciju istosmjernog napona do 70 V i nazivne struje preko 2,5 kA koriste se jednozavojne prigušnice pri čemu jedan zavoj čini vodič (izvedba s dva paralelna vodiča i uljnim kanalom ca.5mm nam omogućuje manje dimenzije jezgre i bolje odvodenje zagrijanja u bakrenim šinama i samim transduktorskim jezgrama) oko kojeg su poslagane trakasto prstenaste jezgre od hladnovaljanog transformatorskog lima u ovalnoj izvedbi (**slika 5-6.**). Upravljanje se vrši pomoću istosmjerne struje u upravljačkom namotu koji je omotan oko jezgri transduktora.

Dimenzije ispravljačkog transformatora (**GT+T**):

$D_{\mathrm{S(GT)}}$ [mm] …424mm promjer jezgre,

$B_{\mathrm{S,J(GT)}}$[mm] …400mm visina najvećeg paketa jezgre,
(visina jarma i stupa su jednake kod jezgre 3/0),

$E_{\mathrm{S(GT)}}$ [mm] …1100mm (tehnološki) razmak između stupova jezgre,

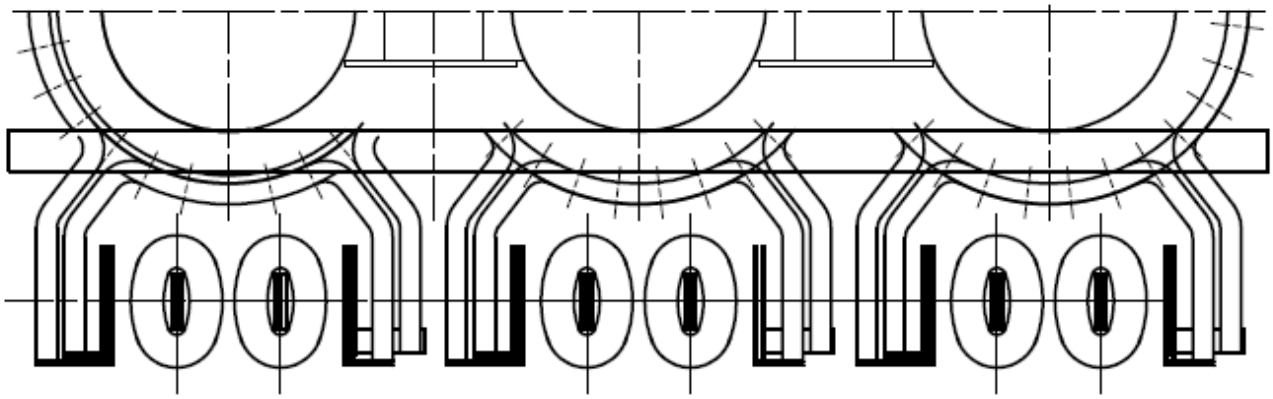
$H_{\mathrm{P(GT)}}$ [mm] …2200mm visina prozora,

$D_{\mathrm{N(GT)}}$ [mm] …786mm vanjski promjer sekundarnog (vanjskog) namota,

$H_{\mathrm{PD(GT)}}$[mm] …≈100mm visina U-Profila donje prečke za jezgru s drvenim steznicima,

$H_{\mathrm{IS(GT)}}$[mm] …5mm debljina izolacije između jezgre i donje (gornje) prečke,

$A_{\mathrm{L(GT)}}$ [mm] …≈100mm prostor za ugradnju aktivnog dijela (po duljini),



Slika 5-6: Položaj transduktora u priključcima glavnog transformator

Na osnovu **slike 5-6.** i sljedećih izraza izračunat ćemo dimenzije modela **GT**-a:

- duljina modela (**GT+T**)-a

  određivanje (tehnološkog) razmaka između stupova prema **slici 5-6.**

  $B_{TS(GT)}$[mm] …50mm širina transponiranog vodića namota sekundara,

  $A_{TS(GT)}$[mm] …20mm potrebni ugradbeni razmak između dva transponirana vodića,

  $A_{U(GT)}$ [mm] …50mm potrebni ugradbeni razmak između bakrenih šina i transponiranog vodića (transduktora),

  C_{PT} [mm] …74mm debljina transduktorske jezgre,

  A_{PT} [mm] …82mm širina prozora u jezgri potrebnu za ugradnju bakrenih šina,

  širina transduktorske jezgre

  $$B_T = 2 \times C_{PT} + A_{PT} = 2 \times 74 + 82 = 230\text{mm}$$

  $A_{T\text{-}T}$ [mm] …30mm potrebni ugradbeni razmak između dva transduktora,

  B_{SS} [mm] …12mm debljina bakrenih šina priključaka,

  $A_{S\text{-}S}$ [mm] …7mm razmak između dviju bakrenih šina,

  tehnološki razmak između stupova prema **slici 5-6.**

  $$E_{S(GT)} = 2 \times 50 + 2 \times \left(2 \times B_{TS(GT)} + A_{TS(GT)} + 2 \times B_{SS} + A_{S-S} + 2 \times A_{U(GT)} + B_T + A_{T-T}/2\right)$$
  $$E_{S(GT)} = 2 \times 50 + 2 \times \left(2 \times 50 + 20 + 2 \times 12 + 7 + 2 \times 50 + 230 + 30/2\right) = 1092 \approx 1100\text{mm}$$

  izraz za duljinu modela

  $$L_{GT} = 2 \times A_{L(GT)} + D_{N(GT)} + 2 \times E_{S(GT)}$$
  $$L_{GT} = 2 \times 100 + 786 + 2 \times 1100 = 3186 \approx 3200\text{mm},$$

- širina modela (**GT+T**)-a

  C_{PT} [mm] …74mm debljina transduktorske jezgre,

  B_{PT} [mm] …234mm širina prozora u jezgri potrebnu za ugradnju bakrenih šina,

  širina transduktorske jezgre

  $$L_T = 2 \times C_{PT} + B_{PT} = 2 \times 74 + 234 = \underline{382\text{mm}}$$

  $A_{T\text{-}N}$ [mm] …80mm potrebni ugradbeni razmak između transduktora (šina) i namota,

  $A_{B(GT)}$ [mm] …≈100mm prostor za ugradnju aktivnog dijela (po širini),

  širina bakrene šina priključaka sekundara

  I_S [A] …18764Amm najveća struja niskonaponske strane,

  J_S [A/mm^2] …(3,6 - 4,1) A/mm^2 dozvoljena gustoća struje za prirodno cirkuliranje ulja,

$$T_S = I_S / B_S / J_S$$
$$T_S = 18764/12/(3{,}6...4{,}1) = 434...381 \Rightarrow \underline{414\text{mm}}.$$

Za širinu priključaka koristi se veća vrijednost od T_S i L_T ili brojčano 414mm.

Magnetski razmak između bakrene šina (sredina bakrene šine) do aluminijskog zaslona kotla transformatora:

f [Hz] …50Hz frekvencija mreže,

θ_{AL} [K] …(10…30K) nadtemperatura aluminijskog zaslona odabrano 10K,

$$A_{AL-S} = \frac{0{,}33 \times I_S}{25} \times \sqrt[4]{\frac{f}{50}} \times \sqrt{\frac{10}{\theta_{AL}}} = \frac{0{,}33 \times 18764}{25} \times \sqrt[4]{\frac{50}{50}} \times \sqrt{\frac{10}{10}} = 247{,}7 \approx 250\text{mm}$$

izraz za širinu modela

$$B_{GT} = A_{B(GT)} + D_{N(GT)} + A_{T\text{-}N} + T_S/2 + A_{AL-S} + 35$$
$$B_{GT} = 100 + 786 + 80 + 414/2 + 250 + 35 = 1463 \approx 1470\text{mm}$$

- visina modela (**GT+T**)-a

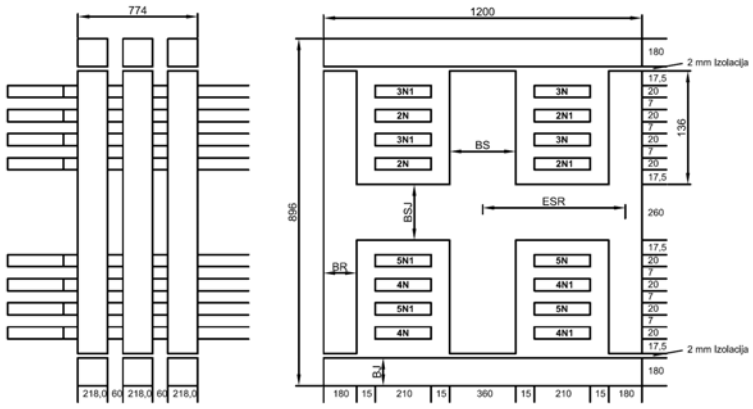
$$H_{GT} = H_{PD(GT)} + H_{IS(GT)} + B_{J(GT)} + H_{P(GT)} + B_{J(GT)} + 35$$
$$H_{GT} = 100 + 5 + 400 + 2200 + 400 + 35 = 3140 \approx 3150\text{mm}.$$

Dimenzije drugog glavnog transformatora su identične prvom, pri čemu je broj zavoja namota u međukrugu određen grupom spoja (Y i D), neophodnoj za pomak faza (α=30°) između dva 6-pulsna sistema u cilju dobijanja ispravljačke grupe u 12-pulsnom spoju.

Broj zavoja namota spojenog u trokut je za √3 veći od onog u zvijezdu.

5.4.4.3 Usisna prigušnica (**UP**)

Usisne prigušnice se koriste kod spoja dvostruke zvijezde i služe za povezivanje nultočki obaju sustava s provodnicima transformatora. One ne služe za glađenje istosmjerne struje, već za dijeljenje izmjeničnog napona i sprečavanje nastajanja struja izjednačenja; time omogućuju vođenje dioda u paru uz vrijeme komutacije dvaju sustava 120°. Izrađene su od hladno valjanog transformatorskog lima u ogrnutoj izvedbi, pri čemu su limovi slagani klasičnim prekrivenim načinom pod kutem 90°.



Slika 5-7: Dimenzije usisne prigušnice bez steznog sustava

BS [mm] …360mm širina jarma,

HS [mm] …218mm visina paketa jezgre,

BR [mm] …180mm širina povratnog jarma,

BSJ [mm] …260mm širina međujarma (izmedu dva 6-pulsna sistema),

$BS_{(UP)}$[mm] …210mm širina bakrenih šina,

$TS_{(UP)}$[mm] …20mm debljina bakrenih šina,

B_{TEH1} [mm] …15mm ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer x),

B_{TEH2} [mm] …17,5mm ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer y),

B_{TEH3} [mm] …7mm ugradbeni razmak između bakrenih šina i jezgre (smjer y),

HS [mm] …218mm visina paketa jezgre,

B_{TEH4} [mm] …60mm ugradbeni razmak između paketa jezgre (smjer z),

- duljina modela (**UP**)-a

$$L_{UT} = 2 \times BR + 4 \times B_{TEH2} + 6 \times B_{TEH3} + 8 \times TS_{(UP)} + 2 \times 2 + BSJ + 2 \times 2 + 2 \times 80$$
$$L_{UT} = 2 \times 180 + 4 \times 17{,}5 + 6 \times 7 + 8 \times 20 + 4 + 260 + 4 + 2 \times 80 = 1060\text{mm}$$

- širina modela (**UP**)-a

$$B_{UT} = 2 \times BR + 4 \times B_{TEH1} + BS + 2 \times BS_{(UP)} + 2 \times 50$$
$$B_{UT} = 2 \times 180 + 4 \times 15 + 360 + 2 \times 210 + 2 \times 50 = 1300\text{mm}$$

- visina modela (**UP**)-a

$$H_{UT(min)} = 100 + 20 + 2 \times BS_{(UP)} + 2 \times B_{TEH2} + 3 \times HS + 2 \times B_{TEH4}$$
$$B_{UT(min)} = 100 + 20 + 2 \times 210 + 2 \times 17{,}5 + 3 \times 218 + 2 \times 60 = 1349 \approx 1350\text{mm}.$$

5.4.4.4 Položaj komponenti u kućištu

Nakon što su određene dimenzije svih komponenti ispravljačkog transformatora pristupa se njihovom pozicioniranju u cilju traženja optimalnog položaja u kućištu transformatora.

Posebna pažnja se posvećuje redoslijedu ugradnje i funkcionalnoj povezanosti svih komponenti ispravljačkog transformatora (**slika 5-8.**).

5.4.4.5 Položaj usisne prigušnice (**UP**)

Usisna prigušnica se postavlja uvijek bočno pored glavnog transformatora, gdje se ne nalaze priključci niskonaponske odnosno visokonaponske strane. Položaja usisne prigušnice je određen tehničkom specifikacijom i njezinom izvedbom (6-pulsna ili 2x6=12-pulsna izvedba).

U 12-pulsnoj izvedbe jedini položaj je između dva aktivna dijela, pošto je duljina priključaka dvaju 6-pulsnih sistema u tom slučaju približno jednaka, a samim time i vrijednosti dodatnih gubitaka u bakrenim šinama priključaka (tehnološka ograničenja).

5.4.4.6 Položaj ispravljačkog transformatora (**GT1+T1**)

Preduvjetima iz tehničke specifikacije, te položajem i izvedbom usisne prigušnice određen je položaj prvog glavnog transformatora s transduktorima u 6-pulsnoj izvedbi lijevo dolje u odnosu na priključke niskonaponske strani.

5.4.4.7 Položaj ispravljačkog transformatora (**GT2+T2**)

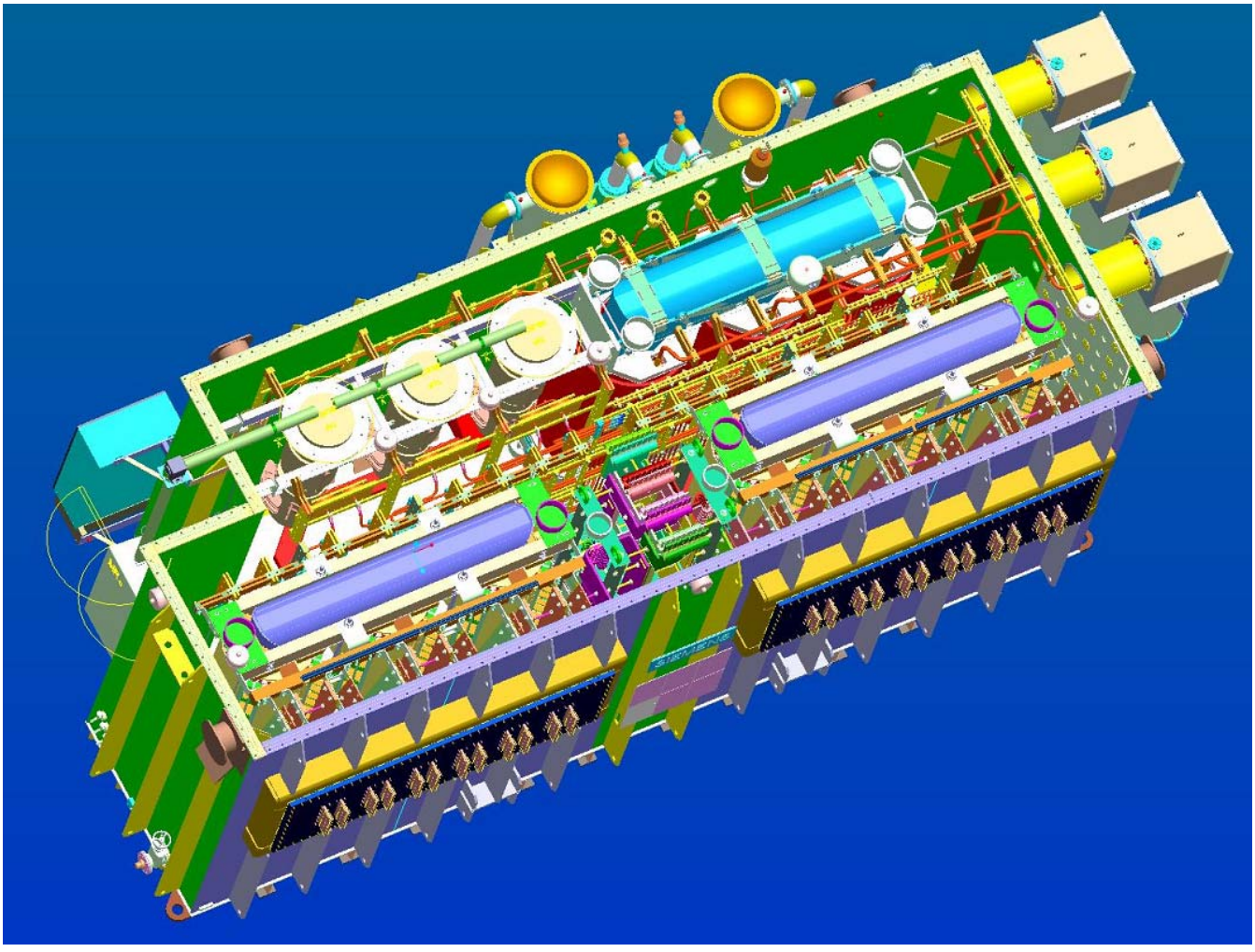
Položaj desno dolje drugog aktivnog dijela u 6-pulsnoj izvedbi je određen tehničkom specifikacijom i položajem prigušnice u 12-pulsnoj izvedbi.

5.4.4.8 Položaj regulacijskog transformatora (**RT**)

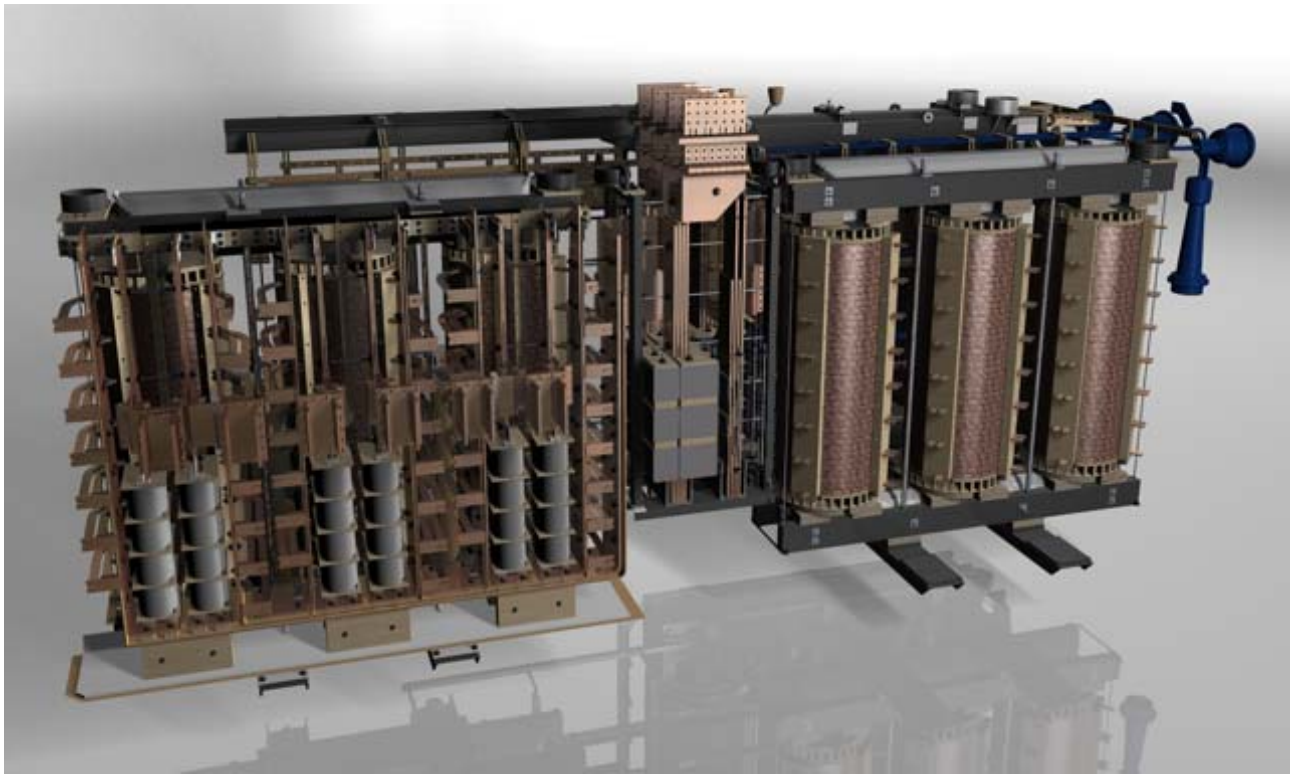
Regulacijski transformator postavljamo paralelno s „ispravljačkim“ komponentama u cilju jednostavnosti i duljine priključaka između komponenti ispravljačkog transformatora.

5.4.5 Projektno-konstrukcijsko rješenje

Problem se svodi na optimalno dimenzioniranje i iskorištenje prostora između komponenti i kućišta transformatora, pri čemu se nesmiju zanemariti utjecaji tolerancije ugradnje komponenti i elektromagnetskog polja ispravljačkog transformatora u pogonu (**slika 5-8.** i **5-9.**).



Slika 5-8: Projektno - konstrukcijsko rješenje (Model u ProE-u)



Slika 5-9: Aktivni dijelovi ispravljačkog transformatora

5.5 FIZIKALNI MODEL

5.5.1 Model aktivnog dijela

Prizma je geometrijski oblik model aktivnog dijela. U ovom slučaju pod „aktivnim“ dijelom podrazumijevaju se sljedeći elementi:

- jezgra sa steznim sustavom,
- namoti,
- izolacija namota,
- priključci.

Pravokutni paralelopiped je određen pomoću tri dimenzije: duljine (w_i), širine (h_i) i visine (d_i). Aktivni dio transformatora je pozicioniran na dno kotla tako da su namoti postavljeni vertikalno.

5.5.2 Model kućišta transformatora

Geometrijski oblik koji predstavlja kućište transformator je pravokutni paralelopiped ovih dimenzija, duljine (W), širine (H) i visine (D). Visina kućište je određena najvišim aktivnim dijelom prema izrazu

$$D = d_{\max} + \Delta d$$

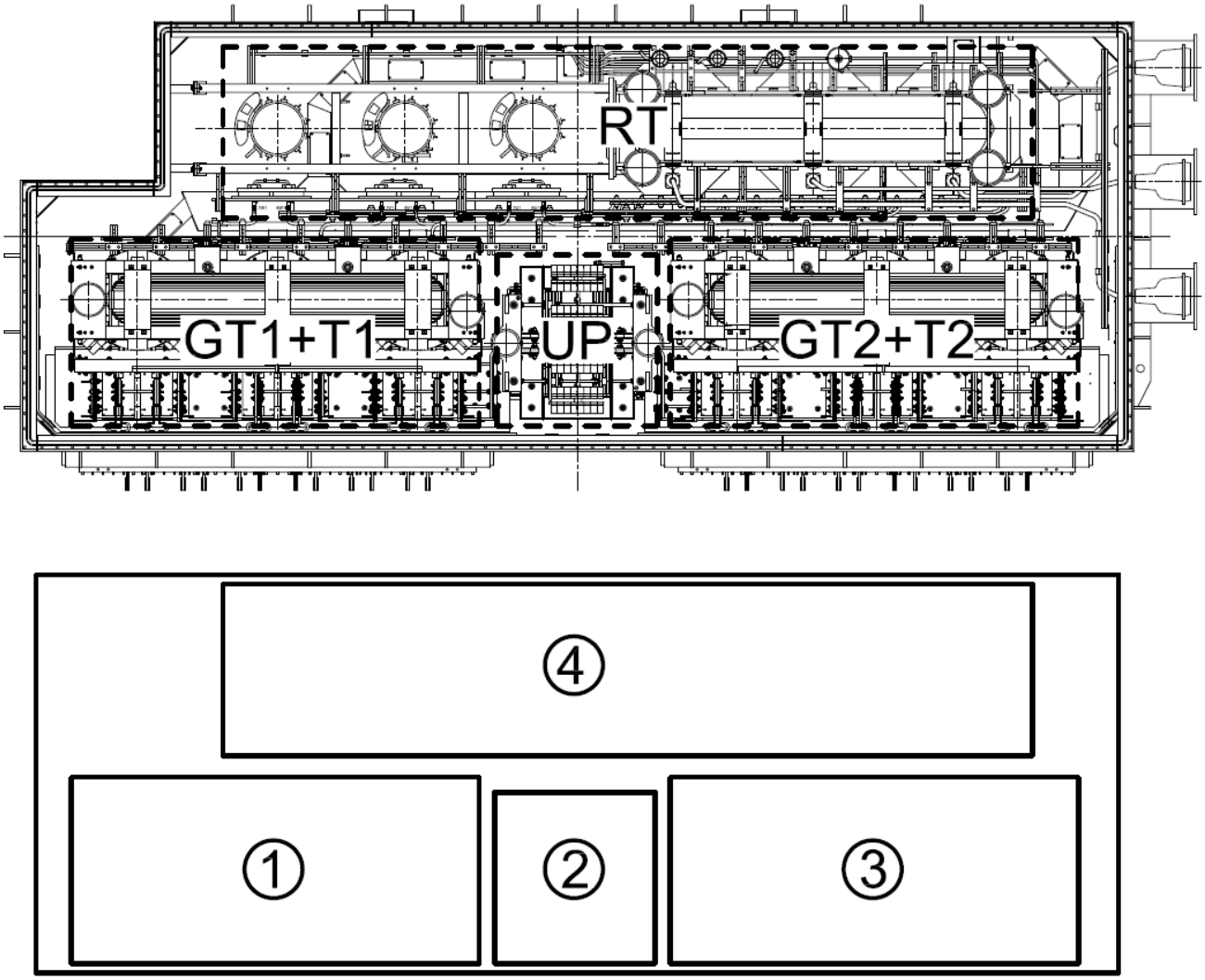
Pri čemu je d_{max} visina najvišeg aktivnog dijela, a vrijednost Δd se kreće između 50 mm i 110 mm ovisno o snazi transformatora, a neophodna je za neometano cirkuliranje ulja oko aktivnih dijelova u kotlu transformatora.

5.5.3 Model industrijskog transformatora

Za primjer ispravljačkog transformatora opisanog u poglavlju 5.4 trodimenzionalni prostor je uvođenjem konstante za visinu kućišta sveden na dvodimenzionalni, a samim time i model iz primjera.

Dvodimenzionalni modela pakiranja opisana je s ove dvije metode rješavanja:

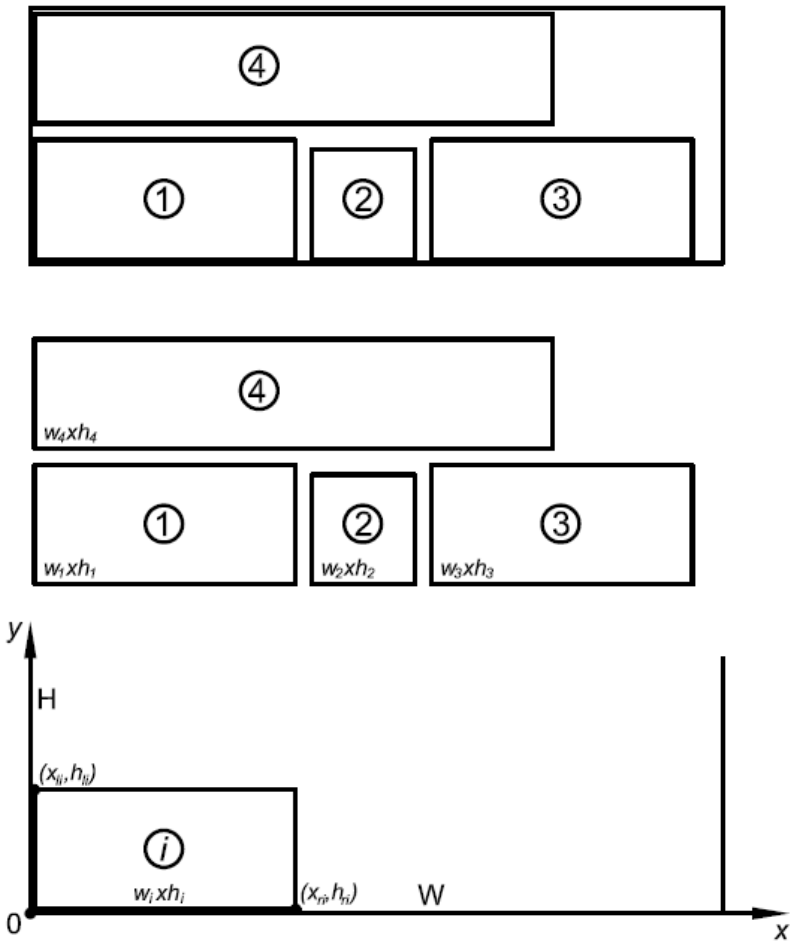
- egzaktna metoda uz korištenje heuristike **BL,**
- **FFDH** metoda uz korištenje heuristike **BL** pri rješavanju **2SP|R|G** problema.



Slika 5-10: Dvodimenzionalni model s redoslijedom ugradnje

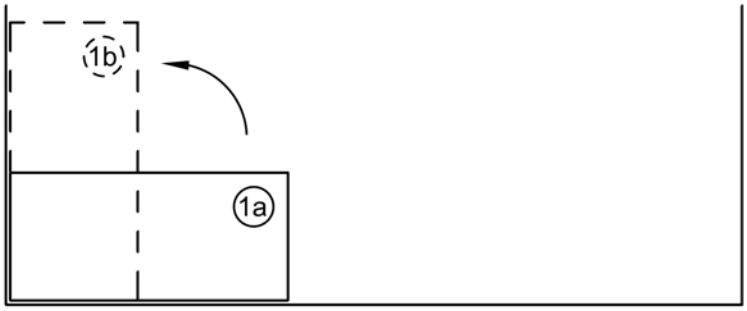
5.6 EGZAKTNA METODA

"Das Zeichnen ist die Sprache des Ingenieurs" je kredo prof. Karla Culmanna pomoću kojeg će biti opisan postupak određivanja položaja pravokutnih oblika u pravokutnoj posudi, pri čemu je širinu trake (*H*) potrebno minimizirati.



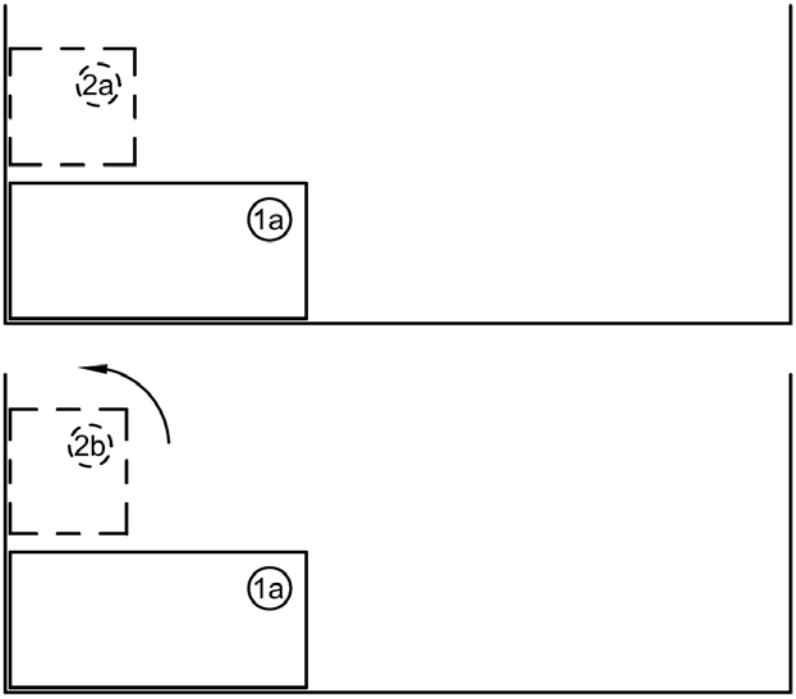
Slika 5-11: Pojednostavljeni prikaz elementa (aktivnih dijelova) s položajem u posudi (kućištu)

Redoslijed postavljanja pravokutnih elemenata u posudu određen je tehnološkim postupkom koji je već objašnjenj u poglavlju 5.4.4.4. Prvo se postavlja element s oznakom 1 tako da je njegov lijevi donji kut postavljen u ishodište koordinatnog sustava (najdulji brid je postavljen na os x). Rotacija je moguća, ali je udaljenje od optimuma, tako da je grananje iza ovog čvorišta moguće isključiti iz daljnjeg razmatranja.

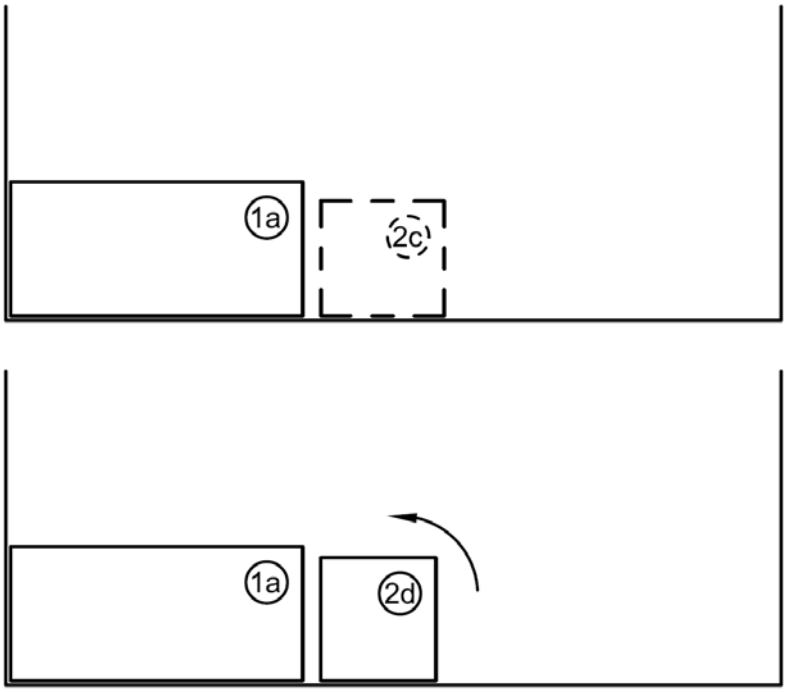


Slika 5-12: Postavljanje prvog elementa u ishodište koordinatnog sustava

U drugom koraku postavljamo element 2, pri čemu postoje „dva“ donja ugla. Položaj „na“ prvom elementu ne vodi k optimalnom rješenju bez obzira na rotaciju. Kod položaja „desno pored“ potrebno je uzeti položaj pri kojemu je duljina (w_2) najmanja, ali ne veća od (h_1). Ovdje se primjenjuje heuristika **BL**.



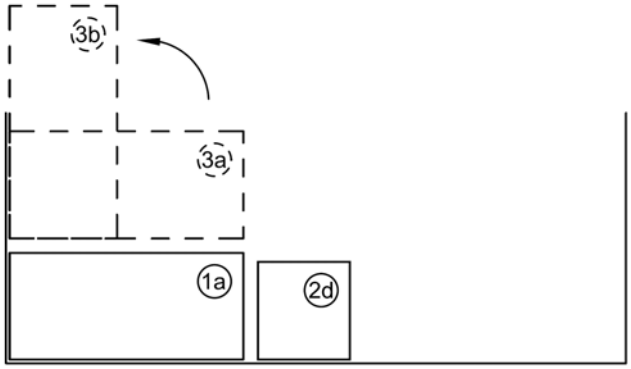
Slika 5-13: Postavljanje drugog elementa na prvi element



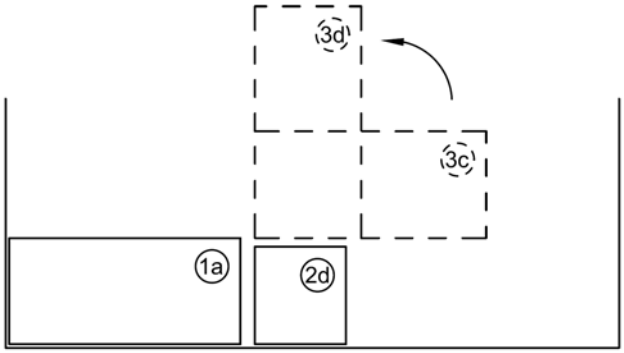
Slika 5-14: Postavljanje drugog elementa „desno pored“ prvog element

I u ovom slučaju grananje koje udaljuje od optimalnog rješenja je zanemareno i na taj način isključeno iz daljnjeg razmatranja nepotrebne varijacije iza čvorišta.

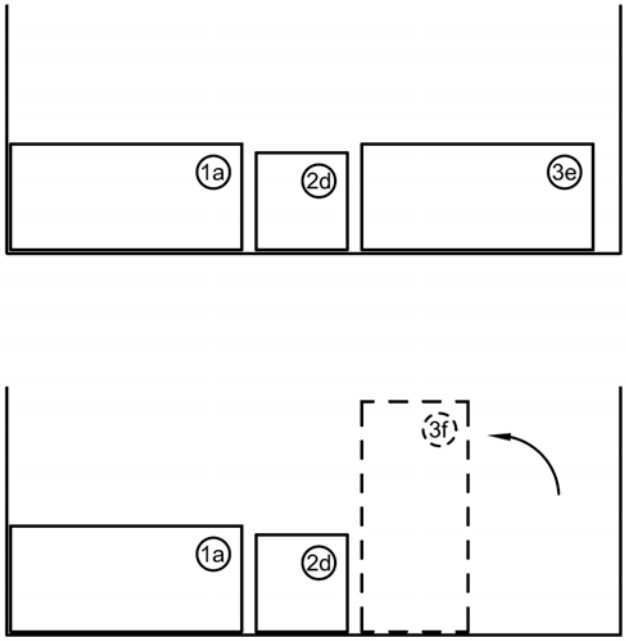
U trećem koraku se ponavlja isti postupak s elementom 3, u ovom slučaju postoje „tri“ donja ugla. Položaj na prvom odnosno drugom elementu (ukoliko je $h_1 \neq h_2$), pri čemu u oba slučaja rješenje vodi od optimuma (bez obzira na rotaciju). Kod položaja „desno pored“ potrebno je uzeti položaj pri kojemu je širina (h_3) najmanja.



Slika 5-15: Postavljanje trećeg elementa na prvi element

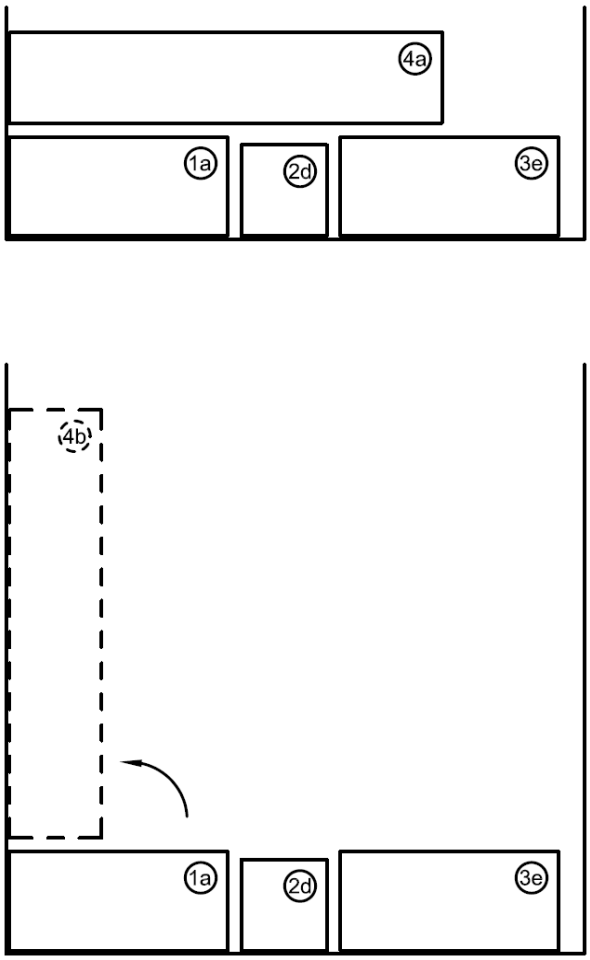


Slika 5-16: Postavljanje trećeg elementa na drugi element



Slika 5-17: Postavljanje trećeg elementa „desno pored“ drugog elementa

Posljednji element se može postaviti samo na prvi element, pri čemu je samo jedno rješenje optimalno.



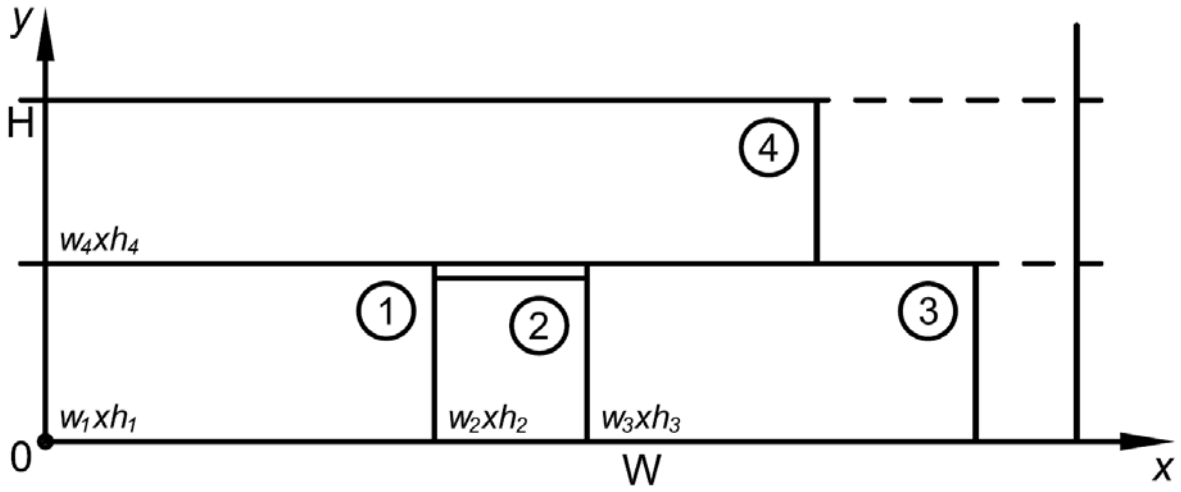
Slika 5-18: Postavljanje posljednjeg elementa

Na ovaj način je dobiven optimum koji ispunjava zahtjeve dane tehničkom specifikacijom, a opisan je ovim oznakama 1a2d3e4a.

Ovu egzaktnu metodu **2D** pakiranja je moguće pojednostaviti i ubrzati korištenjem giljotinskog reza i heuristike **FFDH**, pri čemu se rotaciju za 90° može izostaviti, te model opisati kao **2SP|R(O)|G.**

5.7 PRIJEDLOG RJEŠENJA 2SP|R(O)|G PROBLEMA

Rješenje **2SP|R|G** pakiranja se može dobiti korištenjem giljotinskog reza i heuristikama **FFDH** i **BL** (**slika 4-1.** i **4-5.**). Optimalno rješenje upotrebom navedenih heuristika može se vidjeti na **slici 5-19.**



Slika 5-19: Optimalno rješenje upotrebom giljotinskog reza i heuristika **FFDH** i **BL**

5.7.1 Matematički model i algoritam

Problem dvodimenzionalnog strip pakiranja se sastoji od pozicioniranja *n* pravokutnih elementa na pravokutnu traku konstantne duljine (*W*) i širine (*H*) koju je potrebno minimizirati, pri čemu su prilikom pakiranja elementi neprekriveni i mogu se rotirati za 90°. Svaki pravokutni element *i* je određen sa dvije dimenzije duljinom (w_i) i širinom (h_i) [25, 26].

Položaj prvog elementa na površini je u lijevom uglu dolje (x_i ,y_i) gdje se nalazi i početak koordinatnog sustava.

Model **2SP|R|G** je definiran na sljedeći način:

Minimiziraj širinu *H*

$$x_i + w_i \le W, \forall i \in N \tag{40}$$

$$y_i + h_i \le H, \forall i \in N \tag{41}$$

$$x_i + w_i \le x_j \to ili \to x_j + w_j \le x_i \to ili \tag{42}$$

$$y_i + h_i \le y_j \to ili \to y_j + h_j \le y_i, \forall (i, j) \in N, i \ne j \tag{43}$$

$$x_i + y_i \ge 0, \forall i \in N \tag{44}$$

Pri čemu pakiranje mora zadovoljiti slijedeće zahtjeve:

- svaki pravokutnik mora biti u potpunosti postavljen na zadanu površinu

$$0 \le x_{li} < x_{ri} \le W \wedge 0 \le y_{li} < y_{ri} \le H; \rightarrow i = 1,2....n, \tag{45}$$

- svaki pravokutnik može biti postavljen horizontalno ili vertikalno (rotacija za 90°)

$$\left(x_{ri} - x_{li} = w_i \wedge y_{ri} - y_{li} = h_i\right) \wedge \left(x_{ri} - x_{li} = h_i \wedge y_{ri} - y_{li} = w_i\right); \rightarrow i = 1,2....n, \tag{46}$$

- nije dozvoljeno prekrivanje pravokutnika

$$x_{li} \ge x_{rj} \vee x_{lj} \ge x_{ri} \vee y_{li} \ge y_{rj} \vee y_{lj} \ge y_{ri} \rightarrow i, j = 1,2....n, i \ne j \tag{47}$$

- širina H mora biti minimizirana

$$0 \le x_{li} \le W, 0 \le x_{ri} \le W \wedge 0 \le y_{li} \le H, 0 \le y_{ri} \le H \tag{48}$$

Prvi pravokutni element je postavljen u lijevi donji kut pravokutne posude heuristikom **BL**. Za ovu poziciju prvog pravokutnog elementa koristi se oznaka I. Sljedeći pravokutni element može biti postavljen na poziciju p koja se u odnosu na položaj I može nalaziti samo desno ili gore, pri čemu nije moguće prekrivanje bridova. Za svaki pravokutni element R_i koji se postavlja u posudu pravokutnog oblika neka su (x_{li},y_{li}) koordinate njegovog lijevog donjeg kuta, a (x_{ri},y_{ri}) koordinate njegovog desnog gornjeg kuta. Sada je moguće pakirati ostale pravokutne elemente uz slijedeće ograničenje:

$$S(I) = \left[(x, y) : \left(\forall R_i \in I, x \ge x_{ri} \vee y \ge y_{ri}\right) \wedge \left(x \le W \wedge y \le H\right)\right] \tag{49}$$

Tako da algoritam modela problema **2SP|O|G** uz korištenje heuristika **FFDH** i **BL** glasi:

opis algoritma: Potrebno je postaviti pravokutnike različitih dimenzija na traku beskonačne širine (H) i konstantne duljine (W),

ulazni podaci: Broj pravokutnika koje je potrebno postaviti i, dimenzije pravokutnika su određen sa dvije dimenzije duljinom (w_i) i širinom (h_i) te beskonačna traka konstantne duljine (W),

izlazni podaci: minimalna širine beskonačne trake (H)

1: nivo←0; h(nivoa)←0; i←1; Broj nivoa←1
2: poredaj pravokutnike po redoslijedu postavljanja na traku
3: postavi pravokutnik i lijevo dolje na dno trake (**BL**); h(nivoa+1)← h_i
4: **za** i=2,…,n **provedi**
5: nađi najniži nivo od svih raspoloživih nivoa (počevši od početka trake)
6: **ako** postoji takav nivo **tada**
7: postavi pravokutnik i lijevo dolje u taj nivo
8: **inače** [ne postoji odgovarajući prostor u svim nivoima]
9: Broj nivoa←Broj nivoa+1; nivo←Broj nivoa;
h(nivoa)← h(nivoa-1)+ h_i; postavi pravokutnik u novi nivo
10: **kraj ako**
11: **kraj za**
12: ispiši ***H***= h(nivoa).

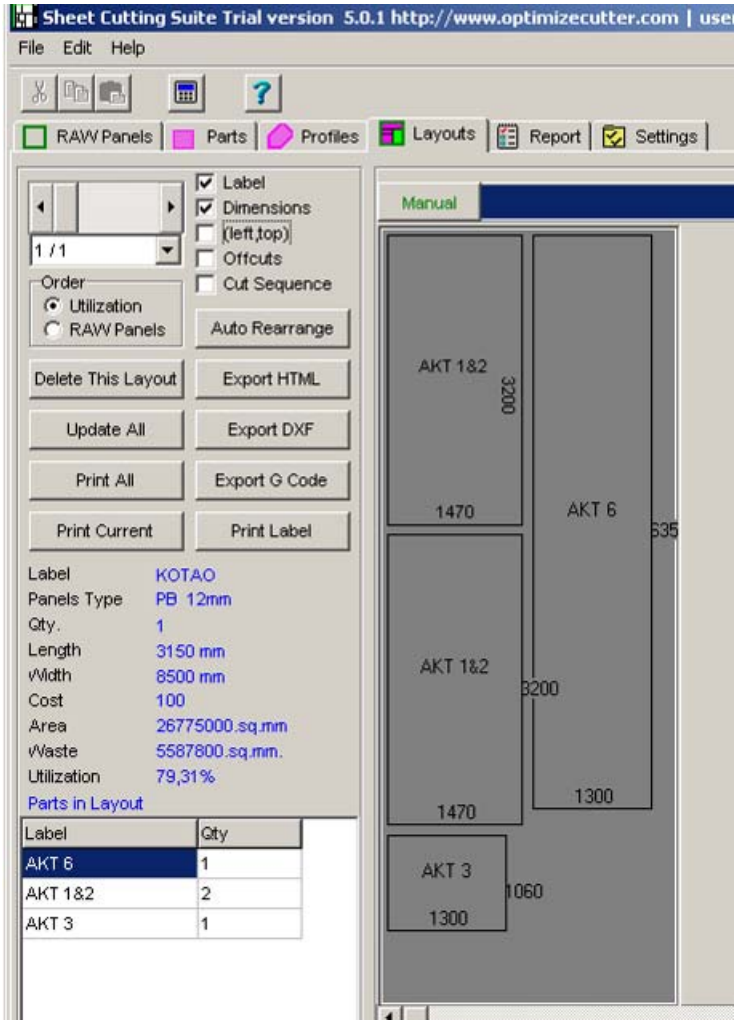
5.8 O PRIMJENI KOMERCIJALNIH PROGRAMA

Danas se može naći više programa koji se bave optimiranjem pri izrezivanju i pakiranju. Ovi komercijalni programi nisu u potpunosti prilagođeni modelu i opisanom algoritmu, jer ne posjeduju rutinu za redoslijed pakiranja pojedinih elemenata. Redoslijed pakiranja je uvjet za ispunjenje tehnološko-proizvodnog procesa opisanog u poglavlju 5.4.4.4.

Odabrani programski paket prvo postavlja element s najvećom površinom, pri čemu je duljina (w_i) manja od duljine trake (W) dakle **RT** (**slika 5.10.**), što ne zadovoljava redoslijed pakiranja opisanog u projektnoj bazi (vidi poglavlje 2.2.1.3.). Uvođenjem međukoraka u kojem su dimenzije elemenata s oznakom **GT1+T1** i **GT2+T2** identične (poglavlje 5.4.4.2) postavljaju se prvo pravokutni elementi istih dimenzija koji zauzimaju najveću površinu, a zajednička duljina je manja od duljine trake.

Giljotinski rez određuje širinu prvog niva h(nivoa) koja je jednaka širini (h_i) identičnih elemenata. U neispunjeni prostor prvog nivoa moguće je postaviti samo element **UP**. Postavljanjem zadnjeg elementa **RT** određuje se širina drugog odnosno posljednjeg nivoa s kojim završava **2D** pakiranje.

Ovo optimalno rješenje (**slika 5-20.**) u potpunosti zadovoljava ograničenja iz tehničke specifikacije, uvjete tehnološko-proizvodnog procesa i geometrijsko-matematičkog modela.



Slika 5-20: Optimalno rješenje dobiveno primjenom programskog paketa

Testiranje se ne može provesti na jednom slučaju, nego je za adekvatno testiranje modela (algoritma) potrebno posjedovati bazu projektno-konstrukcijskih rješenja.

6. ZAKLJUČAK

Projektiranje industrijskih transformatora je multidisciplinaran inženjerski posao koji povezuje znanja iz nekoliko grana tehnike i od projektanta se zahtijeva da uvijek traži maksimum (minimum) nekog cilja u okviru objektivno postojećih ograničenja. Takav pristup u sintezi inženjerskih znanja, odnosno razvoju proizvoda, nameće se kao nezaobilazan način postavljanja inženjerskog zadatka s ciljem optimiranja procesa projektiranja. Poznavanje industrijskih transformatora koji se optimiraju mora biti besprijekorno, kako bi bilo moguće postaviti zadovoljavajući fizičko-matematički model nužan za izradu algoritma.

Industrijski transformatori se dijele na pećne i ispravljačke transformatore. Pećni transformatori su energetski transformatori za napajanje elektrolučnih peći električnom energijom, koja se u pećima električnim lukom ili otpornim grijanjem pretvara u toplinsku energiju neophodnu za proces taljenja. Ispravljački transformatori su pak energetski transformatori koji se koriste u uređajima i pogonima za pretvaranje izmjenične u istosmjernu struju.

Dimenzije, položaj i veze industrijskog transformatora s industrijskim postrojenjem odlučujući su faktori u izradi projektno-konstrukcijskog rješenja. Izmjene na postrojenju ili promjena položaja priključaka s postrojenjem su neprihvatljive iz dva razloga: vrijednost izmjena veća je od vrijednosti transformatora i vrijeme potrebno za izvedbu ovih izmjena direktno utječe na proizvodni proces postrojenja, a time i njegovu rentabilnost.

U današnje vrijeme, kada je povećanje produktivnosti vezano s rentabilnošću postrojenja, pojavljuje se paradoks da se „stari“ transformator, za kojeg je postrojenje izvedeno, zamjenjuje novim kojemu je nazivna snaga i do 20% veća.

Zakon sličnosti u gradnji transformatora govori da će se uslijed ovog zahtjeva (povećanje snage) dimenzije aktivnog dijela, a time i dimenzije transformatora, povećati.

Kako bi se ispunili svi zahtjevi kupca u izradi projektno-konstrukcijskog rješenja potrebno je primijeniti metodu koja će olakšati pozicioniranje aktivnih dijelova na zadanoj površini što je naravno u suprotnosti s dosadašnjim principima u konstrukciji transformatora.

Područje projektiranja i optimiranja industrijskih transformatora je nedovoljno istraženo sa znanstvenog aspekta. Proučavanjem literature u kojoj se analizira ova i slična problematika te na osnovi dugogodišnje prakse u konstruiranju utvrđeno je da za projektiranje optimalne konstrukcije ne postoji jedinstveni model i „najbolja“ metoda. Za razvoj metoda optimiranja mjerodavno je praktično iskustvo koje je potrebno potkrijepiti znanstveno postavljenim modelom. Znanstveno utemeljenim pristupom i uz primjenu odgovarajućeg matematičkog modela može se unaprijediti pozicioniranje aktivnih dijelova u kućištu industrijskih transformatora.

Algoritam optimiranja mora biti pouzdan, točan i jednostavan za primjenu, kako bi se više vremena moglo posvetiti postavljenom projektno-konstrukcijskom zadatku i njegovom rješavanju.

Dvodimenzionalni problem oblikovanje i pakiranja se pojavljuje u praksi na više načina. Bez obzira da li se govori o oblikovanju ili pakiranju njihova osnovna struktura je jednaka.

Za model je odabrana izvedba s četiri aktivna djela, te egzaktnom metodom uz korištenje heuristike **BL** je dobiveno rješenje koje zadovoljava sve zahtjeve iz tehničke specifikacije.

Izrađen je matematički model i algoritam za rješavanje **2SP|R(O)|G** problema koristeći se heuristikama **FFDH** i **BL.** Metoda je potvrđena uporabom jednog komercijalnog programskog paketa za **2D** pakiranje i izrezivanje.

Vjerujem da će ovaj rad doprinijeti razvoju metoda projektiranja industrijskih transformatora.

LITERATURA*

Elektrotehnika (transformatori)

[1] Dolenc A. Transformatori I i II. Tehnička knjiga Zagreb 1989.

[2] Küchler R. Transformatoren. Springer-Verlag Berlin 1956.

[3] Heathcote M.J. J&P Transformer BookTeubner Verlagsgeselschaft 12.Edition 2003

[4] Kraaij D.J. Die Prüfung von Leistungstransformatoren Buchverlag, Elektrotechnik Aarau 1983

[5] Moeller F. Leitfaden der Elektrotechnik Grundlage der Elektrotechnik Band I Teubner Verlagsgeselschaft, 12.Auflage 1963

[6] Spanneberg F. Ruhende elekt. Maschinen; Transformatoren und Wandler. VEB 1989

[7] Vidmar M. Die Transformatoren, Birkhäuser Verlag 1956.

Energetska elektronika (ispravljači i ispravljački transformatori)

[8] Glas W. Stromrichter-Transformatoren ETZ 81.Jahrgang, Heft 3, 1960

[9] Möltgen G. Tyristoren in der technischen Anwendung Band 2: Netzgeführte Stromrichter, SIEMENS - Aktiengesellschaft 1967

[10] Moeller F. Leitfaden der Elektrotechnik Teil 3 Stromrichter Band II, Teubner Verlagsgeselschaft 12.Auflage 1963

[11] Nimmrichter W. Transformatoren für Halbleiterstromrichteranlagen AEG Mitteilungen, 51, 11/12, 1961

[12] Pelikan T. Gleichrichtertransformatoren für hohe Strome Brown Boveri Mitteilungen März/April 1961

[13] Specovius J. Grundkurs Leistungselektronik 3.Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

[14]- Formel und Tabellen Buch für Starkstrom-Ingenieure, W.Girardet Verlag, 2.Auflage 1960

Problem pakiranja i izrezivanja

[15] Chazelle B. The Bottom-Left Bin-Packing Heuristic: An Efficient Implementation. IEEE Transactions on Computers c32/8, 697-707. 1983.

[16] Chiong J. A. M. Lagenbilderstellung für Rapportstoffe, Ph.D Dissertation Bremen Universtität. 2002

[17] Dyckhoff H. Typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research 44, 145-159.1990

*Literatura koja je korištena u izradi ovog rada podijeljena je u nekoliko grupa (elektrotehnika, energetska elektronika, strojarstvo, problem pakiranja i izrezivanja), a izdanja se kreću od sredine prošlog stoljeća do danas.

[18] Hopper E. *Two-Dimensional Packing Utilising Evolutionary Algorithms and other Meta-Heuristic Methods. Ph.D. Thesis Cardiff University. 2000*

[19] Hopper E. & Turton B. *A genetic algorithms for a 2D industrial packing problem. Computers in Engineering 37, 375-378.1999*

[20] Iori M., Martello S. & Monaci M. *Metaheuristic Algorithms for the Strip Packing Problem. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 159–179. 2003*

[21] Jakobs S. *On genetic algorithms for the packing of polygons. European Journal of Operations Research 88, 165-181. 1996.*

[22] Liu D. and Teng H. *An improved BL-algorithm for genetic algorithm of the orthogonal packing of rectangles. European Journal of Operational Research 112, 413-419. 1999.*

[23] Lodi A., Martello S &Vigo D. *Approximation algorithms for the oriented two-dimensional bin packing problem. European Journal of Operational Research 112, 158-166 1999*

[24] Loncar J. *Algoritam za određivanje optimalnog rješenja problema smještanja figure datog oblika u zadanu figuru, Ph.D. Disertacija Sarejevski Universitet. 1982*

[25] Zhang D., Kang Y. &Deng A. *A new heuristic recursive algorithm for the strip rectangular packing problem. Computers & Operational Research, 33, 2209–2217. 2006*

[26] Zhang D., Kang Y. &Deng A. *A hybrid heuristic algorithm for the rectangular packing problem. Lecture notes in Computer Science Vol.3514 ,783–791. 2005*

Strojarstvo

[27] Böge A.(Hrsg.) *Formeln und Tabellen Maschinenbau 2.Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009*

[28] Busch R. *Elektrotechnik und Elektronik für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker 5.Auflage, Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008*

[29] Grote K.-H. &Feldhusen.J *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer 2007.*

[30] Ščap.D *Optimiranje mehaničkih konstrukcija, udžbenik za studente, FSB Zagreb 2003.*

KRATKI ŽIVOTOPIS



Ime i adresa:	Roman Žičkar
	Traute-Richter Strasse 5
	01109 Dresden, Njemačka
Datum rođenja	4. srpnja 1968
Mjesto rođenja	Zagreb, Hrvatska
Državljanstvo	slovensko / hrvatsko
Bračno stanje	oženjen, 2 djece

OBRAZOVANJE

1988 - 1994	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska Smjer: Strojarske konstrukcije Usmjerenje: Motori i motorna vozila Diplomski rad: Klipni mehanizam Ottovog motora
2000 - 2010	Poslijediplomski znanstveni studij Smjer: Strojarske konstrukcije Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Ivana Lučića 5, Zagreb, Hrvatska

STRUČNO ŠKOLOVANJE

1995 - 1997	Školovanje za Konstruktora energetskih transformatora prema SIEMENS standardima (SIEMENS TWN, Nürnberg)

STRUČNO ISKUSTVO

1995 - 1997	KONSTRUKTOR energetskih transformatora. (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
1997 - 2002	VODEĆI KONSTRUKTOR energetskih i specijalnih transformatora (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
2002 - 2004	VODEĆI KONSTRUKTOR energetskih i idustrijskih transformatora (SGB-GmbH, Regensburg)
2004 - 2005	VODITELJ PROJEKTA i VODEĆI KONSTRUKTOR PROTOTIP putujući transformator 100MVA/245kV (SGB-GmbH, Regensburg)
2005 - 2010	VODITELJ GRUPE za konstrukciju industrijskih transformatora (SIEMENS TBD, Dresden)
2010 -	SENIOR KEY EXPERT IPT Mechanical Design i VODITELJ GRUPE za konstrukciju energetskih i industrijskih transformatora (SIEMENS TBD, Dresden)

SHORT BIOGRAPHY

Name and address:	Roman Žičkar
	Traute-Richter Strasse 5
	01109 Dresden, Germany
Date of birth	4 July 1968
Place of birth	Zagreb, Croatia
Citizenship	Slovenian / Croatian
Marital status	married, 2 children

EDUCATION

1988 - 1994	Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Ivana Lučića 5, Zagreb, Croatia Department: Machine design Section: Machine and motor vechicle design Degree essay: The Otto engine crank mechanism
2000 - 2010	Postgraduate Study Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Ivana Lučića 5, Zagreb, Croatia Department: Theory of design

BUSINESS EDUCATION

1995 - 1997	Training period four construction of power transformers According SIEMENS standards (SIEMENS TWN, Nuremberg)

BUSINESS EXPERIENCE

1995 - 1997	DESIGN ENGINEER of power transformers. (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
1997 - 2002	MAYOR DESIGNER of power and special transformers (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
2002 - 2004	MAYOR DESIGNER of power and special transformers (SGB-GmbH, Regensburg)
2004 - 2005	PROJEKT LEADER and MAYOR DESIGNER PROTOTYPE Gage tank transformer 100MVA/245kV (SGB-GmbH, Regensburg)
2005 - 2010	TEAM LEADER design engineering of industrialtransformers (SIEMENS TBD, Dresden)
2010 -	SENIOR KEY EXPERT IPT Mechanical Design and TEAM LEADER design engineering of industrialtransformers (SIEMENS TBD, Dresden)

LEBENSLAUF

Name und Adresse:	Roman Žičkar
	Traute-Richter Strasse 5
	01109 Dresden, Deutschland
Geburtsdatum	4. Juli 1968
Geburtsort	Zagreb, Kroatien
Staatsangehörigkeit	Slowenisch / Kroatisch
Zivilstand	verheiratet, 2 Kinder

AUSBILDUNG

1988 - 1994	Fakultät für Maschinen- und Schiffbau in Zagreb, Universität Zagreb, Ivana Lučića 5, Zagreb, Kroatien Abteilung: Konstruktion im Maschinenbau Richtung: Verbrennungsmotoren Diplomarbeit: Der Kurbeltrieb vom Ottomotor
2000 - 2010	Aufbaustudium Fakultät für Maschinen- und Schiffbau in Zagreb, Universität Zagreb, Ivana Lučića 5, Zagreb, Kroatien Abteilung: Konstruktionstheorie

BERUFSAUSBILDUNG

1995 - 1997	Konstruktion der Leistungstransformatoren (SIEMENS TWN, Nürnberg)

BERUFSERFAHRUNG

1995 - 1997	KONSTRUKTEUR der Leistungstransformatoren. (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
1997 - 2002	TEAMLEITER für Konstruktion der Leistungs.-, Spezial- Transformatoren. (KONČAR Power Transformers Ltd. Joint Venture of SIEMENS and Končar, Zagreb)
2002 - 2004	ENTWURFSKONSTRUKTEUR für Konstruktion der Leistungs.-, Industrie.- Transformatoren. (SGB-GmbH, Regensburg)
2004 - 2005	PROJEKTLEITER und TEAMLEITER f. PROTOTYP Brückenmittelstück 100MVA/245kV (SGB-GmbH, Regensburg)
2005 - 2010	TEAMLEITER für Konstruktion der Industrietransformatoren. (SIEMENS TBD, Dresden)
2010 -	SENIOR FACHEXPERTE IPT für mechanische Konstruktion und TEAMLEITER für Konstruktion der Industrietransformatoren. (SIEMENS TBD, Dresden)