



Univerzitet Crne Gore
Elektrotehnički fakultet Podgorica
Automatika

Estimacija parametara zamjenske šeme monofaznog transformatora primjenom teorije haosa

– Master rad –

Mentor:

Doc. dr Martin Čalasan

Kandidat:

Spec. Sci Danilo Mujičić

Podgorica, 2020. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Danilo Mujičić

Datum i mjesto rođenja: 22.06.1994. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2017.

Naziv završenog specijalističkog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika - Automatika, 2018.

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske magistarske akademske studije

Smjer: Automatika

Naslov rada: Estimacija parametara zamjenske šeme monofaznog transformatora primjenom teorije haosa

OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada:

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema:

Komisija za ocjenu teme:

Prof. dr Gojko Joksimović

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Mentor: Doc. dr Martin Čalasan,
Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Gojko Joksimović

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, predsjednik

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Gojko Joksimović

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, predsjednik

Prof. dr Vesna Rubežić

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, član

Doc. dr Martin Čalasan

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica, mentor

Datum odbrane:

Datum promocije:

Predgovor

Transformatori snage su značajan segment distributivnih i prenosnih mreža. Električna energija na svom “putu” od proizvođača do potrošača prolazi prosječno 5-6 transformacija, pa je samim tim jasno da je u tom iznosu veća i instalisana snaga svih transformatora u nekom elektroenergetskom sistemu, u odnosu na instalisanu snagu svih njegovih generatorskih jedinica.

Vrijednosti parametara zamjenske šeme transformatora određene su karakteristikama same mašine, njenih komponenti, jezgra, namotaja, izolacije. Samim tim, estimacija ovih parametara je način da se dobije uvid u stanje opreme. Parametri zamjenske šeme se mogu dobiti sprovođenjem standardnih eksperimentalnih procedura, baziranih na izvođenju oglada praznog hoda i kratkog spoja, ali se u skorije vrijeme ovoj problematici pristupa i na jedan drugi način koji ne zahtjeva prekid pogonskog stanja mašine. Naime, u velikom broju naučnih radova, opisana je primjena različitih optimizacionih algoritama u cilju procjene vrijednosti parametara transformatora, odnosno njegovog ekvivalentnog kola. Većina ovih metoda, razvijena je na takav način da se za procjenu parametara koriste izmjerene vrijednosti odgovarajućih električnih veličina, koje odgovaraju pogonskom stanju, tj. transformatoru koji napaja odgovarajući potrošač ili grupu potrošača.

U ovom radu, predložena je upotreba Haotičnog Optimizacionog Algoritma u svrhu određivanja parametara zamjenske šeme monofaznog dvonamotajnog transformatora. Rezultati estimacije su upoređeni sa rezultatima dobijenim primjenom drugih algoritama. Osim toga, na konkretnom transformatoru, sprovedene su klasične eksperimentalne procedure u cilju određivanja pomenutih parametara, ali je simulirano i pogonsko stanje transformatora i sprovedena su adekvatna mjerenja, radi testiranja primjene predloženog metoda.

Rezime

Predmet istraživanja predstavljenog u ovom radu je primjena Haotičnog Optimizacionog Algoritma u cilju određivanja parametara zamjenske šeme transformatora.

Razvijeni metod za estimaciju koristi vrijednosti odgovarajućih električnih veličina – struje, naponi i aktivne snage primarnog i sekundarnog strujnog kruga. Sve mjerene veličine odgovaraju pogonskom stanju transformatora – odnosno transformator u čijem se sekundarnom krugu nalazi odgovarajući električni potrošač.

Algoritam je, u matematičkom smislu, zasnovan na ideji minimizacije vrijednosti kriterijumske funkcije, koja u obzir uzima razlike između izmjerenih i estimiranih vrijednosti odgovarajućih struja, napona, odnosno snaga. U osnovi algoritma stoje jednačine logističkog preslikavanja, pomoću kojih se formiraju haotični nizovi na osnovu kojih se, i uz prethodno definisane granice vrijednosti parametara, formira tzv. prostor pretrage. Svaka tačka ovog prostora, potencijalno je rješenje našeg problema. Ona tačka kojoj odgovara minimalna vrijednost pomenute kriterijumske funkcije, predstavlja tačku globalnog optimuma, a koordinate te tačke, vrijednosti su estimiranih parametara. Preciznost predloženog metoda se analizira poređenjem odgovarajućih izlaznih karakteristika sa karakteristikama dobijenim drugim optimizacionim metodama, ali i rezultatima koji odgovaraju standardnim eksperimentalnim procedurama, kakve su ogledi praznog hoda i kratkog spoja.

Rezultati primjenjenog metoda pokazuju dobra poklapanja sa izmjerenim vrijednostima u slučaju svih veličina koje su uzete u obzir. Štaviše, poklapanja sa izmjerenim vrijednostima su bolja od onih koja se javljaju pri primjeni drugih optimizacionih algoritama sa kojima su poređenja izvršena. Time je pokazana mogućnost upotrebe predloženog metoda na problem estimacije parametara zamjenske šeme, kao i njegova efikasnost i jednostavnost primjene.

Ključne riječi: transformator, zamjenska šema, parametri, haotični optimizacioni algoritam.

Abstract

The subject of the research presented in this paper is the application of the Chaotic Optimization Algorithm to the problem of determining the parameters of the transformer equivalent circuit.

The proposed estimation method uses values of certain electrical quantities - currents, voltages and active power values in the primary and secondary circuit. All measured values correspond to the operating state of the transformer - ie the transformer which powers an electrical consumer, connected in the secondary circuit.

The algorithm is, in a mathematical sense, based on the idea of minimizing the values of the criterion function, which takes into account the differences between the measured and estimated values of the corresponding currents, voltages, or powers. The algorithm is based on the equations of logistic mapping, which are used to form chaotic sequences on the basis of which, and with previously defined limits of parameter values, the so-called search space is formed. Each point of this space is a potential solution to our problem. The point to which the minimum value of the mentioned criterion function corresponds, represents the point of the global optimum, and the coordinates of that point are the values of the estimated parameters. The accuracy of the proposed method is analyzed by comparing the corresponding output characteristics with the characteristics obtained by other optimization methods, as well as with the results that correspond to standard experimental procedures, such as no-load and short-circuit experiments.

The results of the applied method show good matching with the measured values in the case of all quantities taken into account. Moreover, the matching with the measured values are better than those that occur with the application of other optimization algorithms with which the comparisons are being made. This shows the possibility of using the proposed method in the parameters of the transformer equivalent circuit, as well as its efficiency and ease of application.

Key words: transformer, equivalent circuit, parameters, chaotic optimization algorithm.

Sadržaj

1. Uvod.....	9
2. Transformatori	14
2.1. Uvodna razmatranja	14
2.1. Konstrukcija transformatora.....	15
2.1.1. Magnetsko jezgro.....	15
2.1.2. Namotaji.....	16
2.1.3. Izolacija.....	17
2.1.4. Oklop.....	17
2.1.5. Dodatna oprema	18
2.2. Opšti principi.....	19
2.2.1. Princip prenosa energije	21
2.2.2. Idealni transformator.....	22
2.2.3. Transformator sa linearnim jezgrom.....	23
2.2.4. Realni transformator sa gubicima u gvožđu	26
2.2.4.1. Gubici usljed vrtložnih struja	27
2.2.4.2. Gubici usljed histerezisa	28
2.2.4.3. Aktivna i reaktivna komponenta struje praznog hoda	29
2.4. Zamjenska šema TR	30
2.5. Klasični metod određivanja parametara TR.....	32
2.5.1. Ogled Praznog Hoda	32
2.5.2. Ogled Kratkog Spoja.....	34
3. Haotični Optimizacioni Algoritam	37
3.1. Teorija haosa i jednačina logističkog preslikavanja.....	37
3.2. Predlog algoritma	39
3.2.1. Ulazni podaci	42
3.2.2. Globalna Pretraga.....	42
3.2.3. Kriterijumska funkcija	45
3.2.4. Lokalna Pretraga	47
4. Određivanje parametara TR.....	48

4.1.	Primjena COA u estimaciji parametara TR bazirana na upotrebi podataka sa natpisne pločice	48
4.2.	Primjena COA u estimaciji parametara TR bazirana na upotrebi izmjerenih podataka	49
5.	Eksperimentalni rezultati	52
5.1.	Opis eksperimentalne postavke	52
5.2.	Određivanje parametara TR primjenom klasične metode	54
5.3.	Određivanje parametara TR primjenom COA, uz upotrebu podataka koji odgovaraju punom opterećenju	55
5.4.	Određivanje parametara TR primjenom COA, uz upotrebu podataka koji odgovaraju različitim opterećenjima	56
6.	Određivanje parametara TR, uz ograničenja u pogledu raspodjele gubitaka aktivne snage	61
6.1.	Raspodjela gubitaka aktivne snage u transformatoru	61
6.2.	Primjena CMRFO algoritma u estimaciji parametara TR, uz uvažavanje gubitaka u gvožđu	63
6.2.1.	MRFO Algoritam	64
6.2.2.	CMRFO Algoritam	65
6.3.	Poređenje rezultata	66
7.	Zaključak	76
	Literatura	77

1. Uvod

Energetski transformatori, neizostavni su dijelovi prenosnih i distributivnih sistema, i sveprisutni su uređaji u kolima energetske elektronike [1]. Stoga je, za analizu elektroenergetskih sistema i uopšte bilo kojeg električnog kola koje sadrži transformatore, potreban precizan model transformatora [2,3].

Modelovanje transformatora, tj. određivanje parametara ekvivalentnog strujnog kola, važan je predmet studija mnogih oblasti elektrotehnike (elektroenergetski sistemi, stabilnost, modelovanje pretvarača snage itd.). Model je neophodan i pri projektovanju transformatora; služi i diagnostičkoj svrsi i pruža odgovarajuće servisne informacije [4,5]. Naime, parametri zamjenske šeme nam nude uvid u ponašanje same mašine i njene performanse. Dakle, procjena parametara ekvivalentnog kola transformatora može pružiti značajne informacije o stanju, karakteristikama i ponašanju transformatora, sa jedne strane, i njegovom radu na mreži, sa druge strane.

U dostupnoj literaturi se može naći nekoliko različitih pristupa procjeni parametara transformatora [6–14]. Neki od njih u obzir uzimaju i nelinearno ponašanje transformatora [6–8], dok se drugi bave tradicionalnim (*Steinmetz*) ekvivalentnim kolom [9–14]. Budući da transformatori i asinhronne mašine imaju sličnu zamjensku šemu, u nekim istraživanjima, vršena je procjena parametara i jedne i druge mašine [15,16]. Ovaj magistarski rad se bavi problemom estimacije parametara klasične zamjenske šeme monofaznog dvonamotajnog transformatora.

Procjena parametri transformatora može se izvršiti i na osnovu njegovih geometrijskih dimenzija [17,18]. Međutim, ovaj pristup nije naročito zastupljen niti opšteprihvatljiv, pogotovo zbog nedostupnosti podataka o dimenzijama, što se čest slučaj kod starijih mašina. Sa druge strane, ovi parametri se mogu odrediti iz standardnih eksperimentalnih postupaka, koji se temelje na ogledima praznog hoda i kratkog spoja transformatora. Zbog toga, ovi postupci se ne mogu primijeniti na transformatore koji se nalaze u pogonskom stanju [1]. Osim toga, varijacije ambijentalnih uslova i pogonskih stanja (poput promjene temperature ili vlažnosti vazduha, zatim pojave kratkih spojeva i preopterećenja itd.) mogu uzrokovati promjene u vrijednosti parametara mašine [16]. Monofazni transformator, razmatran u ovom radu, obično je dio ili upravljačkog ili mjernog kruga.

Stoga je, za izvođenje oglada kratkog spoja i praznog hoda potrebno dodatno vrijeme za realizaciju ovih oglada, a samim tim se zahtjeva i isključenje transformatora sa mreže, što u nekim situacijama nije povoljno rješenje. Tehnike, fokusirane na primjeni optimizacionih algoritmima postale su najčešće korištene metode u velikom broju problema koji se mogu svesti na problem optimizacije. Glavna prednost optimizacionih metoda je to što se oblik kriterijumske funkcije može proizvoljno definisati. To je i razlog zašto su ove pristupi estimaciji veoma zastupljeni u problemima procjene parametara transformatora [9–16]. Među brojim algoritmima, koji se koriste u ovu svrhu, izdvajaju se: PSO (*Particle Swarm Optimization*) [9,15,16], GA (*Genetic Algorithm*) [9,13], ICA (*Imperialist Competitive Algorithm*) [10], GSA (*Gravitational Search Algorithm*) [10], BFA (*Bacterial Foraging Algorithm*) [11,12] i ABCA (*Artificial Bee Colony Algorithm*) [14] i mogu se primijeniti u metodima baziranim na upotrebi podataka sa natpisne pločice transformatora ili u metodima koji koriste mjerene vrijednosti odgovarajućih električnih veličina, bez izlaska transformatora iz pogonskog stanja.

U [9], PSO i GA koriste se za potrebe estimacije parametara transformatora upotrebom podataka sa natpisne pločice, a procijenjeni parametri se upoređuju sa odgovarajućim vrijednostima, dobijenim sprovođenjem oglada praznog hoda i kratkog spoja. Zatim su, procijenjene vrijednosti primarne struje, sekundarne struje i napona sekundara, upoređene sa odgovarajućim vrijednostima dobijenim mjerenjem ovih veličina, pri radu transformatora na čiji je sekundar, priključen potrošač. Upotreba ICA i GSA u ovu svrhu, predložena je u [10] i upoređena sa rezultatima koje daju PSO i GA metode. U postupku optimizacije u [10], do nepoznatih parametara se dolazi upotrebom kriterijumske funkcije koja u obzir uzima vrijednosti struje primara i napona i struje sekundara, pri punom opterećenju. Međutim, razlike između estimirane i izmjerene vrijednosti vrijednosti ovih veličina, pri punom opterećenju, u prethodnim istraživanjima (posebno u [9]) su značajne.

U [27], istaknute su neregularnosti i razlike u stvarnim vrijednostima estimiranih veličina (koje odgovaraju estimiranim parametrima zamjenske šeme) i onim vrijednostima prezentovanim u radu. Osim toga, istaknuta su neslaganja u pogledu vrijednosti impedanse priključene na sekundaru transformatora koji je predmet ispitivanja u [10], i vrijednosti koja odgovara naponu i struji sekundara, koji odgovaraju čisto aktivnom opterećenju, kako je u [10] navedeno. Osim toga, u [27] se navode i nedostaci prisutni u [16]. Naime, u [16] u jednoj od kriterijumskih funkcija korišćenih

u estimaciji parametara transformatora, figuriše i struja praznog hoda. Autori rada [16] smatraju da razlika između efektivnih vrijednosti primarne i sekundarne struje, svedene na primar predstavlja mjerenu vrijednost struje praznog hoda. Obzirom da fazori koji odgovaraju ovim veličinama nijesu kolinearni vektori, jasno je da je ovakav pristup netačan, odnosno da razlika u navedenim efektivnim vrijednostima struja nije jednaka struji otočne grane.

Upotreba BFA u cilju određivanja parametara monofaznih transformatora na osnovu podataka koji odgovaraju pogonskom stanju, prikazana je u [11]. Estimirane vrijednosti parametara i vrijednosti odgovarajućih napona i struja, upoređene su sa rezultatima dobijenim izvođenjem oglada kratkog spoja i praznog hoda [11]. Međutim, u [11] postoje značajne razlike između estimiranih i izmjerenih izlaznih karakteristika (struja primara – impedansa potrošača, struja sekundara – impedansa potrošača, napon sekundara – impedansa potrošača). Postupak nalaženja parametara transformatora primijenom ABCA, koji podrazumijeva korišćenje vrijednosti struje i napona pri bilo kojem poznatom opterećenju (tj. za jednu vrijednost opterećenja), prikazan je u [14]. Ovaj pristup takođe karakteriše očigledna razlika između estimiranih i izmjerenih vrijednosti posmatranih varijabli i parametara. Stoga se, na bazi svih rezultata prikazanih u [9–11,14] može zaključiti da postoji prostor za poboljšanje, upotrebom drugih optimizacionih tehnika. To takođe ukazuje da se za preciznu procjenu parametara transformatora mogu koristiti različite kriterijumske funkcije. Konačno, u istraživanjima [9–11,14] nedostaje bilo kakva diskusija o uticaju kriterijumske funkcije na vrijednosti procijenjenih parametara, a uz to estimacija parametara korišćenjem sva tri moguća postupka (klasični pristup, podaci sa natpisne pločice i podaci o opterećenju dobijeni eksperimentima) nije izvedena na istom transformatoru. U [9,10] autori obraćaju pažnju na razliku između estimiranih parametara transformatora i parametara dobijenih klasičnim putem, tj. izvođenjem oglada praznog hoda i kratkog spoja. Parametri dobijeni pomenutim ogledima, ne garantuju idealno podudaranje između izmjerene i estimirane izlazne karakteristike (na primjer: karakteristika sekundarna struja – otpor potrošača) ili idealno podudaranje između izmjerenih i estimiranih vrijednosti primarne i sekundarne struje, kao i sekundarnog napona, pri punom opterećenju. Nepoznate parametre zamjenske šeme transformatora potrebno je precizno odrediti, kako bi se ostvarila što veća podudaranost između izmjerenih i estimiranih izlaznih karakteristika transformatora za sve moguće vrijednosti opterećenja. Iz tog razloga, kriterijumska funkcija za estimaciju parametara, predstavljena u [9,10],

sadrži primarnu struju, sekundarnu struju i sekundarni napon. U ostalim se radovima može naći drugačiji oblik ove funkcije (vidi, na primjer, [16]).

U ovom radu će se prikazati upotreba Haotičnog Optimizacionog Algoritma (COA – *Chaotic Optimization Algorithm*) u određivanju parametara ekvivalentnog kola monofaznog dvonamotajnog transformatora pomoću podataka sa natpisne pločice mašine i podataka o opterećenju dobijenim izvođenjem odgovarajućih eksperimenata. Učinkovitost predloženog metoda, procjenjivaće se kroz njegovu primjenu na različitim transformatorima (različitim u pogledu snage i nazivnog napona) nađenim u literaturi, ali i laboratorijskom okruženju. Važno je naglasiti da je COA pronašao primjenu u raznim tehnikama optimizacije [19–21]. U [19], COA se uspješno primjenjuje za identifikaciju parametara Jiles-Athertonovog histereznog modela. Optimalan izbor parametara PID - a za automatsku regulaciju napona sinhrona mašine pomoću COA, prikazan je u [20]. U [21] prikazana je upotreba CBAA (*Chaotic Beamforming Adaptive Algorithm*) optimizacije zračenja antenskih nizova. Pored toga, kaos se koristi za poboljšanje postojećih heurističkih tehnika optimizacije [22,23]. Prednosti primijene COA ogledaju se u lakoj implementaciji, kratkom vremenu izvršenja i visokoj preciznosti, kao i eliminaciji problema retencije lokalnih minimuma [24]. Potrebno je istaći da je u [25,26], koji predstavljaju uvod u ovo istraživanje, COA uspješno primijenjen upravo u svrhu estimacije parametara zamjenske šeme monofaznog dvonamotajnog transformatora. Osim prethodno navedenog algoritma, u radu će biti predstavljena i primjena poboljšanja jednog od standardnih algoritama MRFO (*Manta Rei Foraging Optimization*) [30], upotrebom haotičnih sekvenci [29]. Predloženi CMRFO (*Chaotic MRFO*) metod, kroz kriterijumsku funkciju uvodi i gubitke u gvožđu, kao dodatnu restrikciju pri estimaciji parametara transformatora, što nije slučaj u ostalim radovima, posvećenim ovoj tematici. Pomenuti metod, takođe će biti testiran na konkretnom transformatoru, sprovođenjem odgovarajućih električnih mjerenja, neophodnih za njegovu primjenu, kao i potvrdu tačnosti dobijenih rezultata.

Rad je organiziran na sljedeći način.

U **drugom poglavlju** iznijeta su uvodna razmatranja o transformatorima i njihovoj primjeni u elektrotehnici, zatim tipovima ovih mašina, konstrukciji i konstruktivnim karakteristikama. Osim toga, u ovom poglavlju je opisana i zamjenska šema monofaznog dvonamotajnog transformatora, zajedno sa matematičkim modelom koji odgovara ekvivalentnom kolu. Uz zamjensku šemu,

opisan je i klasičan pristup određivanju njenih parametara, utemeljen na upotrebi rezultata dobijenih izvođenjem oglada praznog hoda i kratkog spoja.

Teorijska osnova i porijeklo samog algoritma, iznijeti su u **trećem poglavlju**, zajedno sa opisom samog algoritma i komentare priložene uz djelove programskog koda pomoću kojeg je predloženi metod implementiran.

Četvrto poglavlje se bavi primjenom COA u estimaciji parametara ekvivalentne šeme, uz upotrebu podataka koji odgovaraju punom opterećenju, ali i uz upotrebu podataka koji odgovaraju širem dijapazonu opterećenja.

U **petom poglavlju**, izloženi su eksperimentalni rezultati i rezultati estimacije koji odgovaraju konkretnom monofaznom dvonamotajnom transformatoru. Eksperimenti i odgovarajuća mjerenja u sprovedena u Laboratoriji za električne mašine i transformatore, Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici.

Šesto poglavlje je posvećeno analizi rezultata estimacije sa dodatnom analizom raspodjele gubitaka snage u transformatoru i uz upotrebu različitih kriterijumskih funkcija.

U poslednjem poglavlju je dat osvrt na cjelokupan rad i izneseni su zaključci o sprovedenom istraživanju.

2. Transformatori

2.1. Uvodna razmatranja

Transformator je statički uređaj koji po principu elektromagnetne indukcije transformiše jedan sistem naizmjeničnih napona i struja, u drugi sistem, mijenjajući pri tome amplitudu ovih veličina, ali ne i učestanost. Primjenom transformatora, omogućeno je da se energija proizvodi i prenosi na naponskim nivoima koji se smatraju najpogodnijim i najekonomičnijim.

Osnovna oblast primjene ovih mašina je elektroenergetski sektor, iako su našli primjenu i u brojnim ostalim oblastima elektrotehnike. U okviru elektroenergetskih sistema (EES), prisutni su u svim segmentima – počevši od proizvodnje, zatim prenosnog i konačno distributivnog nivoa. Tako se, u sklopu elektrana nalaze blok transformatori, koji podižu napon generatorskih jedinica na napon prenosnog nivoa ($110kV$, $220kV$, $400kV$ – naponi prenosnog nivoa u Crnogorskom EES-u). Nominalni napon generatora obično je veći od $10kV$, a manji od $25kV$ (Nominalni linijski naponi generatora elektrana HE Perućica, HE Piva i TE Pljevlja su $10,5kV$, $15,75kV$ i $15,75kV$ respektivno). U okviru prenosne mreže, prisutni su tzv. mrežni transformatori sa visokonaponskom i niskonaponskom stranom koje odgovaraju naponima prenosnog nivoa. Na kraju, na distributivnom nivou se susreću prenosni odnosi $35/10\text{ kV/kV}$, $35/0,4\text{ kV/kV}$ i $10/0,4\text{ kV/kV}$ i u pitanju su jedinice manjih snaga (u odnosu na prethodno pomenute mrežne i blok transformatore).

U osnovnom obliku, pod transformatorom se podrazumjeva sklop sačinjen od magnetskog jezgra i primarnog i sekundarnog namotaja, koji su na tom jezgru postavljeni. Ovaj opis odgovara monofaznom dvonamotajnom transformatoru. Međutim, transformatori su, osim kao monofazne, prisutni i kao višefazne jedinice. Štaviše, u okviru elektroenergetskih sistema u razmatranje se gotovo isključivo uzimaju trofazni transformatori. Isto tako, osim dvonamotajnih, postoje i tronamotajni transformatori, koji pored primarnog i sekundarnog namotaja imaju i treći namotaj – tercijar. Osim toga, u okviru elektroenergetskog sistema prisutni su i autotransformatori – kod kojih namotaji nijesu galvanski izolovani, za razliku od prije pomenutih vrsta transformatora, kod kojih je veza između primarnog i sekundarnog namotaja ostvarena isključivo magnetskim sprežanjem. Pored transformatora snage, u okviru EES – a, neizostavni su i mjerni transformatori – strujni i naponski, koji su po svojoj konstrukciji izvedeni kao monofazne jedinice, a implementirani su u okviru sistema upravljanja i mjerenja ili u okviru sistema električnih zaštita.

2.1. Konstrukcija transformatora

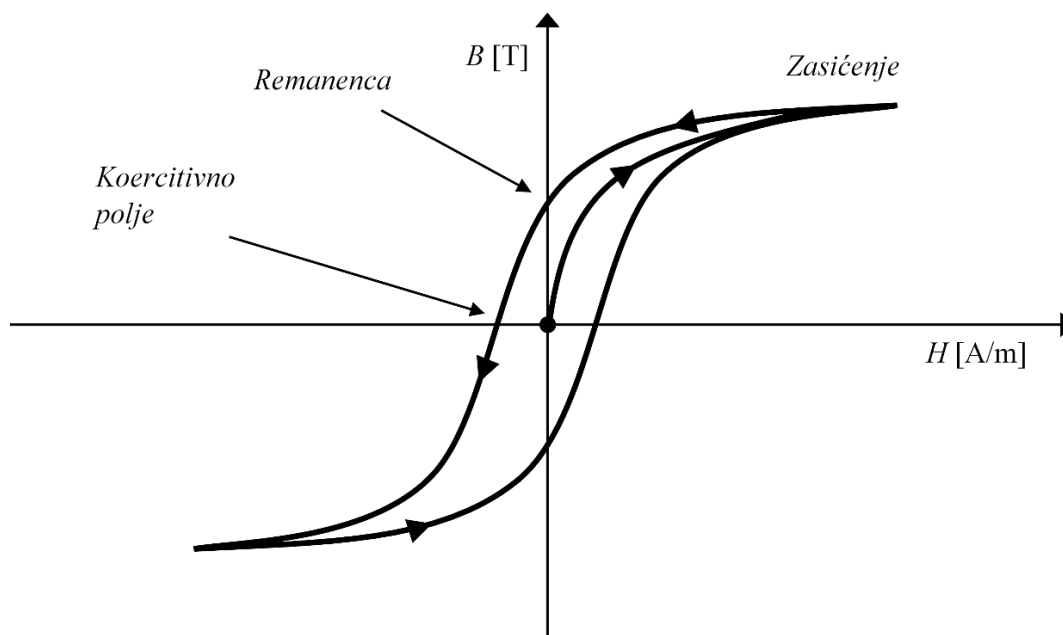
U pogledu konstrukcije, transformator se sa sastoji iz:

- magnetskog jezgra,
- namotaja,
- izolacije,
- oklopa,
- dodatne opreme.

Konfiguracija zavisi od same mašine, tako da će biti različita u zavisnosti od tipa transformatora. Npr. naponski nivo će uticati na izbor izolacije, nominalna struja će uticati na dimenzionisanje namotaja itd.

2.1.1. Magnetsko jezgro

Jezgro transformatora, formira se od feromagnetskog materijala – gvožđa, kako bi se smanjila reluktansa magnetskog kola. Naime, visoka vrijednost relativne magnetske permeabilnosti, odlika je feromagnetika, koja im daje mogućnost uspješnog kanalisanja fluksa.



Slika 2.1 – Histerezisna petlja

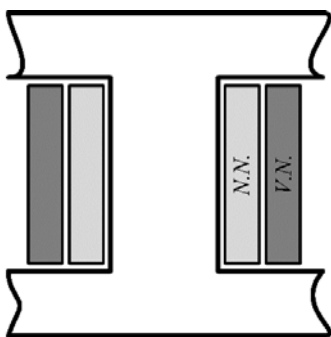
Imajući u vidu da transformator pripada grupi mašina naizmjenične struje, jasno je da je i magnećenje njegovog jezgra naizmjenično (Slika 2.1). U procesu magnećenja, dio energije dovedene preko primarnog strujnog kruga će se akumulirati u magnetnom polju. Pošto feromagnetik nije idealan, dio dovedene energije mora pokriti gubitke. Gubici energije u jezgru transformatora, posljedica su pojave vrtložnih struja u jezgru, kao i histerezisnih karakteristika feromagnetskog materijala. Više o ovim vrstama gubitaka aktivne snage, biće iznijeto u Poglavlju 2.2.4. u kojem je izložena detaljnija analiza realnog transformatora sa gubicima u gvožđu.

2.1.2. Namotaji

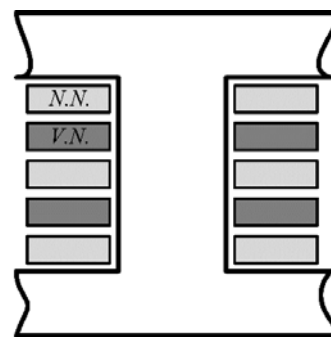
Namotaji se proizvode od bakarnih ili aluminijskih provodnika koji su izolovani. Treba da budu ekonomično proizvedeni – ušteda na materijalu i treba da budu ekonomični u eksploataciji – niska vrijednost gubitaka snage. Osim toga, trebaju zadovoljiti određene mehaničke karakteristike i moraju posjedovati odgovarajuće dielektrične karakteristike, kako bi izdržali sile koje trpe prilikom kratkih spojeva, odnosno kako bi mogli izdržati odgovarajuće vrijednosti prenapona [32].

Kod transformatora se razlikuju namotaji visokonaponske (VN) i niskonaponske (NN) strane. Ukoliko je tok snage definisan, onda se pojmovi primara i sekundara mogu jasno vezati za VN i NN namotaje.

Tipičan raspored namotaja kod izvedbi transformara snage, prikazan je na Slikama 2.2 i 2.3.



Slika 2.2 – Cilindrični namotaj



Slika 2.3 – Miješani namotaj

Kao što je Slikom 2.2 ilustrovano, pri konstrukcijama transformatora sa cilindričnim namotajima, pribjegava se redosledu jezgro – niskonaponski namotaj – visokonaponski namotaj [31,32]. Na ovaj način se smanjuje mogućnost električnog proboja prema jezgri. Osim izolacionih prednosti,

u određenim granicama se, ovakvom konstrukcijom, postiže i niža vrijednost rasipnih reaktansi [32]. Rasporedom koji odgovara miješanim namotajima (Slika 2.3) se postiže manja vrijednost rasipnih reaktansi, ali izolacione prednosti nijesu izražene kao kod cilindričnih namotaja [32].

2.1.3. Izolacija

U skladu sa namjenom, razlikujemo glavnu izolaciju i izolaciju unutar namotaja.

Glavna izolacija je izolacija između namotaja visokonaponske i niskonaponske strane, kao i izolacija između namotaja i magnetskog jezgra. U ovu svrhu, koriste se izolacioni cilindri koji se postavljaju između visokonaponskog i niskonaponskog namotaja, kao i između namotaja i magnetskog jezgra [32]. Osim izolacione uloge, ovi cilindri istovremeno služe i kao mehanička potpora namotajima.

Unutrašnja izolacija se odnosi na izolaciju između pojedinačnih navojaka i ostalih dijelova koji pripadaju jednom namotaju.

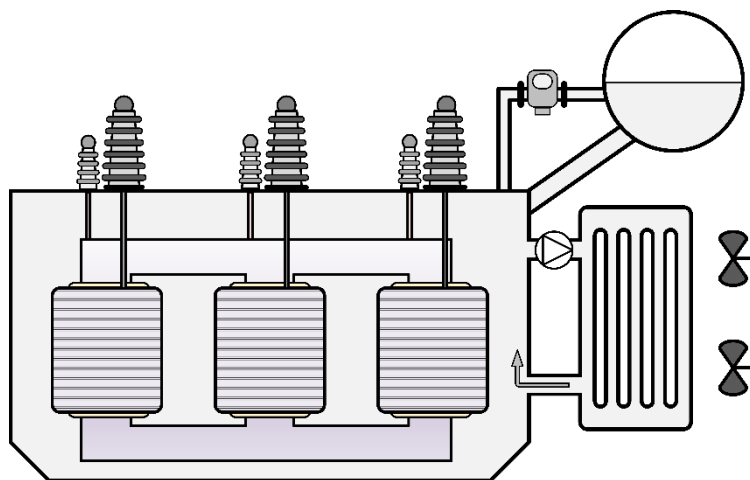
2.1.4. Oklop

Pod oklopom se podrazumijeva gvozdeni ili aluminijski sud kojim su oklopljeni jezgro i namotaji i koji je ispunjen transformatorskim uljem, pa samim tim mora biti i hermetički zatvoren. Oblik oklopa zavisi od vrste hlađenja. Ukoliko su u pitanju uljni transformatori manjih snaga, koriste se oklopi sa ravnim površinama. Kod transformatora većih snaga, ovaj oblik oklopa nije prihvatljiv jer se u pogledu hlađenja ne može postići zadovoljavajuće rješenje. U tom slučaju oklop se pravi sa izbočinama ili rebrima, kako bi se omogućila bolja razmjena toplote sa okolnim vazduhom. Cirkulacija ulja kroz sistem cijevi koji se proteže kroz hladnjake, može biti prirodna ili forsirana – upotrebom uljnih pumpi. Sa druge strane, cirkulacija vazduha koji je u kontaktu sa kotlom, može se forsirati radom ventilatora. Osim toga, kao rashladno sredstvo se može koristiti i voda. U sklopu hladnjaka može biti realizovan izmjenjivač toplote. Na taj način se, toplota sa cjevovoda kojim cirkuliše transformatorsko ulje, posredstvom izmjenjivača, prenosi na rashladnu vodu, koja se dalje odvodi svojim cjevovodom.

2.1.5. Dodatna oprema

Transformatori imaju i brojnu dodatnu opremu – provodne izolatore, konzervator, brojne cjevovode, releje, termometri i slično. Provodni izolatori koji služe za uvod kablova ili sabirnica u oklop, unutar kojeg se ostvaruje veza sa namotajima, montirani su iznad kotla. Isti se dimenzionišu u zavisnosti od naznačenog napona visokonaponskog, odnosno niskonaponskog namotaja. Hermetički zatvoreni oklop, povezan je sa konzervatorom ulja, koji se takođe montira iznad kotla. Pri radu transformatoru, temperatura ulja varira i u skladu sa tim, zapremina transformatorskog ulja u kotlu se mijenja. Kako je ostvarena veza između kotla i konzervatora, nivo ulja u konzervatoru varira tokom rada transformatora, preuzimajući na taj način dodatnu zapreminu. Na cjevovodu kojim je ostvarena pomenuta veza, montira se tzv. *Buchholz* – ov relej, koji ustvari ima zaštitnu ulogu. Naime, određeni kvarovi transformatora se manifestuju tako što u slučaju kvara, dolazi do podizanja gasova od kotla prema konzervatoru. Konstrukcija pomenutog releja je takva da se u zavisnosti od ozbiljnosti kvara, u komori releja akumulira manja ili veća količina gasa i time pomjeraju plovci potopljene u ulju. Pomjeranjem plovaka, preklapaju se odgovarajući kontakti i generiše ili signal opomene ili signal za isključenje, kako bi se transformator rasteretio. Osim *Buchholz* – a, od zaštitnih uređaja prisutni su i otporni i kontaktni termometri, kao i kontaktni mjerači nivoa ulja, montirani na konzervatoru.

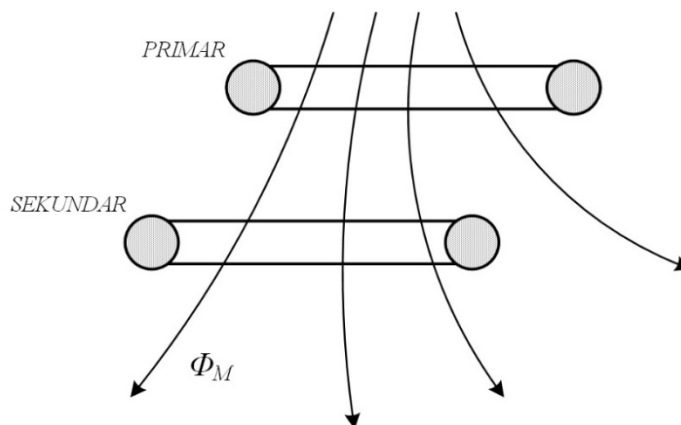
Na Slici 2.4, prikazana je ilustracija uljnog transformatora sa forsiranom cirkulacijom ulja i prirodnim hlađenjem vazduhom. Osim glavnih dijelova koji uključuju jezgro, namotaje, oklop i provodne izolatore, na slici je prikazan i prethodno pomenuti *Buchholz* relej na cjevovodu koji povezuje kotao sa konzervatorom ulja.



Slika 2.4 – Uljni transformator sa pratećom opremom

2.2. Opšti principi

Uzajamna indukcija između dva električna kola koja su povezana zajedničkim magnetskim fluksom, fizička je osnova transformatora, koji je, u svojoj najprostijoj formi, prikazan na Sl. 2.5.



Slika 2.5 – Uzajamna indukcija između dva električna kola

Vezu između primarnog i sekundarnog namotaja predstavlja zajednički magnetski fluks Φ koji je uspostavljen u vazdušnom prostoru. Promjenom vrijednosti struje koja teče kroz primarni namotaj, dolazi do promjene vrijednosti fluksa Φ . Kao posljedica te promjene, na sekundaru će se indukovati elektromotorna sila:

$$e = \frac{d\phi}{dt} . \quad (2.1)$$

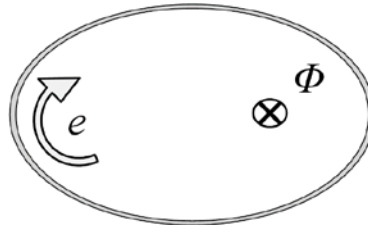
Ovaj izraz, ustvari je matematički zapis Faradejevog zakona elektromagnetske indukcije –

Vrijednost elektromotorne sile koja se indukuje u konturi kojom se fluks obuhvata, proporcionalna je brzini promjene magnetskog fluksa u vremenu.

Izrazom (2.1) kvantitativno je data vrijednost indukovane elektromotorne sile, ali ne i njen smjer. Odgovor na pitanje smjera indukovane elektromotorne sile dobija se primjenom tzv. Lenz-ovog pravila, koje kaže da je indukovana elektromotorna sila u provodnoj konturi, takvog smjera, da se magnetno polje struje koja protekne kroz konturu, suprotstavlja polju koje je izazvalo njen protok [31]. Imajući u vidu prethodno rečeno, Faradejev zakon se obično piše u obliku:

$$e = - \frac{d\phi}{dt} . \quad (2.2)$$

Na ovaj način je indukovana ems određena i kvantitativno i po smjeru. Naime, smjer elektromotorne sile je potrebno usvojiti u skladu sa usvojenim referentnim smjerom fluksa (Slika 2.6).



Slika 2.6 – Izbor referentnog smjera elektromotorne sile u skladu sa Lenz-ovim pravilom

Kada fluks raste u vremenu, tj. kad je izvod $d\Phi/dt$ veći od nule, elektomotorna sila će biti negativna, odnosno, biće suprotnog smjera u odnosu na referentni smjer. Isto tako, u slučaju smanjenja fluksa, izvod $d\Phi/dt$ će biti negativan, a elektromotorna sila pozitivna, što znači da je njen smjer u skladu sa referentnim smjerom.

Ukoliko je namotaj sačinjen od N navojaka, magnetsko obuhvatanje je N puta veće, a utoliko je veća i vrijednost indukovane elektromotorne sile. Tada je sopstvena induktivnost namotaja jednaka odnosu magnetskog obuhvatanja namotaja, fluksem koji je uzrokovan protokom električne struje kroz njegove navojke:

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{N\phi}{i} . \quad (2.3)$$

Kako u slučaju transformatora (Slika 2.5) imamo primarni i sekundarni namotaj, potrebno je uvesti pojam njihove međusobne induktivnosti. Naime, pod međusobnom induktivnošću primarnog i sekundarnog namotaja, podrazumjeva se odnos magnetskog obuhvatanja primarnog namotaja, fluksem koji je posledica protoka struje kroz navojke sekundara, i obrnuto [31]. U linearnoj sredini, ovi koeficijenti su jednaki, dok su u slučaju prisustva feromagnetskog jezgra, zavisni od stepena zasićenja materijala. Međutim, za transformatore snage, aproksimativno, ovi koeficijenti se mogu izjednačiti [31], tj. može se pisati:

$$M_{12} = M_{21} = M = k\sqrt{L_1 L_2} , \quad (2.4)$$

gdje je k – faktor sprege i može uzeti vrijednost u intervalu od 0 do 1, što odgovara situacijama kada je magnetska sprega između namotaja nepostojeće, odnosno, kada je sprega idealna, respektivno. U realnom slučaju, vrijednost ovog koeficijenta je uvijek manja od 1, naročito u odsustvu feromagnetske sredine.

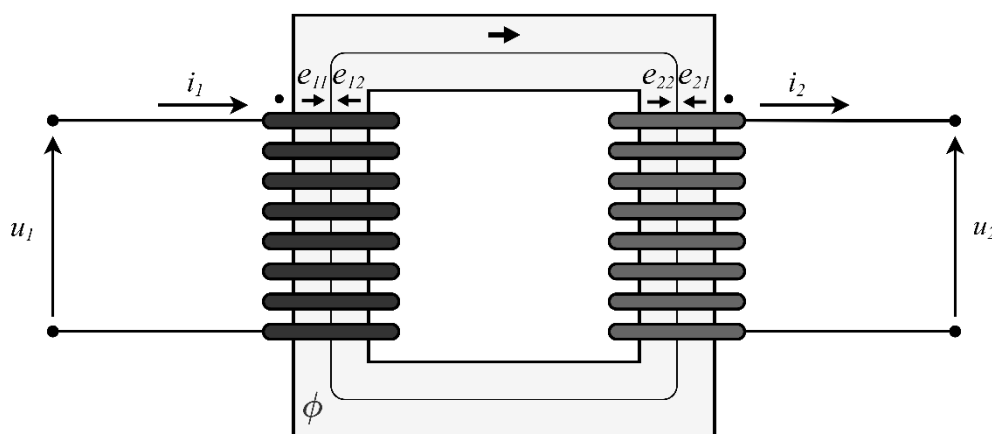
2.2.1. Princip prenosa energije

U ovom poglavlju, ukratko je opisan princip prenosa energije sa primarnog na sekundarni strujni krug, podsredstvom magnetske sprege između namotaja, dok će u sljedećim poglavljima ova problematika biti detaljnije analizirana kroz odgovarajuće matematičke modele, počevši od idealnog pa do realnog transformatora.

Ukoliko se na izvode primarnog namotaja priključi izvor naizmjeničnog napona u_1 , kroz namotaj primara će proteći struja magnetizacije I_μ . Protok ove struje kroz primarni namotaj uspostavlja magnetski tok Φ u jezgru. U primarnom namotaju se tada indukuje elektromotorna sila E_1 koja će držati balans primjenjenom naponu. Isto tako, uspostavljeni magnetski tok u jezgru, za posljedicu ima indukovanje elektromotorne sile E_2 . Ukoliko je zatvoren strujni krug sekundara, onda će prisustvo ove elektromotorne sile izazvati protok struje I_2 kroz sekundarni namotaj. Imajući u vidu Lenz-ovo pravilo, ova struja je takvog smjera da se suprotstavlja fluksu koji prouzrokovao njenu pojavu. Međutim, smanjenje fluksa u jezgru će biti spriječeno uvećanjem struje primarnog namotaja. Ovo uvećanje se javlja na račun uvećanja razlike primjenjenog napona i elektromotorne sile, indukovane u primarnom namotaju. Naime, smanjenje vrijednosti fluksa Φ dovodi do smanjenja vrijednosti indukovane elektromotorne sile, što dalje dovodi do povećanja naponske razlike U_1 i E_1 . Time je izazvano uvećanje struje I_1 i omogućeno ponovno uspostavljanje prvobitne vrijednosti magnetskog fluksa. Dakle, primar akumulira energiju u magnetnom polju, a jedan dio te energije se prenosi na opterećenje, na račun povećanja struje primara. Kako su fluksevi rasipanja prisutni, preostali dio akumulisane energije se gubi.

2.2.2. Idealni transformator

Pojam idealnog transformatora (Sl. 2.7) vezuje se za transformator koji se karakteriše odsustvom gubitaka snage pri prenosu električne energije [31,32]. Naime, električna otpornost njegovih namotaja, jednaka je nuli. Isto tako, magnetska karakteristika jezgra nema histerezisnu petlju, pa je samim tim $B-H$ karakteristika jednoznačna funkcija. Feromagnetski materijal jezgra ne može doći u zasićenje, a magnetska permeabilnost materijala teži beskonačnosti. Samim tim, gubici snage u magnetskom kolu su jednaki nuli i nema rasipanja fluksa, tj. fluks je idealno kanalisano kroz jezgro transformatora.



Slika 2.7 – Idealni transformator

Ukoliko se na primar transformatora dovede naizmjenični napon, kroz ovaj namotaj će proteći naizmjenična struja oblika:

$$i = I_m \cos \omega t . \quad (2.5)$$

Proticanje ove struje kroz namotaj, za posljedicu ima uspostavljanje magnetskog toka Φ koji je takođe prostoperiodične prirode i oblika je:

$$\phi = \phi_m \cos \omega t , \quad (2.6)$$

tj. u fazi je sa strujom koja ga stvara. Usljed promjene fluksa u jezgru, dolazi do indukovanja elektromotorne sile u primarnom, odnosno sekundarnom namotaju. Elektromotorna sila koja se indukuje u jednom navojku ovih namotaja je:

$$e_l = \frac{d\phi}{dt} = \omega \phi \sin \omega t , \quad (2.7)$$

gdje je Φ_m – amplituda magnetskog fluksa uspostavljenog u jezgru i jednaka je proizvodu maksimalne vrijednosti magnetske indukcije – B_m i površine poprečnog presjeka jezgra – S_{Fe} :

$$\phi_m = B_m S_{Fe} . \quad (2.8)$$

Efektivna vrijednost indukovane ems po navojku ovih namotaja data je izrazom:

$$E_I = \frac{E_{Im}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} \phi_m = 4.44 f B_m S_{Fe} . \quad (2.9)$$

Ukoliko sa N_1 i N_2 označimo broj navojaka primara i sekundara respektivno, onda su indukovane elektromotorne sile u ovim namotajima jednake:

$$\begin{aligned} E_1 &= 4.44 f N_1 B_m S_{Fe} , \\ E_2 &= 4.44 f N_2 B_m S_{Fe} . \end{aligned} \quad (2.10)$$

Imajući u vidu odsustvo gubitaka snage, za idealni transformator vrijede relacije:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.11)$$

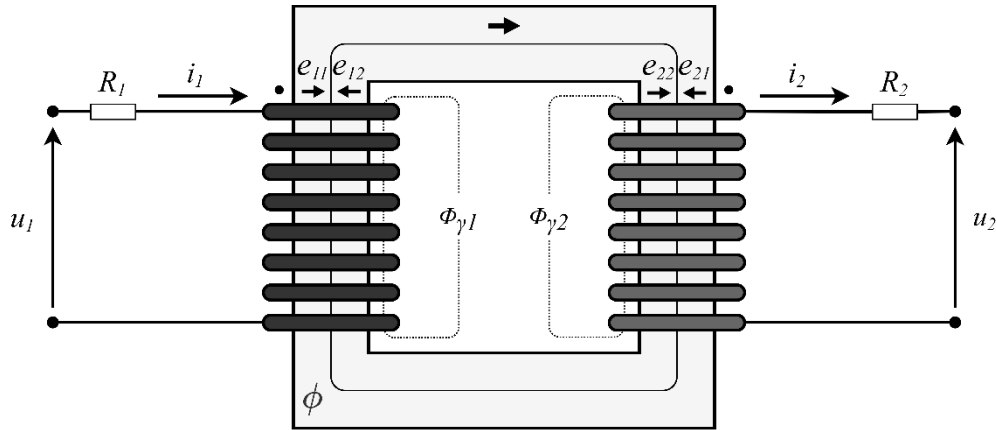
i

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} . \quad (2.12)$$

Samim tim, jasno je da je struja primara jednaka struji opterećenja, svedenoj na primar, tj. da struja magnetizacije teži nuli, što je i logično, imajući u vidu da permeabilnost jezgra teži beskonačnosti. Iz toga dalje slijedi da magnetomotorna sila, potrebna za magnećenje jezgra, takođe teži nuli [31].

2.2.3. Transformator sa linearnim jezgrom

Ukoliko se u analizu uvede linearna karakteristika magnećenja, odnosno konačna vrijednost magnetske permeabilnosti, kao i konačna vrijednost aktivne otpornosti namotaja, onda ukupna magnetomotorna sila više nije jednaka nuli [31]. Magnetski fluks više nije idealno kanalisani, tj. fluksevi koji su posljedica protoka primarne i sekundarne struje kroz namotaje, više nisu isključivo ograničeni jezgrom, već postoje i flusevi rasipanja Φ_γ (Slika 2.8). To znači da fluks koji se obuhvata namotajem primara, odnosno namotajem sekundara nije isti.



Slika 2.8 – Transformator sa linearnim jezgrom

U skladu sa Lenz-ovim pravilom, usvojeni su smjerovi elektromotornih sila koje su posledica samoindukcije i međusobne indukcije namotaja [31]. Naponske jednačine koje odgovaraju prikazanoj šemi su:

$$u_1 - R_1 i_1 + e_{11} - e_{12} = 0 \quad (2.13)$$

i

$$u_2 + R_2 i_2 - e_{22} + e_{21} = 0 \quad (2.14)$$

Odnosno,

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (2.15)$$

i

$$u_2 = -R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (2.16)$$

Pošto je u slučaju priključenog opterećenja, struja primara jednaka zbiru struje magnećenja i struje opterećenja [31], možemo pisati:

$$i_1 = i_\mu + i_{1opt} = i_\mu + \frac{i_2}{m} \quad (2.17)$$

Odatle je sekundarna struja jednaka:

$$i_2 = m(i_1 - i_\mu) \quad (2.18)$$

Zamjenom (2.18) u (2.15) imamo da je:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{d}{dt} (m(i_1 - i_\mu)) \quad (2.19)$$

odnosno,

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 - mM) \frac{di_1}{dt} + mM \frac{di_\mu}{dt} . \quad (2.20)$$

Dok zamjenom (2.17) u (2.16) dobijamo

$$u_2 = -R_2 i_2 - \left(L_2 - \frac{M}{m} \right) \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_\mu}{dt} . \quad (2.21)$$

Posmatrajući izraze:

$$L_1 - mM = \frac{N_1^2}{R_m} - \frac{N_1}{N_2} k \sqrt{L_1 L_2} = \frac{N_1^2}{R_m} - \frac{N_1}{N_2} k \sqrt{\frac{N_1^2}{R_m} \frac{N_2^2}{R_m}} , \quad (2.22)$$

$$L_1 - mM = (1 - k) \frac{N_1^2}{R_m} ,$$

i

$$L_2 - \frac{M}{m} = \frac{N_1^2}{R_m} - \frac{N_2}{N_1} k \sqrt{\frac{N_1^2}{R_m} \frac{N_2^2}{R_m}} , \quad (2.23)$$

$$L_2 - \frac{M}{m} = (1 - k) \frac{N_2^2}{R_m} ,$$

i imajući u vidu da je koeficijent k – ustvari faktor sprege, jasno je da ove veličine odgovaraju rasipnim induktivitetima primarnog i sekundarnog namotaja [31].

Naime, u prethodnom poglavlju, bilo je riječi o idealnom transformatoru, tj. o slučaju kada je magnetski fluks idealno kanalan. To je, ujedno i slučaj idealne magnetske sprege. Vrijednost faktora sprege, tada je jednaka jedinici, te su rasipne induktivnosti nepostojeće u tom slučaju. Međutim, konstatovano je da kod realnog transformatora, ovom koeficijentu odgovara vrijednost manja od 1, jer dolazi do pojave rasipanja magnetskog fluksa. Uticaj pojave rasipnog fluksa, može se opisati i pomoću tzv. faktora rasipanja [32]:

$$\sigma = 1 - k^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} . \quad (2.24)$$

Očigledno je da je u slučaju idealne sprege, faktor rasipanja jednak nuli, imajući u vidu da je tada $k=1$. Nasuprot tome, u slučaju da je $k=0$, tj. sprega između dva namotaja je nepostojeća, pa samim tim, ovaj faktor ima svoju maksimalnu vrijednost, i jednak je jedinici.

Nakon definisanja rasipnih reaktansi primarnog i sekundarnog namotaja, jednačine (2.15) i (2.16) se mogu zapisati kao:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{\gamma 1} \frac{di_1}{dt} + mM \frac{di_\mu}{dt} , \quad (2.25)$$

$$u_2 = -R_2 i_2 - L_{\gamma 2} \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_\mu}{dt} . \quad (2.26)$$

Prelaskom u kompleksni domen i množenjem druge jednačine prenosnim odnosom, jednačine dobijaju oblik:

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_{\gamma 1} \bar{I}_1 + j\omega m M \bar{I}_\mu , \quad (2.27)$$

$$m \bar{U}_2 = -m^2 R_2 \frac{\bar{I}_2}{m} - j\omega m^2 L_{\gamma 2} \frac{\bar{I}_2}{m} + j\omega m M \bar{I}_\mu . \quad (2.28)$$

Pri tome su $m^2 R_2$ i $m^2 X_{\gamma 2}$ – vrijednosti aktivnog otpora i reaktanse rasipanja sekundarnog namotaja „svedene“ na primarnu stranu, dok su $m \bar{U}_2$ i $\bar{I}_2/m$ – „svedene“ vrijednosti sekundarnog napona i sekundarne struje [31].

Svođenjem vrijednosti na primarnu stranu, važi i sledeća jednakost:

$$\bar{E}_1 = \bar{E}'_2 = j\omega m M \bar{I}_\mu , \quad (2.29)$$

tj. transformacijama su izjednačene indukovana elektromotorna sila na primarnoj strani i elektromotorna sila indukovana u sekundarnom namotaju, koja je pri tome svedena na primar [31].

Vrijednost odnosa modula elektromotorne sile i struje magnećenja, jednaka je reaktansi magnećenja [31]:

$$X_0 = X_\mu = \frac{E_1}{I_\mu} = \omega m M . \quad (2.30)$$

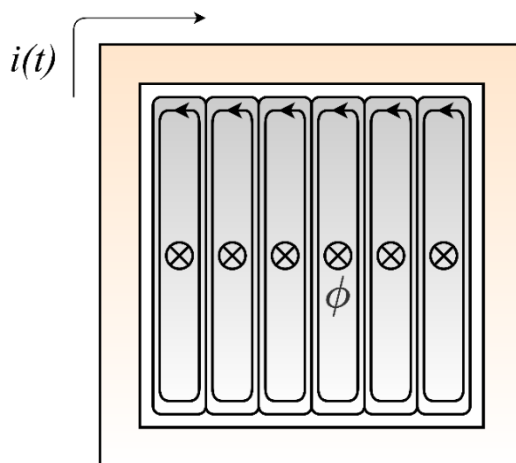
2.2.4. Realni transformator sa gubicima u gvožđu

U prethodnom poglavlju, analiziran je model i princip rada realnog transformatora, bez gubitaka u gvožđu. Naime, rečeno je u uvodnom djelu da je porijeklo ovih gubitaka pojava vrtložnih struja, kao i histerezisna karakteristika feromagnetskog materijala. Prije nastavka analize modela realnog transformatora, ukratko će biti opisane pomenute dvije vrste gubitaka aktivne snage u transformatoru.

2.2.4.1. Gubici usljed vrtložnih struja

Osim toga što se odlikuju visokom vrijednošću relativne magnetske permeabilnosti, feromagnetici su takođe i električni provodnici, iako imaju znatno veću vrijednost specifične električne otpornosti od bakra. Uspostavljanjem vremenski promjenljivog magnetskog toka, u jezgru će se indukovati vrtložne struje takvog smjera, da se polje koje one stvaraju suprotstavlja glavnom magnetskom toku [31,32]. Pojava vrtložnih struja u provodnom materijalu, kakav je gvožđe, neizbježno je praćena prisustvom Džulovih gubitaka. Osim Džulovih gubitaka, javlja se i skin-efekat (engl. *Skin Effect*), tako da je u središtu poprečnog presjeka jezgra, polje u velikoj mjeri oslabljeno, a uz same ivice, jako je izraženo. Na tim mjestima, permeabilnost jezgra teži ka vrijednosti magnetske permeabilnosti vakuuma [31,32]. Štaviše, feromagnetik gubi sposobnost uspješnog kanalisanja magnetskog fluksa, te dolazi do rasipanja istog.

Zbog prethodno navedenog, jezgro transformatora se, umjesto od masivnog gvožđa formira slaganjem međusobno izolovanih limova, paralelno linijama polja, na način prikazan na Slici 2.9.



Slika 2.9 – Vrtložne struje u laminacijama jezgra

Kako su limovi međusobno izolovani, na ovaj način se povećava dužina puta kojim se indukovane struje zatvaraju. Povećanje strujnog puta, za posljedicu ima povećanje otpornosti na koju vrtložne struje nailaze. Povećanje otpornosti, za sobom povlači slabljenje intenziteta vrtložnih struja, a samim tim i Džulovih gubitaka prouzrokovanih njihovim protokom. Povećanje otpornosti, odnosno dodatno smanjenje gubitaka postiže se i upotrebom legura gvožđa i silicijuma. Procenat silicijuma u ovim legurama je nizak, ali njegovo prisustvo utiče na povećanje otpora prethodno pomenutih strujnih puteva, a istovremeno povećava sile istezanja [31,32].

Gubici usljed pojave vrtložnih struje se računaju pomoću formule:

$$P_V = K_V \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (2.31)$$

gdje je K_V – koeficijent koji zavisi ne samo od zapremine već i od dimenzija samih dinamo limova [32]. Iz formule po kojoj se gubici računaju, jasno je da su isti, proporcionalni kvadratu frekvencije magnećenja i kvadratu maksimalne vrijednosti magnetske indukcije u jezgri transformatora.

2.2.4.2. Gubici usljed histereza

Feromagnetski materijali sačinjeni su od velikog broja tzv. magnetskih domena. Sam magnetski domen, ustvari je skupina atoma sa istom usmjerenošću magnetskih momenata. Svaki domen se na taj način odlikuje rezultatnim magnetskim momentom. U odsustvu stranog magnetskog polja, njihova orijentacija je haotična. Izlaganjem feromagnetika stranom polju, dolazi do „rasta“ onih domena, već orijentisanih u smjeru polja. Pri većim vrijednostima stranog polja, čitavi domeni se zakreću u skladu sa smjerom primijenjenog polja i feromagnetik odlazi u zasićenje [32].

Pošto je magnećenje transformatora naizmjenično, orijentacija magnetskih domena se mijenja jednakom učestanošću kao i napon mreže. Rad uložen u tu svrhu, proporcionalan je frekvenciji magnećenja i površini histerezisne petlje [31]. Zbog toga se magnetska kola transformatora i ostalih mašina naizmjenične struje, umjesto masivnog gvožđa, izvode od tzv. mekih feromagnetskih materijala koje karakteriše uska histerezisna petlja. Tako se histerezisni gubici mogu značajno umanjiti.

Za proračun vrijednosti ovih gubitaka, vezuje se formula:

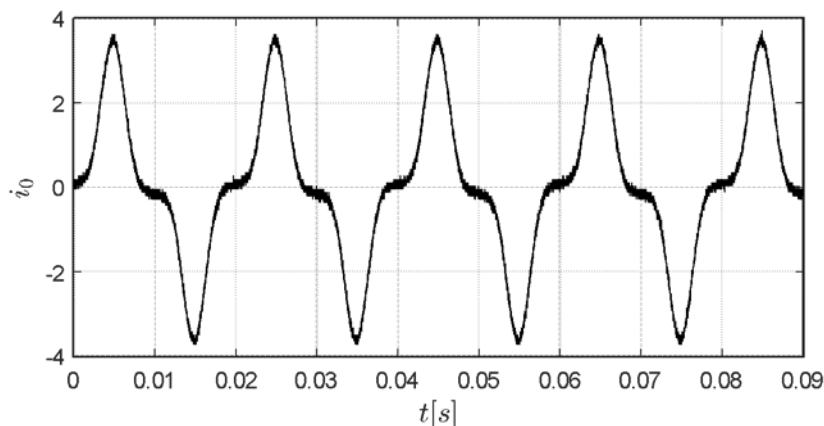
$$P_H = K_H \cdot B_{max}^n \cdot f \left[\frac{W}{kg} \right] \quad (2.32)$$

gdje je K_H – tzv. Štajnmecov sačinilac, a n – konstanta čija vrijednost leži u intervalu 1.5 – 2.5, u zavisnosti od vrste materijala [31]. Ipak, kao vrijednost ove konstante najčešće se uzima $n=2$, pa se zbog toga se može reći da su histerezisni gubici proporcionalni frekvenciji magnećenja i kvadratu amplitude magnetske indukcije.

2.2.4.3. Aktivna i reaktivna komponenta struje praznog hoda

Posmatrajući realni transformator i imajući u vidu oblik karakteristike magnećenja, efekat zasićenja, kao i uticaj prisustva gubitaka u gvožđu, može se analizirati posmatranjem talasnog oblika struje praznog hoda. Naime, kada je sekundar transformatora neopterećen, a na primar doveden sinusoidalni napon nominalne vrijednosti, dakle, kad je transformator u praznom hodu, kroz namotaj primara teče struja praznog hoda. Ona se može razložiti na dvije komponente: aktivnu i reaktivnu. Reaktivna komponenta struje praznog hoda, u stvari je struja magnećenja. Prisustvo sinusoidalnog napona na izvodima primarnog namotaja, za posljedicu ima uspostavljanje magnetskog toka, koji je takođe sinusoidalna veličina. Uspostavljeni fluks je fazi sa strujom koja je njegov uzročnik – struja magnećenja. Veza između magnetskog fluksa i struje magnećenja nije linearna, već zavisi od oblika histerezisne petlje. Samim tim, da bi talasni oblik fluksa bio sinusoidalan, ova struja ne može biti prostoperiodična veličina. Vrijednost aktivne komponente struje praznog hoda zavisi od vrijednosti gubitaka u gvožđu. Pomenuti gubici snage, manji su kod transformatora čije se jezgro odlikuje uskom histerezisnom petljom, nego kod transformatora, čijem jezgru odgovara šira B-H karakteristika [31,32].

Na Slici 2.10 je prikazan talasni oblik struje praznog hoda, koji odgovara monofaznom dvonamotajnom transformatoru, nominalne prividne snage 3kVA i prenosnog odnosa 220/6 V/V.



Slika 2.10 - Struja praznog hoda (Monofazni transformator – 3kVA, 220/6 V/V, 50Hz)

Aktivna komponenta ove struje, u fazi je sa primijenjenim naponom (ukoliko zanemarimo impedansu primarnog namotaja), odnosno fazno je pomjerena u odnosu na struju magnećenja, koja je sama po sebi simetrična u odnosu na vremensku osu. Kako je struja praznog hoda predstavlja zbir ove dvije struje, otud i izobličenje u njenom talasnom obliku. Što su gubici u gvožđu

transformatora manji, to je amplituda aktivne komponente manja. Samim tim, manji je i njen uticaj na talasni oblik struje praznog hoda, pa je i izobličenje u tom slučaju manje. Drugim riječima, što su gubici u gvožđu manji, oblik struje praznog hoda, bliži je obliku struje magnećenja.

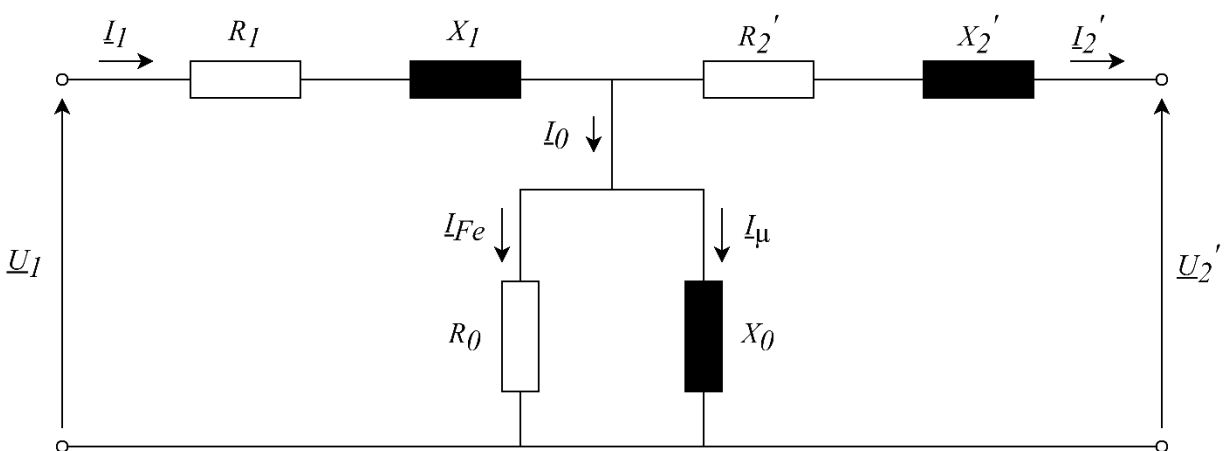
Imajući u vidu da su obje vrste gubitaka u gvožđu proporcionalne kvadratu maksimalne vrijednosti magnetske indukcije, a ova vrijednost proporcionalna efektivnoj vrijednosti indukovane elektromotorne sile u namotaju, onda se gubici u gvožđu mogu modelovati sa aktivnim otporom vezanim paralelno reaktansi magnećenja [31]. Dakle, za otpornost gubitaka u gvožđu važi sljedeća relacija [31]:

$$R_0 = R_{Fe} = \frac{E_1^2}{P_{Fe}} = \frac{P_{Fe}}{I_{Fe}^2}, \quad (2.33)$$

gdje je P_{Fe} – vrijednost gubitaka snage u gvožđu, a I_{Fe} – aktivna komponenta struje praznog hoda.

2.4. Zamjenska šema TR

Zamjenska T šema monofaznog dvonamotajnog transformatora, prikazana je na slici 2.11. Aktivne otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja, označene su sa R_1 i R_2' , dok su sa X_1 i X_2' označene njihove rasipne reaktanse. Aktivna otpornost koja odgovara gubicima u gvožđu, označena je sa R_0 i nalazi se u paralelnoj vezi sa reaktansom magnećenja X_0 .



Slika 2.11 – Zamjenska T šema transformatora

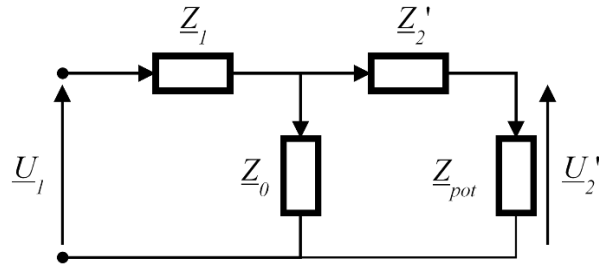
Impedansa primarnog namotaja i impedansa sekundarnog namotaja, svedena na primar, mogu se zapisati u obliku:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= R_1 + jX_1 , \\ \bar{Z}'_2 &= R'_2 + jX'_2 ,\end{aligned}\tag{2.34}$$

dok impedansi poprečne grane odgovara izraz:

$$\underline{Z}_0 = \frac{R_0 \cdot jX_0}{R_0 + jX_0} .\tag{2.35}$$

Kada je na izvodima sekundara priključen potrošač, električna šema odgovara Slici 2.12.



Slika 2.12 – Šema transformatora sa potrošačem

Ekvivalentna impedansa ovog kola je:

$$\bar{Z} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_0 \parallel (\bar{Z}'_2 + \bar{Z}_{pot}) ,\tag{2.36}$$

gdje je $\underline{Z}_{pot}$ – impedansa potrošača, priključenog na sekundar transformatora.

Efektivna vrijednost primarne struje, jednaka je količniku efektivne vrijednosti napona primara i modula ekvivalentne impedanse:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z} ,\tag{2.37}$$

dok se vrijednost sekundarne struje, svedene na primar, može odrediti prema izrazu:

$$I'_2 = \left| \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_0 + (\bar{Z}'_2 + \bar{Z}_{pot})} \cdot \left(\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}} \right) \right| .\tag{2.38}$$

Konačno je, vrijednost napona sekundarnog namotaja, svedena na primar, jednaka proizvodu efektivne vrijednosti sekundarne struje, svedene na primar i modulu impedanse potrošača:

$$U'_2 = I'_2 \cdot |\bar{Z}_{pot}| .\tag{2.39}$$

Ulazna aktivna i ulazna reaktivna snaga, jednake su realnom, odnosno imaginarnom djelu proizvoda napona i struje primara:

$$\begin{aligned} P_1 &= \operatorname{Re}\{\bar{U}_1 \bar{I}_1\} , \\ Q_1 &= \operatorname{Im}\{\bar{U}_1 \bar{I}_1\} , \end{aligned} \quad (2.40)$$

dok se za izlaznu aktivnu i reaktivnu snagu može pisati:

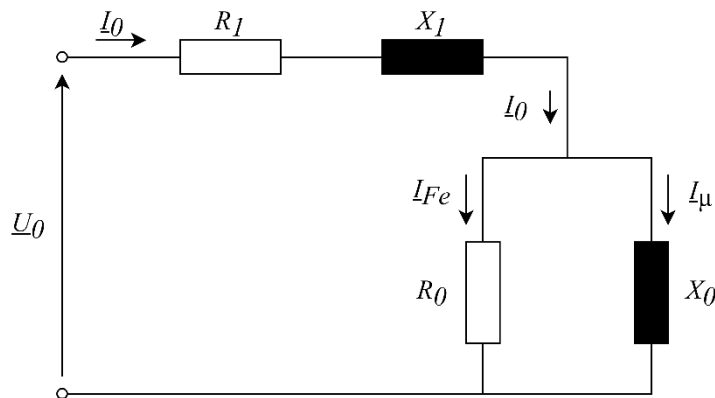
$$\begin{aligned} P_2 &= R_{pot} \cdot I_2^2 = R'_{pot} \cdot I_2'^2 , \\ Q_2 &= X_{pot} \cdot I_2^2 = X'_{pot} \cdot I_2'^2 . \end{aligned} \quad (2.41)$$

2.5. Klasični metod određivanja parametara TR

Klasični metod određivanja parametara transformatora podrazumijeva izvođenje ogleda praznog hoda i kratkog spoja, u skladu sa IEEE odrednicama [34], i upotrebu dobijenih eksperimentalnih rezultata u proračunu vrijednosti parametara zamjenske šeme.

2.5.1. Ogled Praznog Hoda

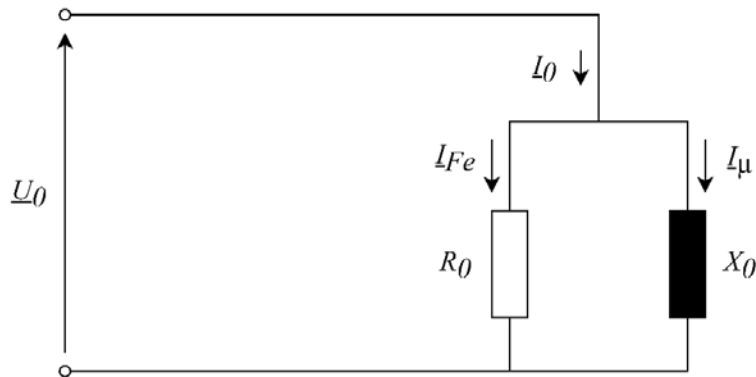
Ogled praznog hoda se izvodi tako što se na jednom namotaju (primarnom ili sekundarnom) dovede napon nominalne vrijednosti, dok je drugi namotaj (sekundarni ili primarni) otvoren [31,32]. Rezultati ogleda, se koriste pri određivanju parametara poprečne grane zamjenske šeme (otpornost gubitaka u gvožđu i reaktansa magnećenja). Kroz namotaj koji se napaja teče struja i_0 – struja praznog hoda. Kako je drugi namotaj otvoren, strujni tok se u njemu ne uspostavlja. Samim tim, zamjenska šema se može pojednostaviti (Slika 2.13).



Slika 2.13 – Zamjenska šema za ogled praznog hoda [28]

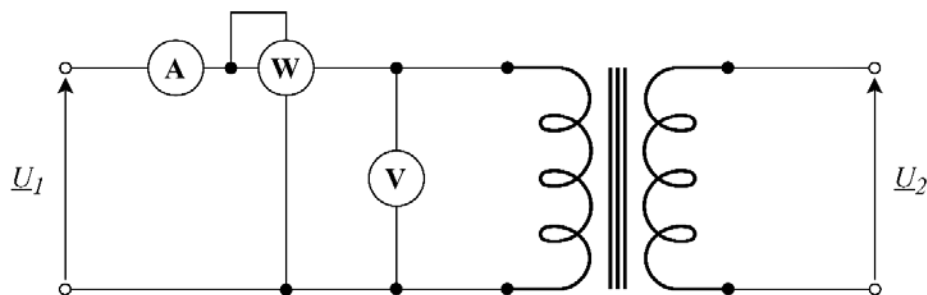
Šema sa slike 2.12 se može dodatno pojednostaviti, ako se u obzir uzme da struja PH po vrijednosti iznosi svega par procenata nominalne struje namotaja koji se napaja, te da je samim tim pad napona

na impedansi tog namotaja (aktivna otpornost i rasipna reaktansa) zanemarljiv. Naime, izuzimajući impedansu namotaja primara iz razmatranja, dobijamo pojednostavljenu zamjensku šemu, prikazanu na Slici 2.14.



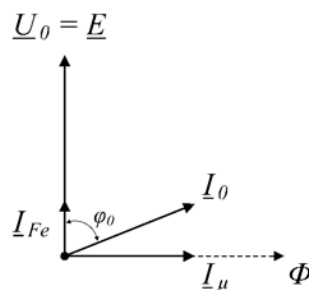
Slika 2.14 – Pojednostavljena zamjenska šema za ogled PH

Za potrebe izračunavanja pomenutih parametara, potrebno je mjeriti vrijednosti napona, struje i aktivne snage pri praznom hodu transformatora. Prikaz eksperimentalne postavke, dat je na Sl. 2.15.



Slika 2.15 – Postavka mjerne aparature za ogled PH

Na slici 2.16 je prikazan fazorski dijagram koji odgovara pojednostavljenoj zamjenskoj šemi (Slika 2.15).



Slika 2.16 – Fazorski dijagram transformatora u praznom hodu

Izuzimajući aktivnu otpornost namotaja iz razmatranja, pokazivanje vatmetra odgovara snazi gubitaka u gvožđu i jednako je:

$$P_0 = P_{Fe} = U_0 I_0 \cos \varphi_0 . \quad (2.42)$$

Prema tome je, dalje:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{Fe}}{U_0 I_0} . \quad (2.43)$$

Iz fazorskog dijagrama prikazanog na slici 2.16, imaginarna komponenta struje praznog hoda, odnosno struja magnećenja, jednaka je:

$$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0 . \quad (2.44)$$

Konačno, aktivna otpornost kojom se modeluju gubici u gvožđu je:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P_{Fe}} , \quad (2.45)$$

dok je reaktansa magnećenja:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_\mu} = \frac{U_0}{I_0 \sin \varphi_0} . \quad (2.46)$$

2.5.2. Ogled Kratkog Spoja

Pod kratkim spojem, podrazumijeva se stanje transformatora, u kom je jedan namotaj kratko spojen, dok je drugi namotaj pod naponom [31,32]. Razlikuju se dva tipa kratkih spojeva:

- EKSPLOATACIONI KRATKI SPOJ

Ovaj tip kratkog spoja se javlja usljed nekog havarijskog procesa u mreži. Vrijednosti struja koje se javljaju, višestruko su veće od nominalnih. Samim tim, razvijene elektrodinamičke sile imaju razoran uticaj na namotaje.

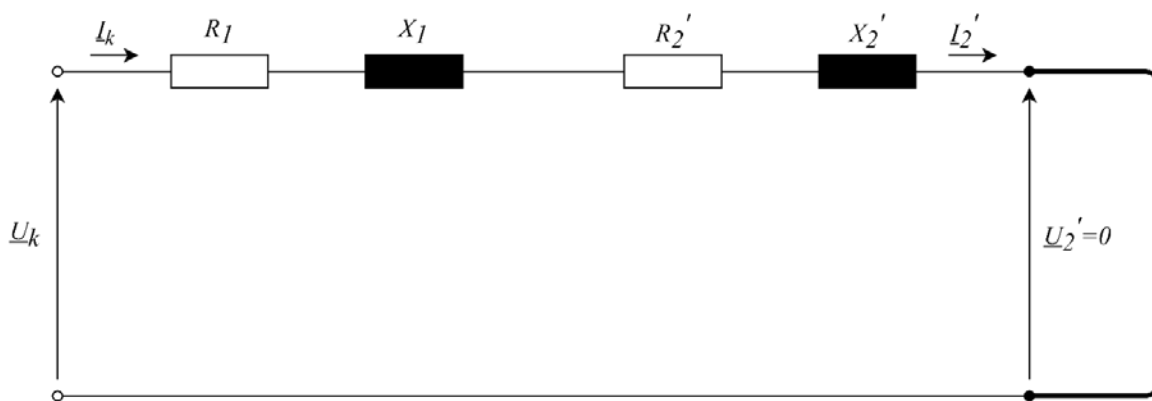
- EKSPERIMENTALNI KRATKI SPOJ

Ovaj tip kratkog spoja se vrši pri ispitivanju transformatora i podrazumjeva kratko spajanje jednog od namotaja i postepeno podizanje napona na drugom namotaju, se dok struje koje teku kroz primar, odnosno sekundar ne dostignu nominalnu vrijednost. Nominalna struja se javlja pri relativno malim vrijednostima ulaznog napona.

Odnos stvarne vrijednosti napona kratkog spoja U_k i nominalnog napona U_n – izražen u procentima, naziva se relativnim naponom kratkog spoja $u_k(\%)$:

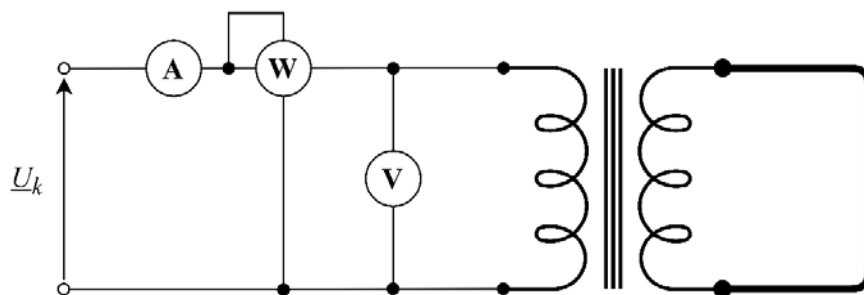
$$u_k(\%) = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 . \quad (2.47)$$

Kao posledica male vrijednosti napona kratkog spoja, vrijednost magnetske indukcije u jezgru je mala, a samim tim, mala je i vrijednost indukovane elektromotorne sile. Imajući u vidu da je impedansa poprečne grane značajno veća od impedansi primarnog ili sekundarnog namotaja, kroz poprečnu granu u ovom slučaju ne može proteći značajna struja. Time je omogućeno pojednostavljenje zamjenske šeme transformatora koja odgovara eksperimentalnom kratkom spoju. Zanimarivanjem elemenata otočne grane, dobija se šema prikazana na slici 2.17.



Slika 2.17 – Pojednostavljena zamjenska šema za ogled kratkog spoja

Tipična postavka mjerne aparature, koja odgovara ovom ogledu, prikazana je na Slici 2.18.



Slika 2.18 – Postavka mjerne aparature za ogled kratkog spoja

U skladu sa šemom (Sl. 2.17), napon i impedanska kratkog spoja jednaki su:

$$U_k = I_k \cdot \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} , \quad (2.48)$$

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} . \quad (2.49)$$

Kako pokazivanje vatmetra predstavlja vrijednost gubitaka snage u gvožđu, to je zbir otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja, gledano sa primarne strane, jednak:

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_{Cu}}{I_k^2} . \quad (2.50)$$

Poznavajući vrijednost impedanse kratkog spoja, zbirna vrijednost rasipnih reaktansi je:

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} , \quad (2.51)$$

Utvrđivanje vrijednosti aktivnog otpora primarnog i sekundarnog namotaja ne predstavlja problem, imajući u vidu mogućnost primjene *DC resistance test – a*, međutim, podjela reaktanse X_k na X_1 i X'_2 nema jednostavno rješenje. Zbog toga je česta primijena sljedeće aproksimacije [31]:

$$X_1 = X'_2 = 0.5X_k . \quad (2.52)$$

3. Haotični Optimizacioni Algoritam

U ovom poglavlju je izložena teorijska osnova i porijeklo Haotičnog Optimizacionog Algoritma. Dat je kratak uvid u njegovo porijeklo i opisana je jednačina logističkog preslikavanja, koja se u njegovoj osnovi nalazi. Osim toga, u poglavlju je iznijet i predlog metoda zasnovanog na upotrebi pomenutog algoritma u estimaciji parametara zamjenske šeme monofaznog dvonamotajnog transformatora. Zajedno sa opisom predloženog metoda, u poglavlju su priloženi i djelovi programskog koda pomoću kojeg je pomenuti metod estimacije implementiran na opisanu problematiku određivanja parametara transformatora.

3.1. Teorija haosa i jednačina logističkog preslikavanja

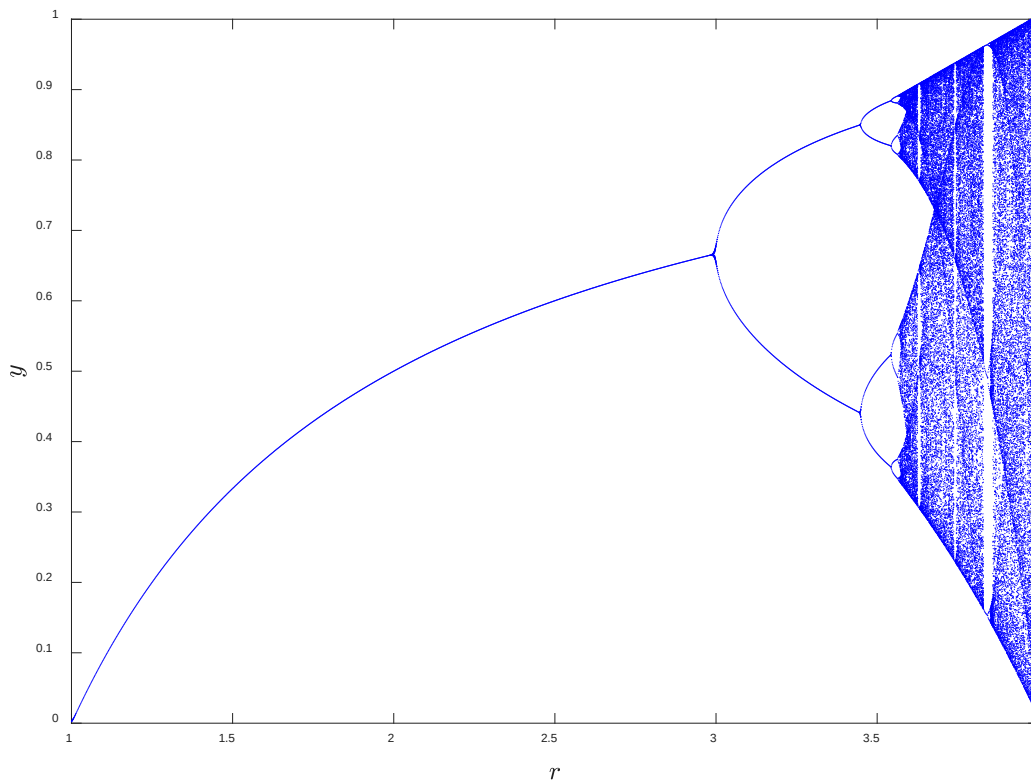
Među savremenim heurističkim tehnikama, ističu se one zasnovane na haotičnim sistemima. Naime, brojni prirodni, ali i procesi koji se javljaju u vještačkim sistemima, ispoljavaju haotičan karakter. Određene karakteristike haotičnih sistema, čine ih pogodnim za primjenu u različitim optimizacionim metodama, tako da su haotične sekvence našle primjenu pri rješavanju brojnih optimizacionih problema [19-23]. Osobine koje ih čine zanimljivim u primjeni kod metoda optimizacije su: osjetljivost na početne uslove, neponovljivost i dugoročna nepredvidljivost.

U literaturi se navode različiti pristupi formiranju haotičnih sekvenci. Među ovim pristupima ističu se Lozi, Tent, Gaus i ostala iterativna preslikavanja [28,29]. Algoritam koji počiva u osnovi metoda estimacije parametara transformatora, predstavljen u ovom radu, zasniva se na upotrebi jednačine logističkog preslikavanja [29]:

$$y_{k+1} = ry_k(1 - y_k) . \quad (3.1)$$

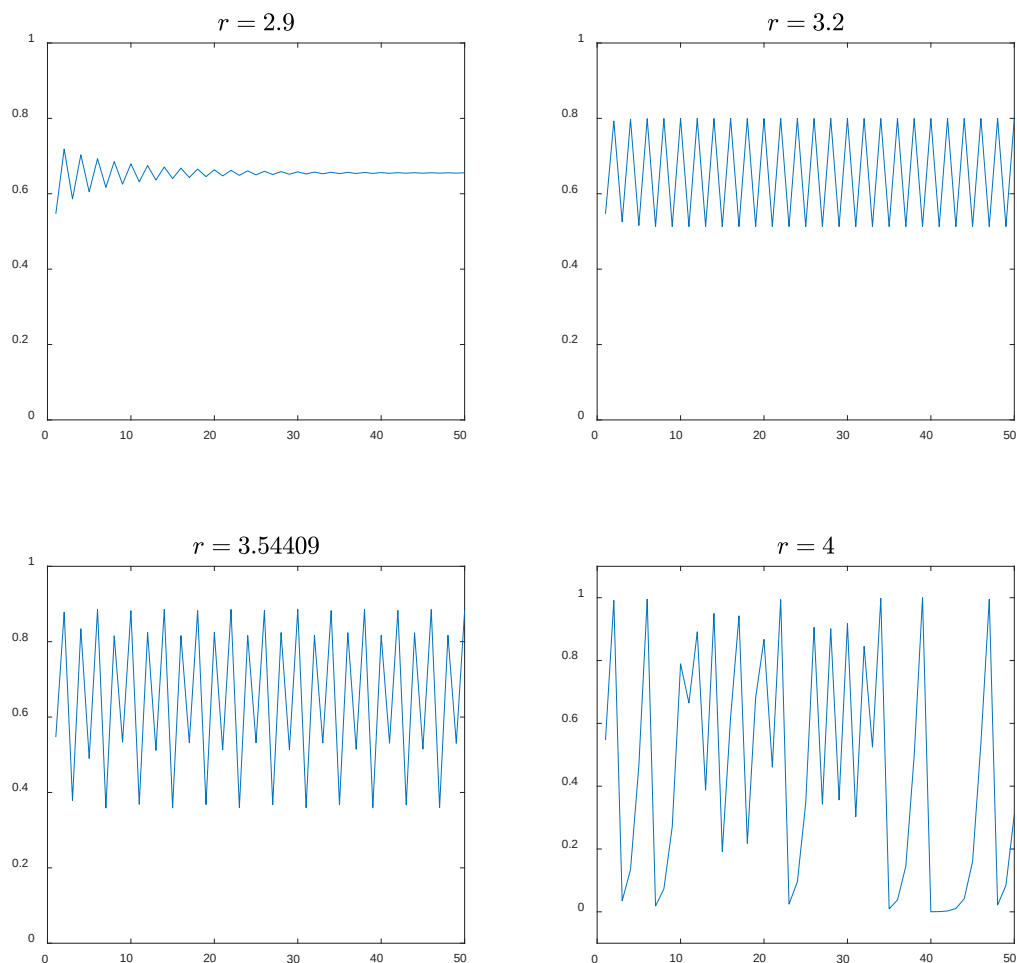
Ova jednačina ustvari predstavlja matematički osnovu modela za predviđanje brojnosti biološke populacije neke vrste. Različiti faktori, kao npr. uticaj predatora, nedostatak mogućnosti ishrane i slično, utiču na ovu procjenu, a njihov efekat je u obzir uzet upravo navedenom jednakosti. Brojnost populacije u sledećoj godini odgovara lijevoj strani jednačine, dok je y_k – brojnost populacije u trenutnoj godini i vrijednost je koja se kreće od 0 do 1. Pri tome je populacija najbrojnija za vrijednost 1, dok nultoj vrijednosti odgovara istrebljenje vrste. U jednačini takođe figuriše i faktor r – stepen porasta. Očigledan odgovor na pitanje „Kako stepen porasta utiče na

brojnost populacije?“ jeste da će se za veće vrijednosti ovog faktora, brojnost populacije ustabiliti oko veće vrijednosti, dok će se za manji stepen porasta, brojnost ustabiliti oko manje vrijednosti. Međutim, dok je tačno da se za male vrijednosti r , populacija ustabili u jednoj tački, i da pri porastu ovog faktora raste i populacija, ono što je neobično je da pri vrijednosti r većoj od 3, linija grafika dijeli na dva djela, tj. dolazi do bifurkacije (Slika 3.1). Drugim riječima, to bi značilo da će brojnost jedne godine imati jednu vrijednost, a druge godine drugu vrijednost, i tako ciklično. Odnosno, u matematičkom smislu, imali bismo oscilacije između dvije različite tačke (Slika 3.2).



Slika 3.1 – Grafik bifurkacije za jednačinu populacije

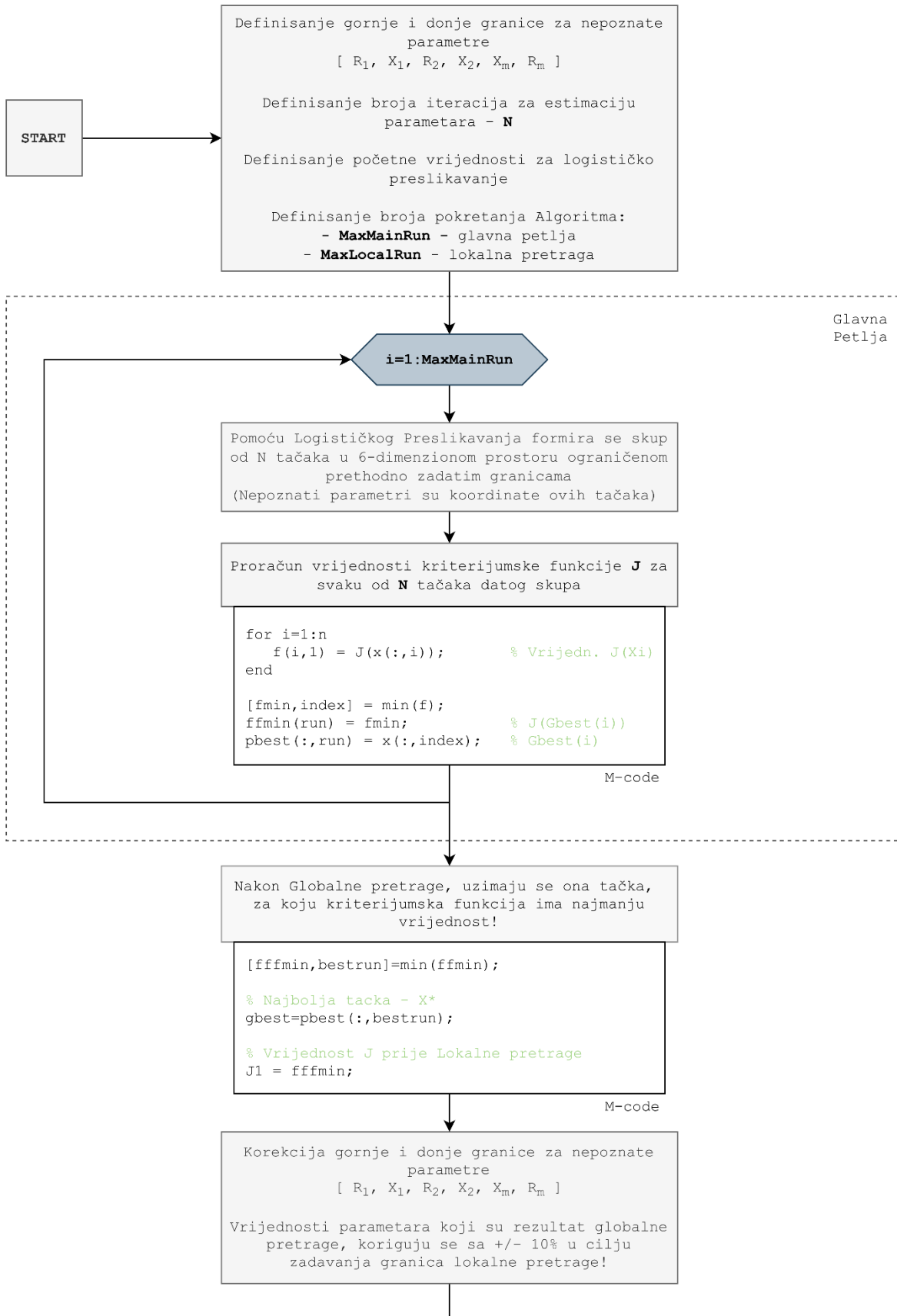
Dodatnim povećanjem stepena porasta, grafik će se podjeliti na četiri djela, što u matematičkom pogledu odgovara oscilacijama između 4 tačke (Slika 3.2). Povećavanjem vrijednosti ovog faktora, bifurkacije se dešavaju sve brže i brže, da bi za vrijednosti veće od $r=3.54409$ došlo do pojave haotičnog ponašanja, kada je nemoguće predvidjeti ponašanje jednačine. Haotičan karakter procesa se zadržava sve do vrijednosti $r=4$, ali brojnost ostaje u intervalu od 0 do 1. Za sve vrijednosti veće od 4, brojnost populacije izlazi iz ovog opsega, tj. dolazi do divergencije.

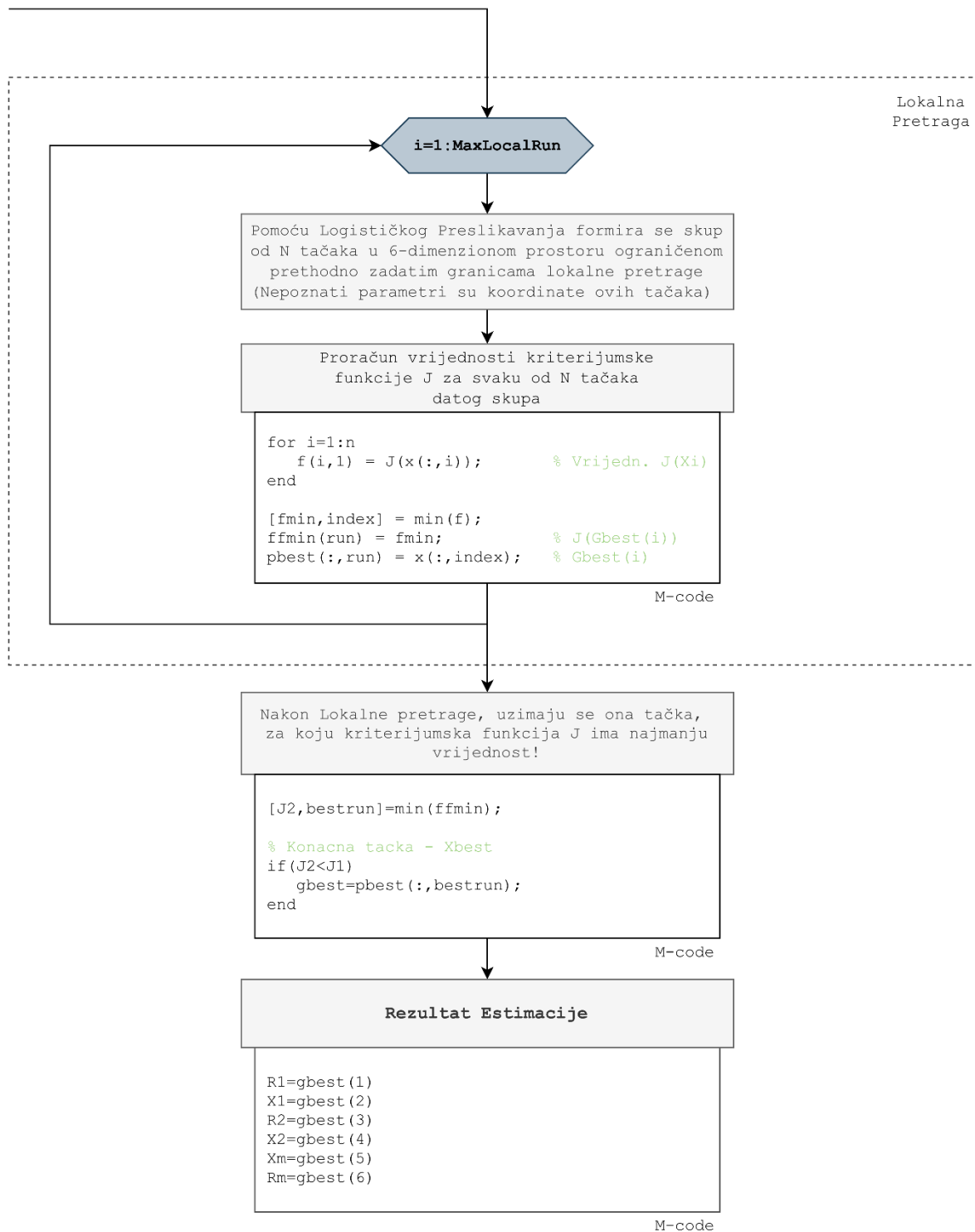


Slika 3.2 – Oscilacije u zavisnosti od vrijednosti faktora r

3.2. Predlog algoritma

U ovom poglavlju, redom su opisani dijelovi algoritma primijenjenog na opisanoj problematici estimacije parametara zamjenske šeme monofaznog dvonamotajnog transformatora. Uz opis predloženog algoritma, priložene su i odgovarajuće cjeline koda radi lakšeg pojašnjenja. Takođe je, na Slici 3.3 prikazan i blok dijagram Haotičnog Optimizacionog Algoritma, kao jedna cjelina, dok su pojedinačni segmenti algoritma, kao npr. ulazni podaci, definisanje granica pretrage, kriterijumska funkcija itd., posebno komentarisani u nastavku.





Slika 3.3 – Blok dijagram Haotičnog Optimizacionog Algoritma

3.2.1. Ulazni podaci

Definicija granica prostora pretrage, odnosno opsega u okviru kojeg se odgovarajući parametri trebaju tražiti, prvi je korak u realizaciji primijene algoritma na odgovarajući problem. U našem slučaju, definišemo gornju i donju granicu za svaki od šest parametara koje treba estimirati (Otpornosti i reaktanse rasipanja primarnog i sekundarnog namotaja, otpornost gubitaka u gvožđu i reaktansa magnećenja).

M-code – Definisanje ulaznih podataka algoritma

```
L=[0.40    0.15    0.45    0.01    250    1300];    % Donja Granica
U=[0.45    0.25    0.60    0.08    300    1600];    % Gornja Granica

po=0.09;          % Pocetne vrijednosti pri def. COA parametara
n=1000;           % Broj tacaka
maxrun=100;       % MaxMainRun = MaxLocalRun
```

Osim, dva vektora kojima su definisane granice prostora pretrage, u ulazne podatke spada i broj tačaka – n , koje ulaze u razmatranje, a do kojih dolazimo svakom iteracijom glavne petlje. Broj iteracija glavne petlje (MaxMainRun) i broj iteracija lokalne pretrage (MaxLocalRun) je u ovom slučaju jednak. Osim, navedenih parametara, kao ulazni podatak se bira i početna vrijednost logističkog preslikavanja.

3.2.2. Globalna Pretraga

U jednoj iteraciji glavne petlje, formira se skup tačaka koji predstavlja podskup prostora pretrage. Naime, kao ulazni podatak – N , definisan je određen broj tačaka iz glavnog skupa, čije smo granice definisali u prethodnom djelu koda. Ovaj skup tačaka, formira se pozivanjem funkcije „inicijal“, koja kao ulazne argumente ima gornju i donju granicu vrijednosti parametara koje želimo odrediti, zatim broj tačaka koje želimo uzeti u razmatranje, i konačno, početnu vrijednost logističkog preslikavanja.

U okviru ove funkcije, a prema formuli logističkog preslikavanja, formira se niz od N tačaka, od kojih svaka tačka ima šest koordinata i predstavlja jedan set parametara zamjenske šeme transformatora.

Preslikavanje se odvija prema (3.1), pri čemu je stepen porasta u našem slučaju jednak 4, dok je početna vrijednost logističkog preslikavanja neki nasumični broj u opsegu od 0 do 1.

U svakoj iteraciji petlje formira se niz vrijednosti koji odgovaraju jednoj koordinati, odnosno jednom od šest parametara transformatora. Drugim riječima, formirana haotična sekvenca, koja se sastoji od realnih brojeva u opsegu od 0 do 1, mora se preskalirati u skladu sa definisanom gornjom i donjom granicom pojedinih parametara. Kao što se vidi iz prikazanog koda, to se vrši po formuli:

$$X(s) = L + Y(s)(U - L) , \quad (3.2)$$

gdje su U i L gornja i donja granica za dati parametar zamjenske šeme, $Y(s)$ – član haotične sekvence, a $X(s)$ – vrijednost preskalirana su skladu sa zadatim granicama.

M-code – Logističko Preslikavanje

```
function [R1,X1,R2,X2,Xm,Rm]=inicijal(L,U,po,n)

%% R1
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
    R1(s)=L(1)+y(s)*(U(1)-L(1));
end

%% X1
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
    X1(s)=L(2)+y(s)*(U(2)-L(2));
end

%% R2
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
    R2(s)=L(3)+y(s)*(U(3)-L(3));
end

%% X2
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
```

```

        X2(s)=L(4)+y(s)*(U(4)-L(4));
end

%% Xm
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
    Xm(s)=L(5)+y(s)*(U(5)-L(5));
end

%% Rm
y(1)=po*rand;
for s=1:n+1;
    y(s+1)=4*y(s)*(1-y(s));
    % y(s+1)=(3.5+((4.0-3.5)/n)*s)*y(s)*(1-y(s));
    Rm(s)=L(6)+y(s)*(U(6)-L(6));
end

```

Nakon formiranja ovog skupa, može se sagledati glavna programska petlja algoritma, u okviru koje se prethodno opisana funkcija poziva.

M-code – Globalna Pretraga

```

for run=1:maxrun

% Pozivanje algoritma

    [R1,X1,R2,X2,Xm,Rm]=inicijal(L,U,po,n);

    x=[R1;X1;R2;X2;Xm;Rm];

    for i=1:n
        f(i,1)=J(x(:,i));           % Vrijednosti J(Xi)
    end

    [fmin,index]=min(f);
    fffmin(run)=fmin;                % J(Gbest(i))
    pbest(:,run)=x(:,index);         % Gbest(i)

end

[fffmin,bestrun]=min(fffmin);
gbest=pbest(:,bestrun);             % Najbolja tacka - X*

J1 = fffmin;                        % Vrijednost J prije
Lokalne pretrage

```

3.2.3. Kriterijumska funkcija

Nakon inicijalizacije haotičnih sekvenci i skaliranja vrijednosti, na raspolaganju imamo skup tačaka koje predstavljaju različite setove parametara. Za svaki set parametara, proračunava se vrijednost kriterijumske funkcije J . Ova funkcija, u našem slučaju u obzir uzima primarnu i sekundarnu struju, napon sekundara, kao i aktivne snagu, kako u primarnom, tako i u sekundarnom krugu. U najjednostavnijem obliku, dovoljno je posmatrati samo napone i struje i porediti izmjerene vrijednosti sa estimiranim. Pod estimiranim vrijednostima pomenutih električnih veličina, podrazumjevamo proračunate vrijednosti koje odgovaraju matematičkom modelu transformatora, sa parametrima koji su rezultat primjene algoritma. U radu je analizirana primjena različitih kriterijumskih funkcija, ali u svom osnovnom obliku u njoj figurišu samo estimirane i izmjerene vrijednosti primarne i sekundarne struje, kao i napona sekundara:

$$J = \sum_{k=1}^M \left[\left(\frac{I_{1est}^{(k)}}{I_1^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{I_{2est}^{(k)}}{I_2^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{V_{2est}^{(k)}}{V_2^{(k)}} - 1 \right)^2 \right], \quad (3.3)$$

pri čemu je M - broj izvršenih mjerenja. Druge kriterijumske funkcije koje su u istraživanju upotrijebljene, nastale su proširivanjem ovog izraza i uvažavanjem ostalih električnih veličina koje su prilikom eksperimenta izmjerene.

M-code – Kriterijumska Funkcija

```
function f=ofun3CORE(x)

    R1=x(1);
    X1=x(2);
    R2=x(3);
    X2=x(4);
    Xm=x(5);
    Rm=x(6);

    %% Mjereni podaci

    prenos=2; % 230/115
    V1=[226 225 225 223 223 223];
    I1=[4.6 5.4 6.3 7.1 8.0 8.7];
    V2=[109 108 108 107 106 105];
    I2=[8.7 10.4 12.2 13.9 15.7 17.39];
    P1=[1000 1180 1400 1568 1768 1940];
    P2=[948.3 1123.2 1317.6 1487.3 1664.2 1826];
    V2=V2.*prenos;
```

```

I2=I2./prenos;
Rpot=V2./I2;

%% Proracun estimiranih vrijednosti

M=length(V2); % Broj mjerenja

I1est=zeros(1,M);
V2est=zeros(1,M);
I2est=zeros(1,M);
P1est=zeros(1,M);
P2est=zeros(1,M);

for(i=1:M)

    z1=R2+Rpot(i)+ sqrt(-1)*X2;
    z2=Rm*novi*Xm/(Rm+ sqrt(-1)*Xm);
    z3=z1*z2/(z1+z2);
    z4=R1+novi*X1+z3;

    I1est(i)=V1(i)/abs(z4);
    I2est(i)=abs((z2/(z1+z2))*V1(i)/(z4));
    V2est(i)=Rpot(i)*I2est(i);

end

%% Izracunavanje greske

for(i=1:M)

    Gr(i) = (I1est(i)/I1(i)-1)^2 +...
            (V2est(i)/V2(i)-1)^2 +...
            (I2est(i)/I2(i)-1)^2;

end

greska = sum(Gr);

f=abs(greska); % fitness function

```

Iz koda vidimo da je ulazni argument kriterijumske funkcije upravo vektor koji odgovara jednom setu parametara. Iteriranjem, dobijamo niz vrijednosti ove funkcije. Tačka kojoj odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije, najbliža je stvarnom rješenju. U memoriji se pamti vrijednost koja odgovara globalnom optimumu, kao i vrijednost kriterijumske funkcije koja toj tački odgovara. Nakon toga, postupak se ponavlja zadati broj puta, pri čemu se svaki put pamti optimalna vrijednost parametara dobijenih u toj iteraciji petlje.

Po izlasku iz glavne petlje, potrebno je analizirati podatke dobijene u pojedinim iteracijama, odnosno izdvojiti najbolji rezultat. Od niza memorisanih tačaka, izdvaja se ona kojoj odgovara najmanja vrijednost greške.

3.2.4. Lokalna Pretraga

U cilju poboljšanja dobijenog rezultata, granice zadate pri globalnoj pretrazi, mijenjaju se novim granicama, fokusirajući se na dio prostora oko dobijenog globalnog optimuma. Nove granice uzimamo dobijamo tako što na vrijednosti dobijenih parametara uvećamo, odnosno umanjimo za određeni iznos.

M-code – Definisanje granica Lokalne Pretrage

```
% Definisanje novih granica (Dobijeno +/- 10%)  
for(i=1:6)  
    L(i)=gbest(i)-0.010*gbest(i);  
    U(i)=gbest(i)+0.010*gbest(i);  
end
```

U ovom slučaju, naznačeno je pomjeranje granica +/- 10% od dobijene vrijednosti. Na taj način se, ponavljanjem istog postupka kao u slučaju globalne pretrage, ali ovaj put sa suženim granicama, dodatno približavamo tačnom rješenju.

4. Određivanje parametara TR

Ovo poglavlje je podijeljeno u dvije podsekcije. Prvom podsekcijom je obuhvaćen primijena COA algoritma na problem estimacije parametara zamjenske šeme, uz upotrebu podataka sa natpisne pločice transformatora. Dobijeni rezultati, upoređeni su sa rezultatima ostvarenim primijenom PSO, GA, ICA i GSA algoritama. Upotreba COA algoritma u estimaciji parametara transformatora, na bazi podataka koji odgovaraju nominalnom pogonskom stanju, sadržana je u drugoj podsekciji.

U oba slučaja, podaci o vrijednostima odgovarajućih struja i napona, kao i vrijednosti proračunatih parametara zamjenske šeme, preuzeti su iz [9–11].

4.1. Primjena COA u estimaciji parametara TR bazirana na upotrebi podataka sa natpisne pločice

U cilju primijene COA algoritma u estimaciji parametara transformatora, uz upotrebu podataka sa natpisne pločice, u razmatranje je uzet monofazni dvonamotajni transformator, nominalne prividne snage $S_n=15\text{kVA}$ i prenosnog odnosa $2400/240\text{ V/V}$. Pri punom opterećenju, izmjerene vrijednosti struje primarnog i sekundarnog strujnog kruga, kao i napona na sekundarnom namotaju su sljedeće: $I_1 = 6.2\text{A}$, $I_2' = 6.2\text{A}$, $U_2' = 2383.8\text{V}$ [9,10].

Problem pronalaženja optimalnih vrijednosti parametara zamjenske šeme transformatora, svodi se na problem minimizacije vrijednosti kriterijumske funkcije J – koja uvažava izmjerene i estimirane vrijednosti električnih veličina uzetih u obzir [9,10]:

$$J = (I_1 - I_{1est})^2 + (U_2' - U_{2est}')^2 + (I_2' - I_{2est}')^2 . \quad (4.1)$$

Vrijednosti parametara zamjenske šeme transformatora, dobijene klasičnim putem – izvođenjem oglada praznog hoda i kratkog spoja, kao i vrijednosti dobijene primijenom GA [9], PSO [9], ICA [10], GSA [10] i COA metoda, sadržane su u Tabeli IV.1. Dok su izmjerene i estimirane vrijednosti odgovarajućih napona i struja, pri punom opterećenju, prikazane su u Tabeli IV.2.

Tabela IV.1 – Parametri 15kVA transformatora [9,10]

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
PH i KS*	2.4500	3.1400	2.0000	2.2294	105000	9106
PSO [9]	2.2500	4.0820	2.2000	1.8526	99517	9009
GA [9]	2.7600	3.4140	1.6800	1.8460	97001	8951
ICA [10]	2.0000	3.0000	1.8000	2.0000	120000	9200
GSA [10]	2.0000	3.1100	1.8100	2.2600	104281	9094.87
COA	1.9854	2.6117	1.4851	1.5203	131010	10074

* Vrijednosti dobijene primjenom oglada PH i KS [9,10]

Tabela IV.2 – Izmjerene i estimirane vrijednosti električnih veličina

	I_1 [A]	I_2' [A]	V_2' [V]
Mjerenje	6.2	6.2	2383.8
PSO*	6.1979	6.1671	2371.1
Greška** PSO	0.0021	0.0329	12.7
GA*	6.1993	6.1678	2371.4
Greška GA	0.0007	0.0322	12.4
ICA*	6.2051	6.1784	2375.5
Greška ICA	0.0051	0.0216	8.3
GSA*	6.2081	6.1781	2375.3
Greška GSA	0.0081	0.0219	8.5
COA*	6.2079	6.1843	2377.7
Greška COA	0.0079	0.0157	6.1

* Vrijednosti su proračunate upotrebom parametara izloženih u Tabeli IV.1.

** Greška je proračunata kao apsolutna vrijednost razlike između izmjerene i estimirane vrijednosti.

Iz rezultata prikazanih u Tabeli IV.2, očigledno je da je srednja greška pri punom opterećenju, najmanja kod primijene COA. Time je pokazano da se COA može uspješno primijeniti u estimaciji parametara monofaznog dvonamotajnog transformatora.

4.2. Primjena COA u estimaciji parametara TR bazirana na upotrebi izmjerenih podataka

Kako bi se ispitala mogućnost primijene COA u estimaciji parametara transformatora, upotrebom podataka koji odgovaraju pogonskom stanju, posmatran je transformator nominalne prividne snage 2kVA i prenosnog odnosa 230/115 V/V, čiji su podaci preuzeti iz [11]. Promjenom impedanse potrošača, opterećenje je varirano u intervalu od polovine do nominalne vrijednosti. Podaci o vrijednosti struja, napona i aktivnih snage primarne i sekundarne strane, dati su i Tabeli IV.3.

Tabela IV.3 – Podaci o opterećenju transformatora [11]

Opt [%]	V_1 [V]	V_2 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]
50	226	109	4.6	8.7	1000	948.3
60	225	108	5.4	10.4	1180	1123.2
70	225	108	6.3	12.2	1400	1317.6
80	223	107	7.1	13.9	1568	1487.3
90	223	106	8.0	15.7	1768	1664.2
100	223	105	8.7	17.4	1940	1826

Pri estimaciji parametara zamjenske šeme, upotrijebljena je kriterijumska funkcija (3.3) koja uvažava vrijednosti primarne i sekundarne struje, kao i napona sekundarnog namotaja. Rezultati dobijeni primjenom COA, dati su u Tabeli IV.4, zajedno sa rezultatima dobijenim na osnovu oglada praznog hoda i kratkog spoja, kao i sa rezultatima BFA estimacije [11].

Tabela IV.4 – Rezultati BFA i COA estimacije

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
PHKS [11]	0.4280	0.2100	0.5080	0.0300	1437.5	294.800
BFA [11]	0.4280	0.4300	0.4930	0.0240	1437.5	294.226
COA	0.5048	0.6048	0.7070	0.0105	2012.6	287.179

U Tabeli IV.5, prikazane su vrijednosti greške, za svaki od tri predstavljena postupka. Greška je jednaka apsolutnoj vrijednosti razlike između estimirane i izmjerene vrijednosti, za svaku od električnih veličina pojedinačno.

Tabela IV.5 – Mjerene i estimirane vrijednostiza monofazni transformator

Opt [%]		V_1 [V]	V_2 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]
50	Mjerenje	226	109	4.6	8.7	1000	948.3
	BFA [11]	226	110.8	4.64	8.84	1032.9	979.1
	COA	226	110.06	4.57	8.78	1015.9	966.8
	Greška BFA		1.8	0.04	0.14	32.9	30.8
	Greška COA**		1.06	0.03	0.08	15.9	18.5
60	Mjerenje	225	108	5.4	10.4	1180	1123.2
	BFA [11]	225	109.9	5.49	10.58	1223.4	1162.1
	COA	225	109.04	5.4162	10.50	1203.8	1144.7
	Greška BFA		1.9	0.09	0.15	42.4	38.9
	Greška COA**		1.04	0.0162	0.1	23.8	21.5
70	Mjerenje	225	108	6.3	12.2	1400	1317.6
	BFA [11]	225	109.4	6.38	12.36	1423.8	1352.9
	COA	225	108.51	6.2866	12.25	1401.0	1329.5
	Greška BFA		1.4	0.08	0.16	23.8	35.3
	Greška COA**		0.51	0.0144	0.05	1.0	11.9

80	Mjerenje	223	107	7.1	13.9	1568	1487.3
	BFA [11]	223	108.1	7.21	14.04	1597.1	1516.5
	COA	223	107.01	7.1009	13.90	1571.1	1486.7
	Greška BFA		1.1	0.11	1.04	29.1	29.2
	Greška COA**		0.01	0.0009	0	3.1	0.6
90	Mjerenje	223	106	8	15.7	1768	1664.2
	BFA [11]	223	107.6	8.15	15.94	1808.8	1714.8
	COA	223	106.44	8.0278	15.76	1778.3	1676.8
	Greška BFA		1.6	0.15	0.24	40.8	50.6
	Greška COA**		0.44	0.0278	0.06	10.3	12.6
100	Mjerenje	223	105	8.7	17.39	1940	1826
	BFA [11]	223	107.2	9.06	17.75	2010.7	1902.3
	COA	223	105.90	8.9106	17.53	1975.5	1855.5
	Greška BFA		2.2	0.36	0.36	70.7	76.3
	Greška COA**		0.9	0.2106	0.14	35.5	29.5

** Greška je proračunata kao apsolutna vrijednost razlike između izmjerene i estimirane vrijednosti.

Na osnovu vrijednosti proračunatih grešaka, za slučaj svih posmatranih električnih veličina, jasno je da bolje rezultate daje primjena COA algoritma, u odnosu na BFA algoritam prezentovan u [11]. U tom smislu, može se reći COA ispoljava jasnu superiornost nad pomenutim BFA algoritmom. Međutim, imajući u vidu da rezultati mjerenja u ovom slučaju nijesu prezentovani na adekvatan način (naponima odgovaraju cjelobrojne vrijednosti, dok su struje izmjerene sa tačnošću jedne decimale) vrijednosti greške su i dalje dosta velike, što ne umanjuje izvedene zaključke oko primjene COA.

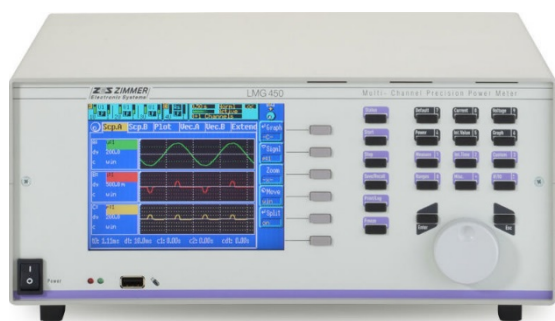
5. Eksperimentalni rezultati

Ovo poglavlje je posvećeno analizi primjene predloženog metoda estimacije parametara transformatora, uz upotrebu podataka dobijenih eksperimentalnim putem. U Laboratoriji za električne mašine i pogone, Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, izvedeni su eksperimenti praznog hoda i kratkog spoja transformatora, kako bi se parametri konkretnog transformatora odredili klasičnim postupkom. Osim toga, za potrebe testiranja predloženog metoda estimacije, izvršen je ogled opterećivanja transformatora.

5.1. Opis eksperimentalne postavke

Monofazni dvonamotajni transformator (KONČAR, 2 kVA, 220/110 V/V, 50 Hz), kao predmet ispitivanja, centralni je dio eksperimentalne postavke. Veza primarnog namotaja transformatora sa 0.4kV mrežom ostvarena je preko trofaznog regulacionog transformatora. Postavka je takva, da je napon primara na transformatoru 2kVA, ustvari međufazni napon sekundarne strane regulacionog transformatora. Položaj regulacionog odcjeka je tako podešen, da je na primar monofaznog transformatora doveden njegov nominalni napon. U sekundarnom krugu transformatora, nalazi se potrošač varijabilne otpornosti (maksimalna otpornost – 1000Ω i maksimalna struja – 25A). Pri maksimalnoj vrijednosti otpora potrošača, opterećenje transformatora je najmanje, a smanjenjem ove otpornosti, opterećenje se povećava.

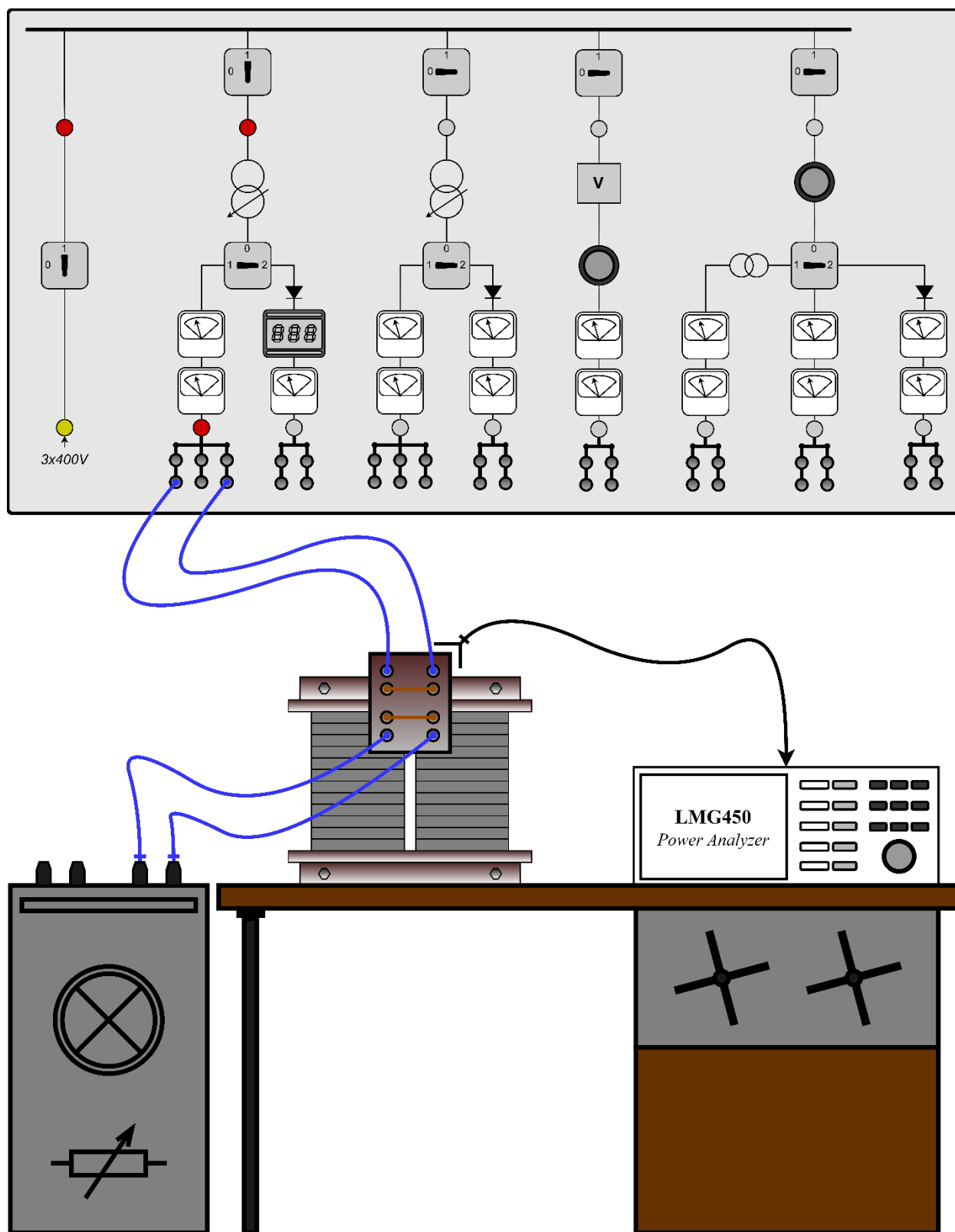
Sve potrebne električne veličine (struje, naponi i snage) izmjerene su pomoću 4-kanalnog analizatora (ZES–ZIMMER-ov *Power Analyzer LMG450*), klase tačnosti 0,1%. Analizator je prikazan na Sl. 5.1 i 5.2, dok je pregled kompletne eksperimentalne postavke dat na Sl. 5.3.



Slika 5.1 – Power Analyzer LMG450



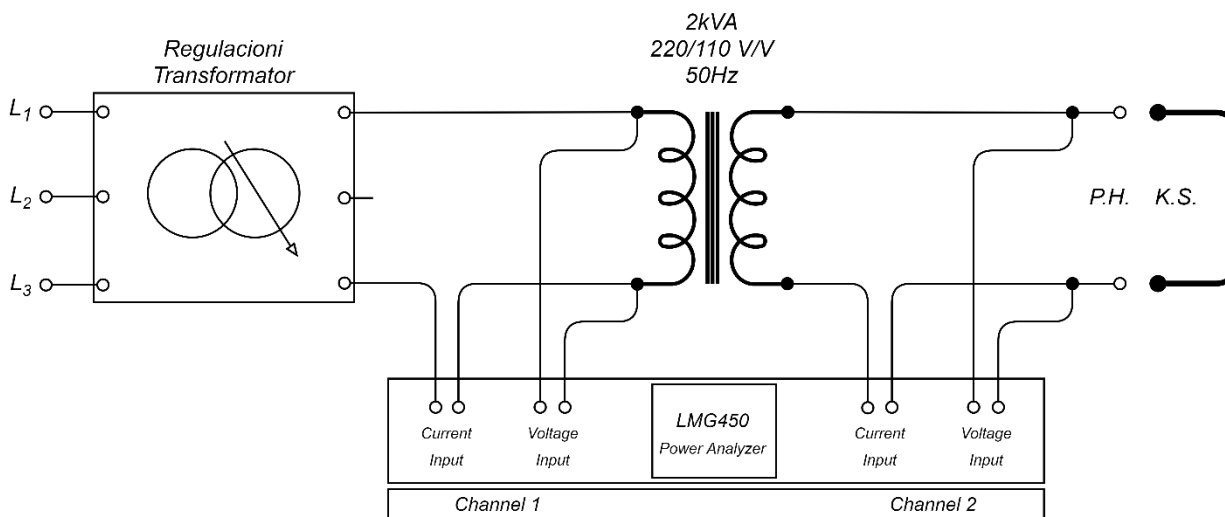
Slika 5.2 – Power Analyzer LMG450



Slika 5.3 – Eksperimentalna postavka

5.2. Određivanje parametara TR primjenom klasične metode

U cilju određivanja parametara ekvivalentne šeme transformatora, u laboratoriji su sprovedeni ogledi praznog hoda i kratkog spoja. Aparatura je postavljena prema šemi prikazanoj na slici 5.4.



Slika 5.4 – Električna šema eksperimentalne postavke za potrebe ogleda praznog hoda i kratkog spoja

Na ulaz trofaznog regulacionog transformatora se dovodi sistem linijskih napona $3 \times 400V$. Podešavanjem položaja regulacionog odcjeka, napon na primaru monofaznog dvonamotajnog transformatora se postavi na nominalnu vrijednost, radi potreba ogleda praznog hoda. Pošto je sekundar neopterećen, izmjerena je vrijednost struje koja teče primarnim namotajem, kao i vrijednost aktivne snage, koja odgovara vrijednosti gubitaka u gvožđu.

Za potrebe ogleda kratkog spoja, transformator je odvojen od mreže, nakon čega je njegov sekundarni namotaj kratko spojen. Po ponovnom priključenju, napon na primaru je postepeno povećavan, regulisanjem položaja regulacionog odcjeka, sve dok kroz namotaje nije protekla struja nominalne vrijednosti. Izmjerena vrijednost napona primarne strane, odgovara naponu kratkog spoja, a vrijednost aktivne snage, odgovara vrijednosti gubitaka u bakru.

Tabela IV.1 – Rezultati mjerenja u ogledima P.H. i K.S.

	U [V]	I [A]	$\cos\varphi$	P [W]	Q [VAr]
Ogled P.H.	220	0.937	0.09	18.7	205.4
Ogled K.S.	12.93	9.16	0.85	100.1	63.6

Rezultati sprovedenih mjerenja, dati su u Tabeli V.1, dok su parametri zamjenske šeme, proračunati u skladu sa matematičkim relacija izloženim u Poglavlju 2, dati u Tabeli V.2.

Tabela V.2 – Parametri ekvivalentne šeme

R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
0.5965	0.3772	0.5965	0.3772	2588.2	235.7640

5.3. Određivanje parametara TR primjenom COA, uz upotrebu podataka koji odgovaraju punom opterećenju

U [9,10] opisan je metod estimacije parametara transformatora, koji zahtjeva poznavanje vrijednosti odgovarajućih električnih veličina sa natpisne pločice, odnosno podataka koji odgovaraju nominalno opterećenom transformatoru. Naime, na osnovu podataka dostupnih na natpisnoj pločici transformatora (nominalna prividna snaga i prenosni odnos), izračunata je vrijednost impedanse potrošača, koja će svojim priključenjem na izvode sekundara, izazvati protok nominalne struje kroz namotaje. Aktivna otpornost koja odgovara opisanoj situaciji, jednaka je količniku kvadrata sekundarnog napona i nominalne prividne snage, i iznosi približno 6Ω . Nakon priključenja potrošača, na primar je doveden nominalni napon i izmjerene su vrijednosti struje, napona i aktivne snage, i u primarnom i u sekundarnom krugu. Izmjerene vrijednosti primarne i sekundarne struje su 8.95A, odnosno 17.55A, dok je napon na sekundaru iznosio 105.5V. Rezultati estimacije parametara zamjenske šeme monofaznog transformatora, dobijeni primjenom opisanog metoda i uz upotrebu kriterijumske funkcije (3.3), prikazani su u Tabeli V.3, zajedno sa rezultatima dobijenih klasičnim eksperimentalnim procedurama.

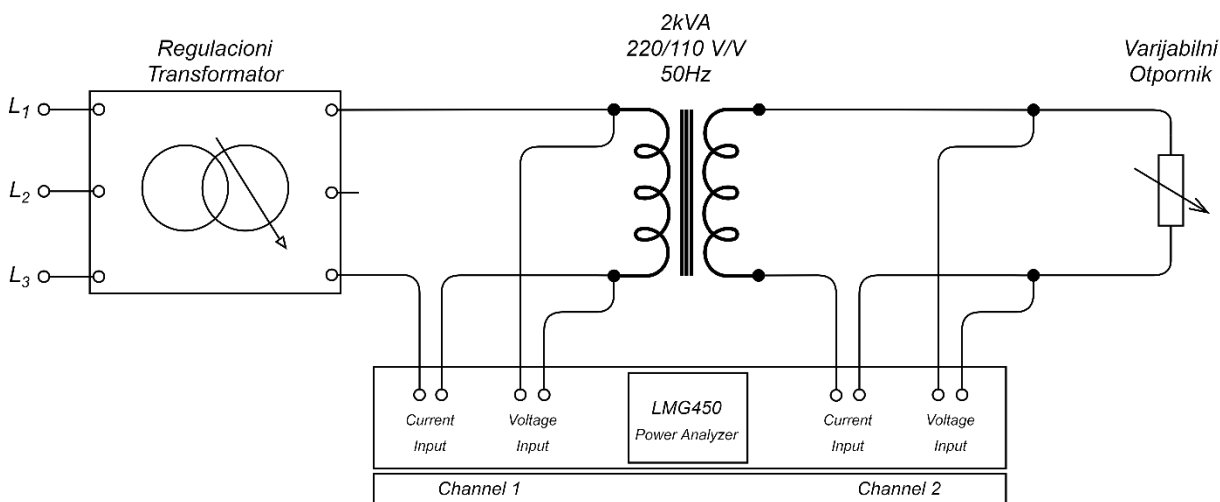
Tabela V.3 – Parametri ekvivalentne šeme

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
Standard test	0.5965	0.3772	0.5965	0.3772	2588.2	235.7640
Metod [9,10] + COA	0.4519	0.1137	0.5528	0.2001	2129.6	200.5981

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da postoje određene odstupanja između vrijednosti estimiranih parametara. To se posebno vidi kod vrijednosti reaktansi, što se može tumačiti kao posljedica primjene metoda opisanog u [9,10] koji uzima u obzir samo puno opterećenje mašine, za razliku od klasičnog metoda, kod kojeg su u obzir uzeti i režim kratkog spoja, a i potpuno neopterećene mašine, ali koji usvajaju određena zanemarivanja pri proračunu parametara.

5.4. Određivanje parametara TR primjenom COA, uz upotrebu podataka koji odgovaraju različitim opterećenjima

Da bi se odredili parametri zamjenske šeme transformatora, primjenom COA i uz upotrebu podataka koji odgovaraju širem dijapazonu opterećenja, sprovedena su mjerenja pri različitim vrijednostima impedanse potrošača. Variranjem otpornosti potrošača, izmjerene su odgovarajuće vrijednosti struja, napona i aktivnih snaga u primarnom i sekundarnom strujnom krugu. Električna šema laboratorijske postavke, prikazana je na Sl. 5.5, dok su izmjerene vrijednosti pomenutih električnih veličina date u Tabeli V.4, zajedno sa vrijednostima otpornosti potrošača, priključenog na izvode sekundarnog namotaja. U Tabeli V.5, prikazane su vrijednosti parametara određene klasičnim eksperimentalnim metodama, kao i vrijednosti estimirane primjenom COA, uz upotrebu različitih kriterijumskih funkcija.



Slika 5.5 – Električna šema eksperimentalne postavke za potrebe simuliranja pogonskog stanja

Tabela V.4 – Rezultati mjerenja u ogledu opterećivanja transformatora

$R_{pot} [\Omega]$	$V_1 [V]$	$V_2 [V]$	$I_1 [A]$	$I_2 [A]$	$P_1 [W]$	$P_2 [W]$
69.3745	220.23	110.25	1.2821	1.5892	195.66	175.18
49.4604	220.09	109.99	1.5184	2.2238	265.86	244.58
38.7239	220.30	109.91	1.7755	2.8383	334.17	311.95
25.2195	220.25	109.44	2.4527	4.3395	500.91	474.88
19.3928	219.95	108.90	3.0538	5.6155	640.90	611.50
12.5873	220.19	108.12	4.5120	8.5896	972.10	928.70
9.9740	219.95	107.33	5.5840	10.761	1210.4	1155.0
8.2979	220.53	106.96	6.6490	12.890	1450.1	1378.6

Pri estimaciji parametara, u obzir su uzete kriterijumske funkcije različitog oblika. Naime, kriterijumska funkcija J_1 – poklapa se sa kriterijumskom funkcijom (3.3) priloženoj u poglavlju 3.2.3. Dakle, funkcija J_1 u obzir uzima estimirane i izmjerene vrijednosti struje primara i napona i struje sekundara. U drugoj kriterijumskoj funkciji, figurišu samo vrijednosti primarne i sekundarne struje i funkcija je oblika:

$$J_2 = \sum_{k=1}^N \left(\left(\frac{I_{1est}^{(k)}}{I_1^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{I_{2est}^{(k)}}{I_2^{(k)}} - 1 \right)^2 \right). \quad (5.1)$$

Kako bismo, pri estimaciji, u obzir uzeli i vrijednost aktivne snaga sa strane primarnog i sekundarnog namotaja, kriterijumske funkcija je proširena tako da njena vrijednost zavisi i od ulazne i od izlazne aktivne snage. Prema tome, funkcija je oblika:

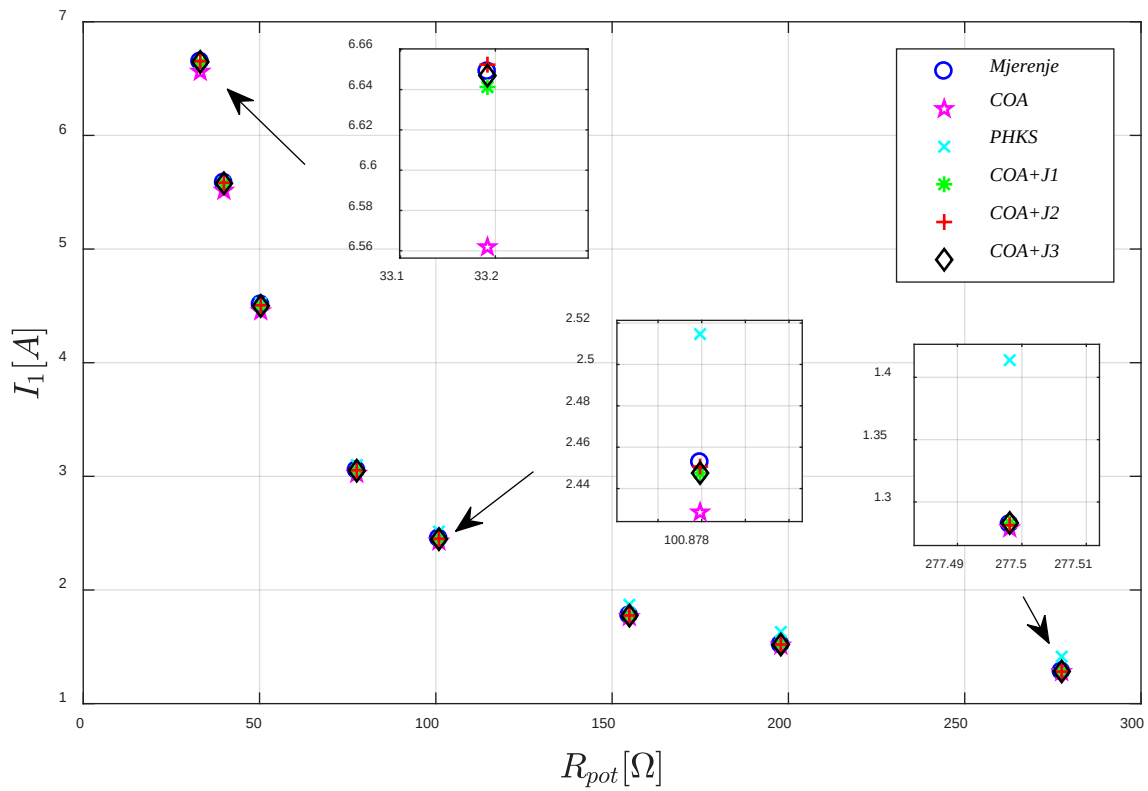
$$J_3 = \sum_{k=1}^N \left(\left(\frac{I_{1est}^{(k)}}{I_1^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{U_{2est}^{(k)}}{U_2^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{I_{2est}^{(k)}}{I_2^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{P_{1est}^{(k)}}{P_1^{(k)}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{P_{2est}^{(k)}}{P_2^{(k)}} - 1 \right)^2 \right). \quad (5.2)$$

Estimirane vrijednosti parametara zamjenske šeme, dobijene primjenom COA, uz upotrebu prethodno navedenih kriterijumskih funkcija, prikazani su u Tabeli V.5, zajedno sa rezultatima dobijenih izvođenjem oglada praznog hoda i kratkog spoja, kao i sa rezultatima dobijenih pomoću metoda predloženog u [9,10].

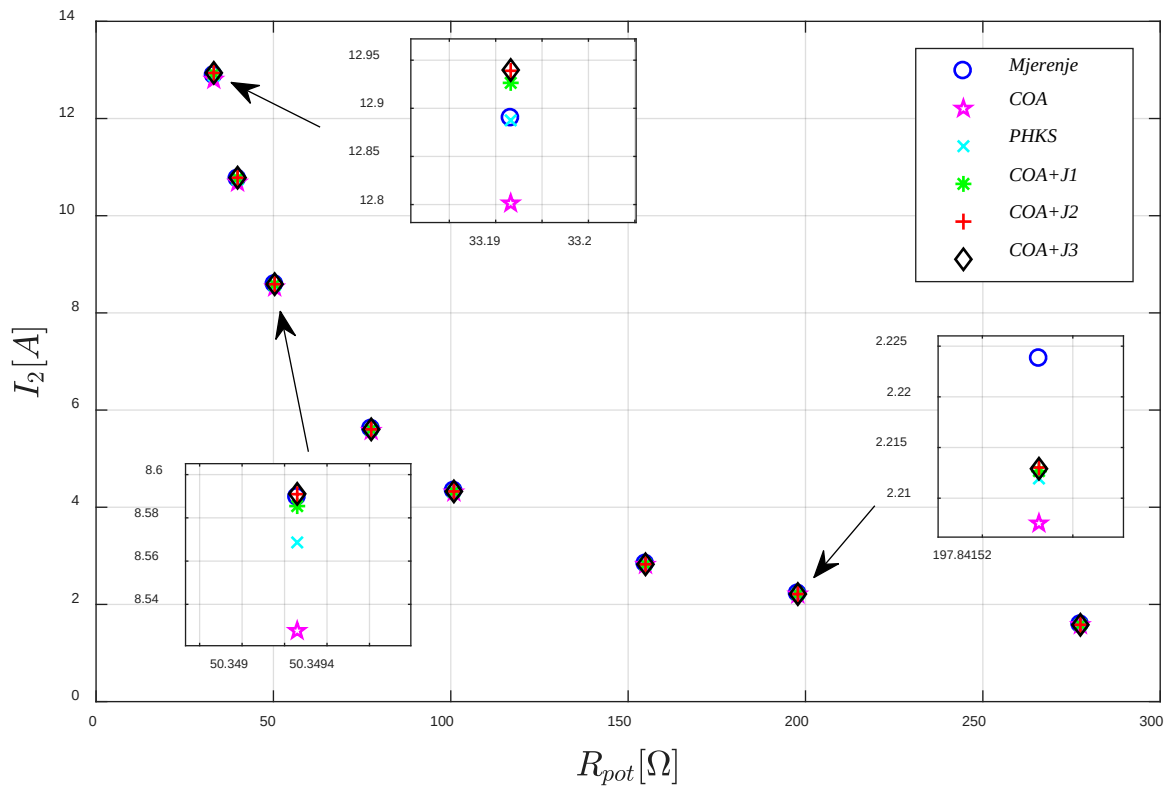
Tabela V.5 – Rezultati estimacije COA uz upotrebu različite kriterijumske funkcije

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
PHKS	0.5965	0.3772	0.5965	0.3772	2588.2	235.7640
Metod [9,10] + COA	0.4519	0.1137	0.5528	0.2001	2129.6	200.5981
Load data + COA + J_1	0.4414	0.1984	0.4459	0.5039	2132.3	238.8488
Load data + COA + J_2	0.4275	0.2010	0.4264	0.5039	2011.3	241.0986
Load data + COA + J_3	0.4321	0.2204	0.4169	0.4928	2149.8	238.6202

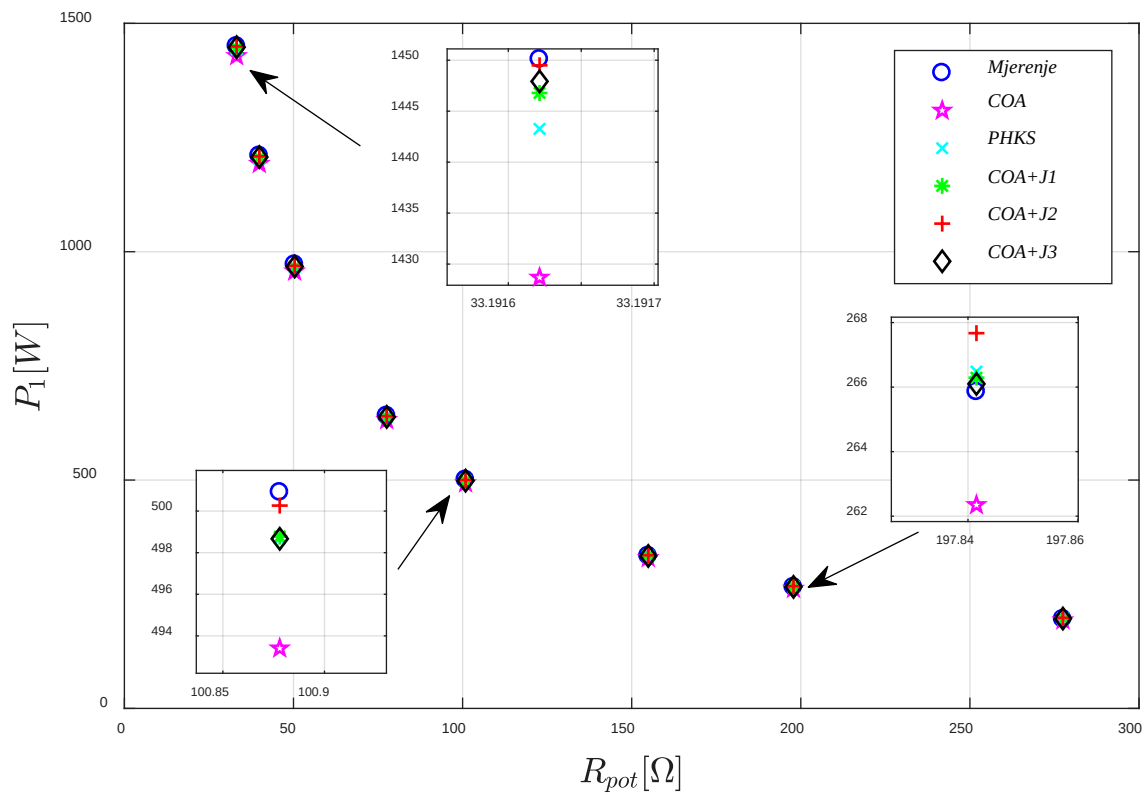
Na Slikama 5.6, 5.7, 5.8 i 5.9, prikazane su, redom, vrijednosti struje primarnog i sekundarnog kruga, a zatim i ulazne i izlazne aktivne snage. Uz mjerene vrijednosti, na graficima su sadržane i vrijednosti dobijene metodom opisanom u poglavlju 5.3, kao i vrijednosti COA estimacije koja koristi čitav set različitih vrijednosti opterećenja, i uz upotrebu navedenih kriterijumskih funkcija.



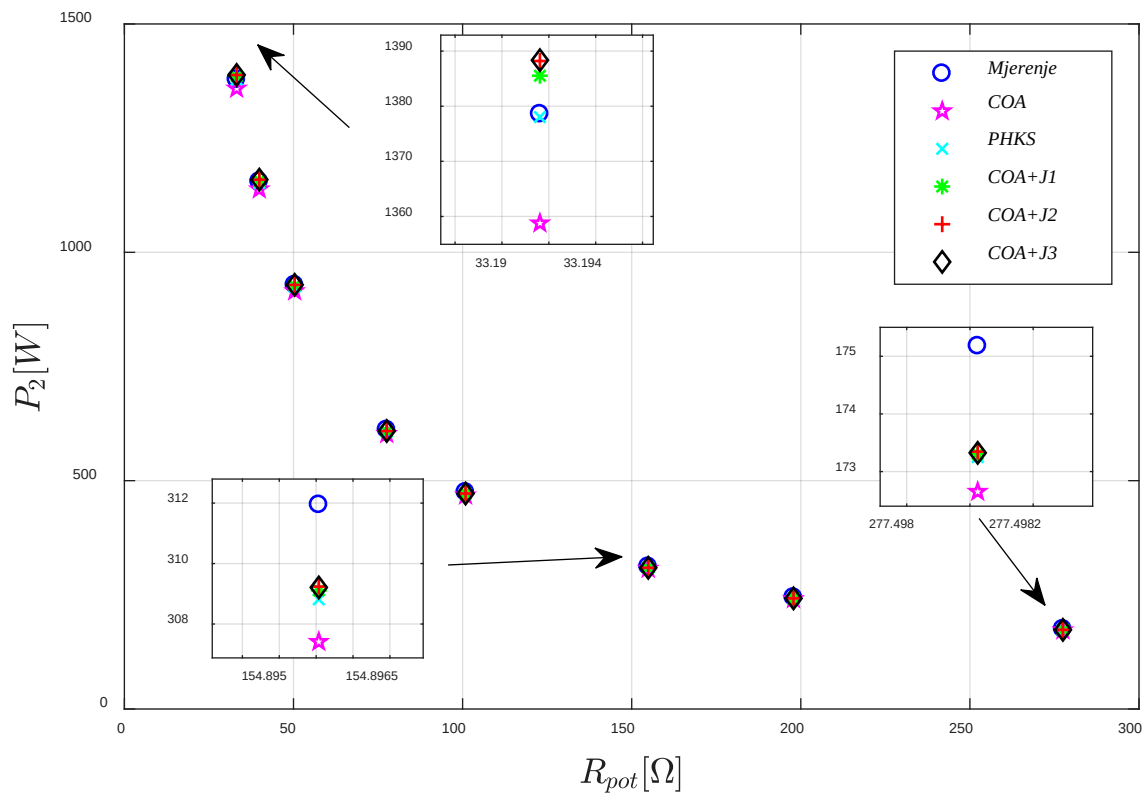
Slika 5.6 – Struja primara u funkciji otpornosti potrošača



Slika 5.7 – Struja sekundara u funkciji otpornosti potrošača



Slika 5.8 – Ulazna aktivna snaga u funkciji otpornosti potrošača



Slika 5.9 – Izlazna aktivna snaga u funkciji otpornosti potrošača

Uz metod opisan u [9,10], koji se bazira na estimaciji parametara upotrebom podataka koji odgovaraju nominalnom opterećenju, upotrijebljena je prva kriterijumska funkcija. Dakle, za potrebe estimacije su posmatrane vrijednosti struja obje strane i vrijednost sekundarnog napona. Pošto ove vrijednosti odgovaraju nominalno opterećenom transformatoru, nije iznenađujuće što u tačkama koje odgovaraju niskim vrijednostima opterećenja, imamo najveća odstupanja izmjerenih i estimiranih vrijednosti struja i napona. Iz tog razloga, očigledna je prednost metoda koje za estimaciju koriste veći broj tačaka i time pokrivaju veći opseg opterećenja. Primjena druge kriterijumske funkcije, takođe daje dobre rezultate, iako u obzir uzima samo vrijednosti struja primarnog i sekundarnog kruga, čime su restrikcije u pogledu snaga i napona sekundarnog namotaja praktično uklonjene. Treća kriterijumska funkcija pokriva sve navedene električne veličine, čime je ostvarena dodatna preciznost u pogledu estimacije ulazne i izlazne aktivne snage.

6. Određivanje parametara TR, uz ograničenja u pogledu raspodjele gubitaka aktivne snage

Analizom rezultata izloženih u prethodnom poglavlju, jasno je da su ostvarena dobra poklapanja estimiranih vrijednosti, sa odgovarajućim izmjerenim vrijednostima. To je slučaj kako kod struja primarnog i sekundarnog kruga, tako i kod ulazne i izlazne aktivne snage. Međutim, male razlike između izmjerene i estimirane vrijednosti snage, ne garantuju potpuno preciznu estimaciju aktivnih otpornosti u zamjenskoj šemi. Naime, gubici aktivne snage mogu se raspodijeliti na gubitke u gvožđu i Džulove gubitke na otpornostima redne grane zamjenske šeme. Samim tim, bez dodatnih ograničenja u tom pogledu, ostavljen je prostor za grešku pri estimaciji ovih parametara.

U ovom poglavlju predložena upotreba kriterijumske funkcije, koja prestavlja modifikaciju funkcije (5.2) u smislu da osim što u obzir uzima i vrijednost ulazne i izlazne aktivne snage, uvodi dodatnu restrikciju u pogledu gubitaka u gvožđu.

Osim toga, u poglavlju će biti opisana i primjena *Chaotic Manta Ray Foraging Optimization* (CMRFO) algoritma koji predstavlja jednu od novih i aktuelnih metaheurističkih metoda, koja, kao i COA, u svojoj osnovi ima funkciju logističkog preslikavanja. Algoritam je na opisanu problematiku estimacije parametara zamjenske šeme, primijenjen, uz upotrebu pomenute modifikovane kriterijumske funkcije, i podatke koji odgovaraju širokom dijapazonu opterećenja.

6.1. Raspodjela gubitaka aktivne snage u transformatoru

Posmatrajući zamjensku šemu (Sl. 2.11) i imajući u vidu da su gubici aktivne snage jednaki razlici ulazne i izlazne vrijednosti, gubitke možemo podijeliti u dvije grupe. Gubici u bakru – Džulovi gubici na otpornosti primarnog i sekundarnog namotaja i gubici u gvožđu – modelovani prisustvom aktivne otpornosti u otočnoj grani, dvije su vrste gubitaka aktivne snage u kolu transformatora. Ono što je karakteristično za gubitke u gvožđu, je činjenica da se mogu smatrati stalnim i konstantnim, bez obzira na stepen opterećenja mašine [34]. Naime, zbog malih vrijednosti aktivne otpornosti namotaja, kao i rasipnih reaktansi, bez obzira na opterećenje, pad napona na ovim elementima kola, može se smatrati zanemarljivim. Samim tim, napon na otočnoj grani zamjenske šeme, može se smatrati konstantnim, a kako se gubici u gvožđu modeluju upravo

aktivnom otpornošću ove grane, to je jasno da se i gubici u gvožđu mogu smatrati stalnim. Vrijednost ovih gubitaka može se odrediti na dva načina:

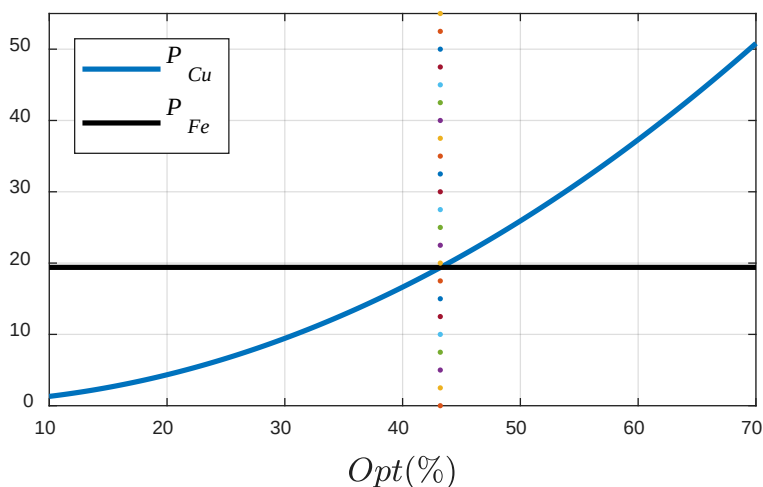
- izvođenjem eksperimenta praznog hoda, ili
- nalaženjem vrijednosti opterećenja pri kojoj se javlja maksimalni stepen iskorišćenja.

Ogled praznog hoda, standardni je postupak koji se izvodi pri ispitivanju transformatora u cilju određivanja vrijednosti parametara otočne grane, kao i određivanja vrijednosti gubitaka aktivne snage u praznom hodu. Imajući u vidu da je vrijednost otpornosti namotaja zanemarljiva u odnosu na otpornost gubitaka u gvožđu, može se smatrati da je izmjerena aktivna snaga u tom eksperimentu, jednaka snazi ovih gubitaka [31,32].

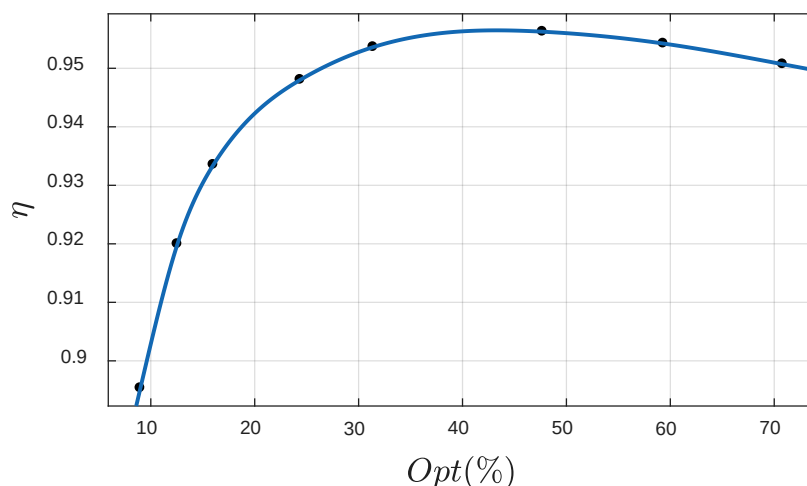
Drugi način se ogleda u činjenici da je stepen iskorišćenja transformatora pri prenosu snage, najveći pri onom opterećenju pri kojem su gubici u gvožđu i bakru jednaki (Sl. 6.1 i 6.2). Naime, η – stepen iskorišćenja, jednak je odnosu izlazne u ulazne aktivne snage:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{gub}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_{Fe} + \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 P_{Cun}}, \quad (6.1)$$

pri čemu je odnos S/S_n – ustvari, relativno opterećenje transformatora. Samim tim, do vrijednosti opterećenja pri kojem je stepen iskorišćenja maksimalan, dolazi se nalaženjem izvoda gore navedene funkcije po relativnom opterećenju i njegovim izjednačavanjem sa nulom [31]. U tom slučaju, gubici u gvožđu su jednaki polovini ukupnih gubitaka koji se pri tom opterećenju javljaju.



Slika 6.1 - Gubici u bakru i gvožđu, pri različitim opterećenjima



Slika 6.2 - Stepen iskorišćenja transformatora, pri različitim opterećenjima

Na graphicima prikazanim na Sl 6.1 i 6.2 odgovaraju upravo vrijednostima izmjerenim na transformatoru čije parametre estimiramo. Vrijednost gubitaka u gvožđu je izmjerena prilikom izvođenja ogleda praznog hoda (Tabela IV.1) i iznosi 18.7W. To je vrijednost koja bi se trebala smatrati približno konstantnom i koja treba predstavljati dodatnu restrikciju pri estimaciji aktivne otpornosti otočne grane. Uvođenje ovog ograničenja za cilj ima precizniju estimaciju otpornosti gubitaka u gvožđu, ali i kvalitetniju podlogu za estimaciju otpornosti namotaja.

6.2. Primjena CMRFO algoritma u estimaciji parametara TR, uz uvažavanje gubitaka u gvožđu

Ova sekcija je posvećena opisu CMRFO algoritma, koji predstavlja hibridnu verziju MRFO (*Manta Ray Foraging Optimization*) [30] algoritma i COA metoda opisanog u trećem poglavlju. U nastavku je predstavljen matematički model MRFO algoritma, nakon čega je objašnjena hibridizacija ovog algoritma i njegovo kombinovanje sa COA algoritmom, baziranog na upotrebi jednačine logističkog preslikavanja (3.1) u cilju formiranja haotičnih sekvenci, odnosno prostora pretrage u našem slučaju. Konačno, u ovoj sekciji je prezentovana i kriterijumska funkcija, koja predstavlja modifikaciju funkcije (5.2) i koja kao takva, uvažava i vrijednost gubitaka u gvožđu, pri estimaciji parametara transformatora.

6.2.1. MRFO Algoritam

MRFO je jedan od novijih metaheurističkih metoda, koji u matematičkom smislu, koristi tri različite strategije u procesu nalaženja optimalnog rješenja nekog problema [30]. Proces je zasnovan na minimizaciji vrijednosti kriterijumske funkcije, što omogućava primjenu algoritma na bilo koji problem koji se može definisati kroz oblik funkcije cilja – u našem slučaju, to je estimacija parametara transformatora.

Nakon formiranja domena kriterijumske funkcije, odnosno prostora pretrage, algoritam ima zadatak da iz prostora pretrage, „pronade“ optimalno rješenje, za koje je vrijednost ove funkcije minimalna. Prva strategija koja MRFO primjenjuje, definisana je matematičkom relacijom:

$$p_i^d(t+1) = \begin{cases} p_i^d(t) + r(p_{best}^d - p_i^d(t)) + \alpha(p_{best}^d - p_i^d(t)), & i = 1 \\ p_i^d(t) + r(p_{i-1}^d - p_i^d(t)) + \alpha(p_{best}^d - p_i^d(t)), & \forall i \in m, i \neq 1 \end{cases} \quad (6.2)$$

gdje je p_i – pozicija i-te tačke, u t-toj iteraciji, a r – nasumični broj između 0 i 1, α – težinski koeficijent („*Weight Coefficient*“), a p_{best} – tačka kojoj u t-toj iteraciji odgovara najmanja vrijednosti kriterijumske funkcije, te se samim tim može smatrati trenutnim globalnim optimumom. Pri tome, za α važi sljedeće:

$$\alpha = 2r\sqrt{|\log(r)|} . \quad (6.3)$$

Drugoj strategiji, takođe odgovara relacija (6.2), sa razlikom što za koeficijent α sada vrijedi relacija:

$$\alpha = 2e^{r_1 \left(\frac{t_{max}-t+1}{t_{max}} \right)} \sin(2\pi r_1) , \quad (6.4)$$

gdje je r_1 – nasumični broj iz intervala $[0,1]$.

Navedene matematičke relacije, u stvari opisuju sposobnost MRFO algoritma da rješenje traži u okolini tačke koja odgovara trenutnom globalnom optimumu. Dakle, koordinate svake tačke u nekom n-dimenzionom prostoru, kroz iterativni proces, mijenjaju se u skladu sa navedenim relacijama, „približavajući“ se tako trenutnom globalnom optimumu.

Međutim, kako prostor koji ne pripada okolini tačke globalnog optimuma, ne bi ostao nepokriven pretragom, uvodi se i relacija:

$$p_i^d(t+1) = \begin{cases} p_{rand}^d + r_1(p_{rand}^d - p_i^d(t)) + \beta(p_{rand}^d - p_i^d(t)), & i = 1 \\ p_{rand}^d + r_1(p_{i-1}^d - p_i^d(t)) + \beta(p_{rand}^d - p_i^d(t)), & \forall i \in m, i \neq 1 \end{cases} \quad (6.5)$$

pri čemu je p_{rand}^d – nasumična pozicija u prostoru pretrage:

$$p_{rand}^d = r(b^H - b^L) + b^L, \quad (6.6)$$

gdje su b^H i b^L – gornja, odnosno donja granica vrijednosti odgovarajućih parametara.

Konačno, treća strategija pretrage omogućava „kretanje“ i-te tačke u okviru prostora ograničenog trenutnom pozicijom i-te tačke, i njoj simetrične tačke, u odnosu na poziciju trenutnog globalnog optimuma. Matematički izraz koji opisuje ovu strategiju je:

$$p_i^d(t+1) = p_i^d(t) + 2(r_2 p_{best}^d - r_3 p_i^d(t)), \quad \forall i \in m, i \neq 1 \quad (6.7)$$

gdje su r_2 i r_3 – različiti nasumični brojevi u intervalu od 0 do 1.

Sa prethodno navedenim, ukratko je opisan matematički model algoritma, dok je porijeklo, sama ideja, ali i prateći matematički model, u više detalja opisan u [30]. Osim toga, u [30] je prezentovan i pseudo kod algoritma, uz detaljna objašnjenja pojedinačnih koraka.

6.2.2. CMRFO Algoritam

Hibridizacijom MRFO optimizacije i metode formiranja haotičnih sekvenci na način opisan u trećem poglavlju, nastao je CMRFO algoritam. Dakle, standardni MRFO je iskombinovan sa jednačinom logističkog preslikavanja (3.1), čime je faktor nasumičnosti izuzet iz procesa pretrage. Konkretno, u našem slučaju, nasumični broj r iz (6.6), zamjenjen je članom iz haotične sekvence, koja odgovara jednačini (3.1). Razlog tome su bolja statistička i dinamička svojstva i prednosti koje haotične sekvence imaju u odnosu na standardne nizove nasumičnih brojeva [29].

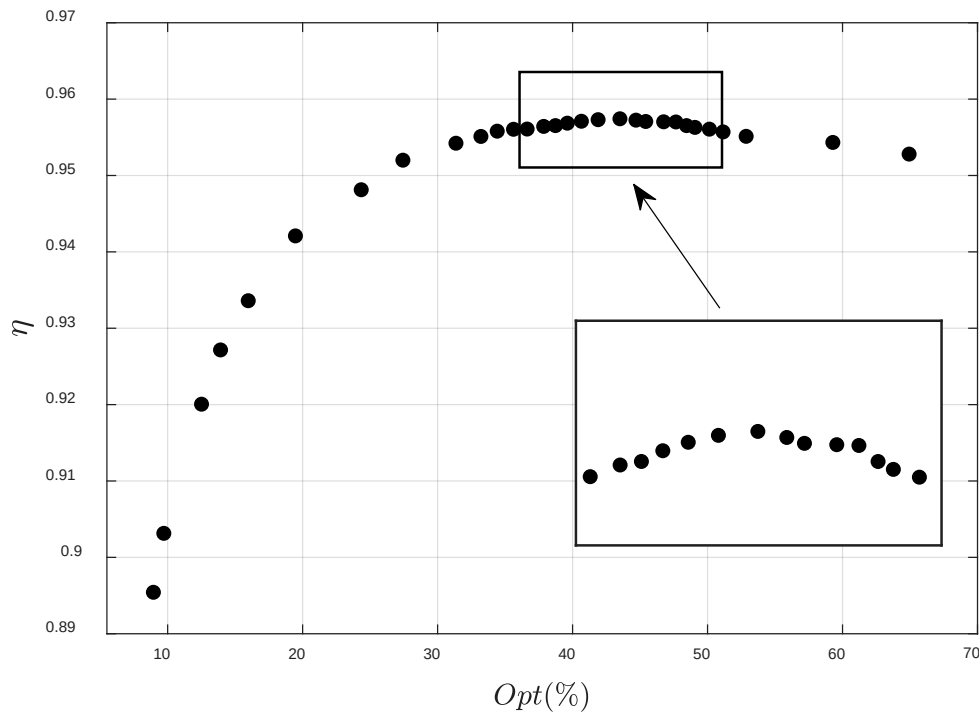
Hibridni algoritam CMRFO je primijenjen u estimaciji parametara transformatora, uz upotrebu kriterijumske funkcije (5.2) sa dodatnom modifikacijom koja se ogleda u ograničenjima u pogledu vrijednosti gubitaka u gvožđu. Naime, kako je konstatovano da se ovi gubici mogu smatrati stalnim, to se u procesu estimacije, pri procjeni vrijednosti kriterijumske funkcije, u obzir uzimaju samo one tačke koje ne pokazuju prevelika odstupanja u ovom segmentu. Dakle, ukoliko važi:

$$P_{0_mjereno} - \Delta P \leq P_{0_estimirano} \leq P_{0_mjereno} + \Delta P \quad (6.8)$$

onda kriterijumskoj funkciji odgovara vrijedost dobijena u skladu sa (5.2), dok joj se, u slučaju da (6.8) ne važi, pripisuje beskonačna vrijednost. Samim tim, tačka sa parametrima koji ne zadovoljavaju (6.8) ne može postati tačka globalnog optimuma i eliminiše se iz daljeg razmatranja.

6.3. Poređenje rezultata

U cilju testiranja primjene predloženog metoda, izvršena su dodatna mjerenja u okviru iste laboratorijske postavke kojoj odgovara električna šema prikazana na slici 5.5. Dakle, sa potrošačem čisto aktivnog karaktera, izvršena su dodatna mjerenja u koracima od 0.2A, u zoni u kojoj se može očekivati maksimalna vrijednost stepena iskorišćenja (Slika 6.3).



Slika 6.3 - Stepen iskorišćenja transformatora
u zoni maksimalne vrijednosti

Kao što se može vidjeti na Sl. 6.3, maksimalan stepen iskorišćenja se javlja približno pri 43% vrijednosti opterećenja i snazi gubitaka u iznosu od 37.8W. Imajući u vidu da su pri opterećenju pri kojem se javlja maksimalan stepen iskorišćenja, gubici u bakru i gubici u gvožđu jednaki,

dolazimo do zaključka da je vrijednost gubitaka u gvožđu jednaka 18.9W. Ova vrijednost je u skladu sa iznosom dobijenim izvođenjem ogleda praznog hoda transformatora (Tabela IV.1).

Pošto je metod, predložen u prethodnom poglavlju, implementiran uz upotrebu kriterijumske funkcije koja je u skladu sa uslovom (6.8), za potrebe testiranja njegove primjene, izmjerene su vrijednosti struja i snaga primarnog i sekundarnog kruga, kao i vrijednost sekundarnog napona. Rezultati sprovedenih mjerenja, prikazani su u Tabeli VI.1.

Tabela VI.1 – Rezultati mjerenja u ogledu opterećivanja transformatora

R_{pot} [Ω]	V_1 [V]	V_2 [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	P_1 [kW]	P_2 [kW]
18.1333	220.2300	108.8000	3.2100	6.0000	0.6780	0.6375
17.5403	220.1500	108.7500	3.3300	6.2000	0.7021	0.6610
16.9844	220.0900	108.7000	3.4200	6.4000	0.7265	0.6845
16.4621	220.0000	108.6500	3.5300	6.6000	0.7470	0.7041
15.9706	220.3000	108.6000	3.6500	6.8000	0.7717	0.7280
15.0694	220.2300	108.5000	3.8200	7.2000	0.8070	0.7621
14.6554	220.1500	108.4500	3.9400	7.4000	0.8280	0.7823
14.2632	220.0900	108.4000	4.0400	7.6000	0.8530	0.8063
13.8910	220.0000	108.3500	4.1400	7.8000	0.8860	0.8380
13.5375	220.3000	108.3000	4.2000	8.0000	0.9101	0.8610
13.2012	220.2300	108.2500	4.3200	8.2000	0.9250	0.8750
12.8810	220.1500	108.2000	4.4100	8.4000	0.9520	0.9010
12.2841	220.0900	108.1000	4.6200	8.8000	0.9870	0.9340
12.0056	220.0000	108.0500	4.7300	9.0000	1.0000	0.9462
11.7391	220.3000	108.0000	4.8000	9.2000	1.0220	0.9670
11.4840	220.1000	107.9500	4.9200	9.4000	1.0430	0.9867
69.3745	220.0200	110.2500	1.2821	1.5892	0.1957	0.1652
62.8212	220.1500	110.0000	1.3500	1.7510	0.2106	0.1802
49.4604	220.0900	109.9900	1.5184	2.2238	0.2659	0.2346
43.4585	220.0000	109.9500	1.6400	2.5300	0.2934	0.2620
38.7239	220.3000	109.9100	1.7755	2.8383	0.3342	0.3020
30.6425	220.2750	109.7000	2.0600	3.5800	0.4034	0.3700
25.2195	220.2500	109.4400	2.4527	4.3395	0.5009	0.4649
21.7331	220.0000	109.1000	2.7700	5.0200	0.5620	0.5250
19.3928	219.9500	108.9000	3.0538	5.6155	0.6409	0.6015
15.5000	220.0400	108.5000	3.7500	7.0000	0.7894	0.7450
12.5873	220.1900	108.1200	4.5120	8.5896	0.9711	0.9187
11.1062	220.0100	107.7300	5.0500	9.7000	1.0785	1.0200
9.9740	219.9500	107.3300	5.5840	10.7610	1.2104	1.1450
9.0728	220.2600	107.1500	6.1100	11.8100	1.3279	1.2550
8.2979	220.5300	106.9600	6.6490	12.8900	1.4501	1.3686

Parametri zamjenske šeme, uz upotrebu podataka iz Tabele VI.1, određeni su primjenom algoritama prezentovanih u [9,10,25,26] – (GA, PSO, ICA, GSA i COA). Zatim su, parametri transformatora određeni pomoću MRFO i predloženog CMRFO metoda. Uz svaki od algoritama, upotrijebljena je kriterijumska funkcija opisana u poglavlju 6.2.2.

Pri estimaciji, usvojena je vrijednost 18.7W, kao vrijednost gubitaka u gvožđu, dok je za ΔP izabrana vrijednost 0.15W. Aktivne otpornosti i rasipne reaktanse namotaja, svedene na primar, estimirane su u granicama [0.1 – 0.8] [Ω], dok su gornja i donja granica za otpornost gubitaka u gvožđu i reaktansu magnećenja iznosile [2000 – 3000] [Ω], odnosno [200 – 300] [Ω]. Navedene vrijednosti granica, usvojene su pri primjenu svakog od prethodno pomenutih algoritama. Konačno, kao broj tačaka i maksimalan broj iteracija određen je vrijednost 100, jednaka za svaki od algoritama. Osim toga, sve simulacije i proračuni sprovedeni su na računaru sa procesorom - Intel(R) Core TM i3-7010U CPU @ 2.30 GHz i 4GB RAM memorije.

Estimirane vrijednosti parametara zamjenske šeme transformatora, prikazane su u Tabeli VI.2., zajedno sa vrijednostima dobijenim na osnovu rezultata ogleda praznog hoda i kratkog spoja.

Tabela VI.2 – Rezultati estimacije
parametara zamjenske šeme transformatora

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
PHKS	0.5965	0.3772	0.5965	0.3772	2588.2	235.76
GA	0.5562	0.2376	0.2533	0.2724	2557.8	203.01
PSO	0.6030	0.4571	0.5090	0.1177	2556.3	235.81
GSA	0.3416	0.2142	0.4729	0.1456	2562.2	232.81
ICA	0.4838	0.2077	0.3229	0.2360	2563.1	233.24
COA	0.6029	0.2004	0.2007	0.3544	2556.4	233.14
MRFO	0.5298	0.1537	0.2954	0.3052	2559.9	233.95
CMRFO	0.6999	0.1000	0.1198	0.5093	2556.1	233.48

Kako bismo uporedili preciznost primjenjenih metoda, vrijednost kriterijumske funkcije, proračunata je pomoću estimiranih električnih veličina koje odgovaraju vrijednostima parametara prezentovanih u Tabeli VI.2. Proračunate vrijednosti kriterijumske funkcije, prikazane su u Tabeli VI.3, zajedno sa vrijednostima vremenskih intervala koji odgovaraju izvršenju jedne iteracije odgovarajućeg algoritma. Konkretno, u Tabeli su prikazane minimalna, maksimalna i srednja vrijednost trajanja iterativnog koraka, za svaki od algoritama upotrijebljenih pri estimaciji parametara.

**Tabela VI.2 – Vrijednost kriterijumske funkcije
i utrošeno vrijeme po iteraciji**

Algoritam	J x 1000	Vrijeme izvršenja jedne iteracije algoritma [ms]		
		minimalna vrijednost	srednja vrijednost	maksimalna vrijednost
GA	14.46	82.1	98.3	115.6
PSO	4.57	80.1	100.2	115.3
GS	1.56	33.2	36.8	43.3
ICA	1.51	31.4	54.3	58.8
COA	1.44	38.2	44.2	49.6
RMFO	1.40	28.2	30.1	36.4
CRMFO	1.24	28.3	30.3	35.5

U pogledu minimalne vrijednosti kriterijumske funkcije, najbolju preciznost, tj. najbolje poklapanje estimiranih i izmjerenih vrijednosti odgovarajućih struja, napona i snaga, postiže se primjenom CMRFO algoritma. Veća preciznost, u odnosu na GA, PSO, GS i ICA, postiže se i primjenom MRFO i COA metoda. Sa druge strane, MRFO ima najmanje prosječno utrošeno vrijeme po izvršenju iteracije, dok CMRFO u tom segmentu ima prednost u odnosu na sve ostale algoritme, izuzev MRFO. Međutim, imajući u vidu da su u implementaciji CMRFO metoda uključeni dodatni koraci, to onda nije iznenađujuće.

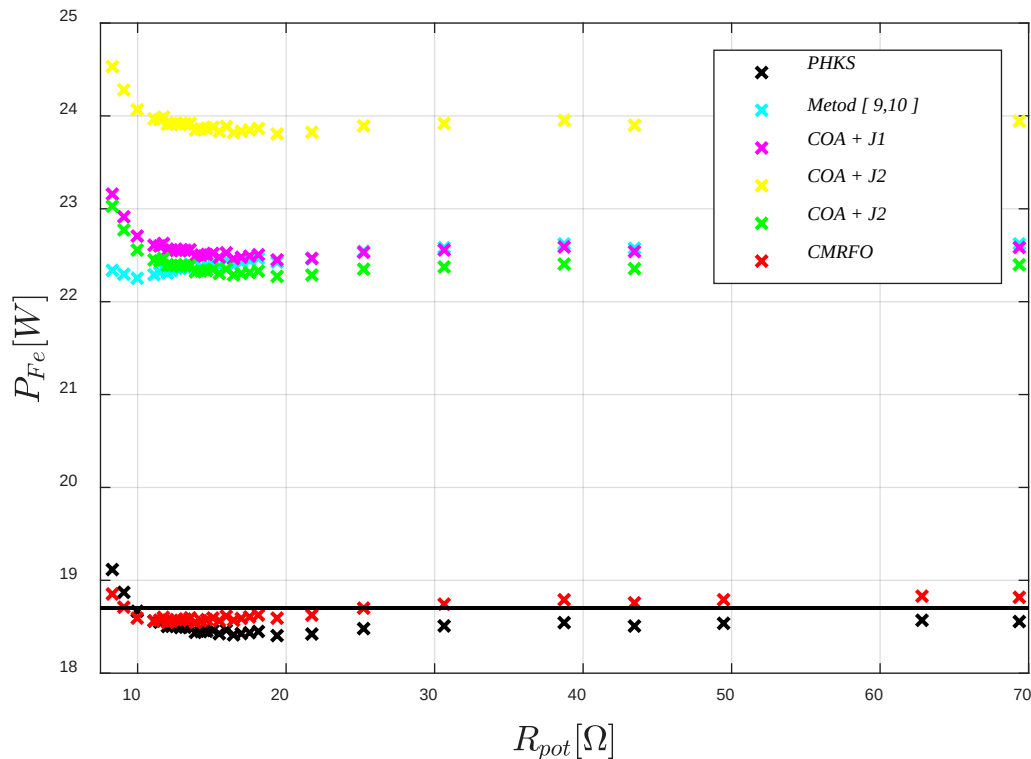
U cilju dalje analize dobijenih rezultata, u Tabeli VI.4 prikazane su standardne devijacije za svaki od estimiranih parametara. Rezultati su prikazani za MRFO i CMRFO kojima odgovara najmanja vrijednost kriterijumske funkcije, prema Tabeli VI.3. U tu svrhu, postupak optimizacije je pokrenut 500 puta i memorisana je vrijednost svakog parametara, kao i kriterijumske funkcije koja odgovara svakom setu parametara.

**Tabela VI.4 – Vrijednost standardne devijacije
za dobijene rezultate**

	MRFO	CMRFO
$\sigma(J)$	6.22×10^{-4}	6.94×10^{-5}
$\sigma(R_1)$	0.02112	5.16×10^{-3}
$\sigma(X_1)$	2.27×10^{-4}	9.51×10^{-4}
$\sigma(R_2')$	0.02277	6.94×10^{-3}
$\sigma(X_2')$	0.012247	5.08×10^{-3}
$\sigma(R_{Fe})$	0.393981	0.121473
$\sigma(X_m)$	0.046872	0.015027

Očigledno je da CMRFO ima najmanju vrijednost standardne devijacije za svaki od estimiranih parametara transformatora. Na osnovu toga, može se zaključiti da uvođenje dodatnih ograničenja u pogledu aktivne snage, i kombinovanjem teorije haosa – jednačina logističkog preslikavanja (3.1) i klasičnih optimizacionih algoritama (kakav je MRFO), za rezultat ima poboljšanje rezultata estimacije.

Na Slici 6.4, prikazane su estimirane vrijednosti gubitaka u gvožđu, koje odgovaraju vrijednostima parametara određenih klasičnim putem – na osnovu rezultata oglada PH i KS., zatim, vrijednostima određene primjenom metoda [9,10], kao i vrijednostima ostvarenim pomoću COA, uz upotrebu kriterijumskih funkcija (3.3), (5.1) i (5.2). Konačno, na slici su prikazani i rezultati primjene CMRFO algoritma, uz upotrebu kriterijumske funkcije opisane u sekciji 6.2.2.



Slika 6.4 – Gubici u gvožđu u funkciji otpornosti potrošača

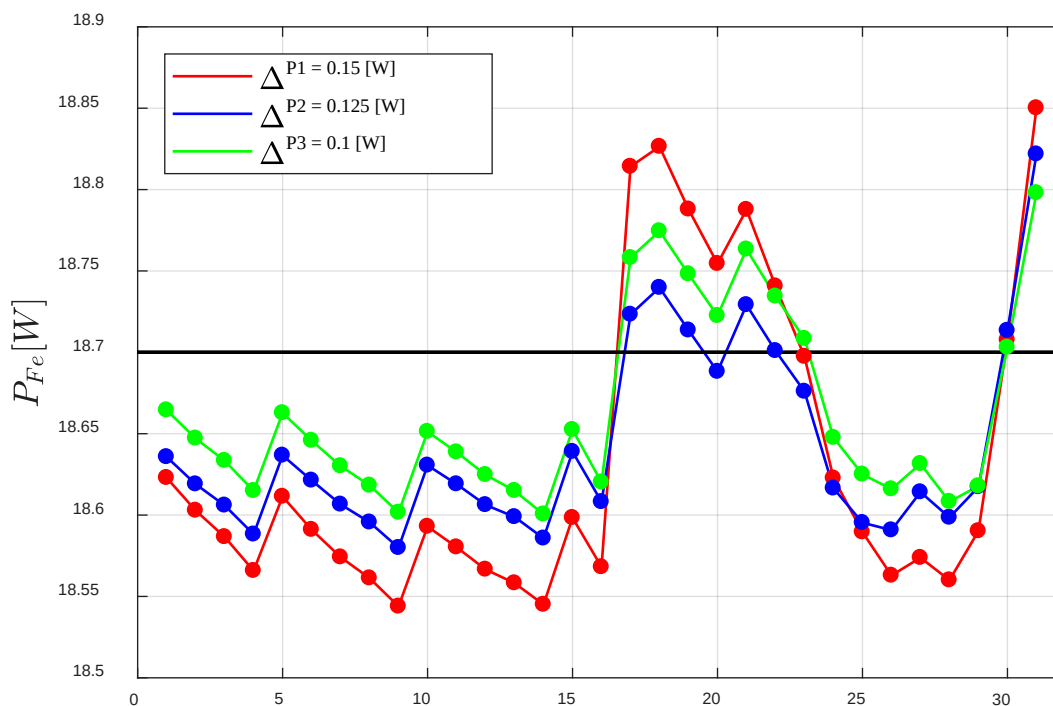
Imajući u vidu da standardni postupak određivanja parametara transformatora, pri određivanju parametara otočne grane u obzir uzima izmjerenu snagu gubitaka u praznom hodu, nije iznenađujuće što u ovom pogledu imamo dobro poklapanje sa izmjerenom vrijednosti. CMRFO, uz upotrebu modifikovane kriterijumske funkcije i restrikcija koje ona podrazumjeva, ostvaruje najbolje poklapanje u ovom pogledu, dok ostali algoritmi pokazuju značajna odstupanja.

Radi analize uticaja faktora ΔP u postavci kriterijumske funkcije (6.8), na rezultate estimacije, u razmatranje su uzete različite vrijednosti ovog faktora i postupak optimizacije pokrenut za svaku od izabranih vrijednosti (0.15W, 0.125W i 0.1W). Dobijeni parametri su prikazani u Tabeli V.5.

Tabela VI.5 – Vrijednost estimiranih parametara primjenom CMRFO uz različite vrijednosti ograničenja ΔP

	R_1 [Ω]	X_1 [Ω]	R_2 [Ω]	X_2 [Ω]	R_{Fe} [Ω]	X_m [Ω]
$\Delta P = 0.150$	0.6999	0.1000	0.1206	0.5093	2556.5	233.47
$\Delta P = 0.125$	0.4037	0.1030	0.5151	0.3651	2574.9	231.92
$\Delta P = 0.100$	0.4067	0.1056	0.5137	0.3337	2570.0	231.71

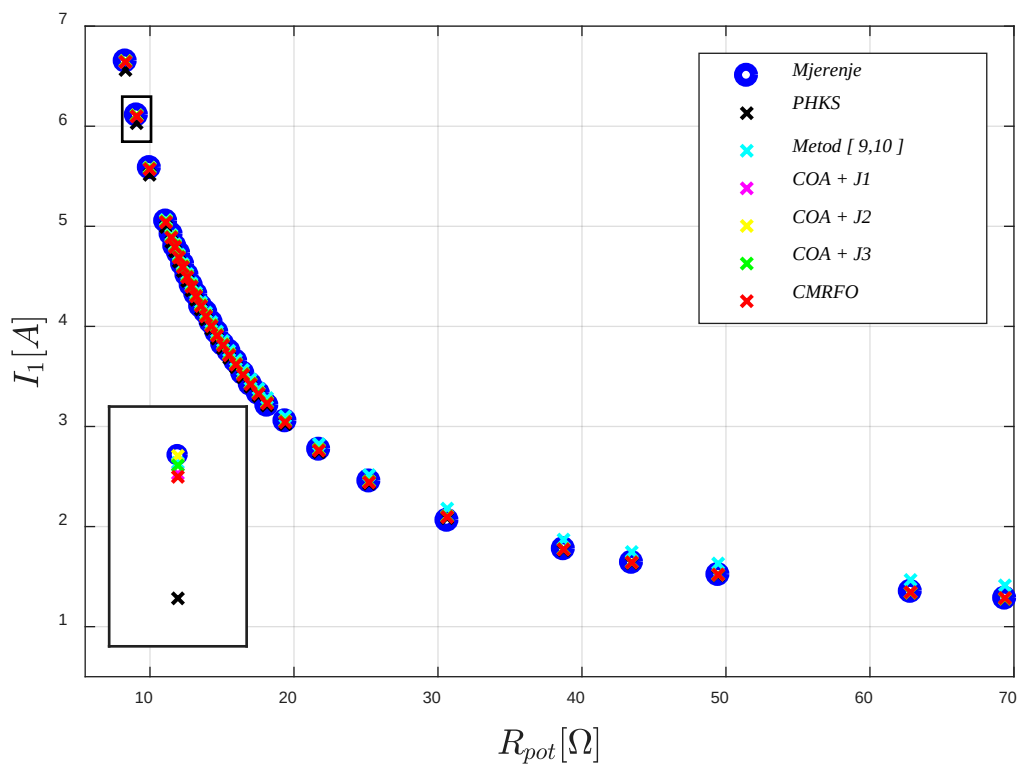
Na osnovu vrijednosti parametara prikazanih u Tabeli VI.5, proračunata je estimirana vrijednost gubitaka u gvožđu za svaku tačku iz Tabele VI.1. Prikaz estimiranih gubitaka u otočnoj grani zamjenske šeme, dat je na slici 6.5.



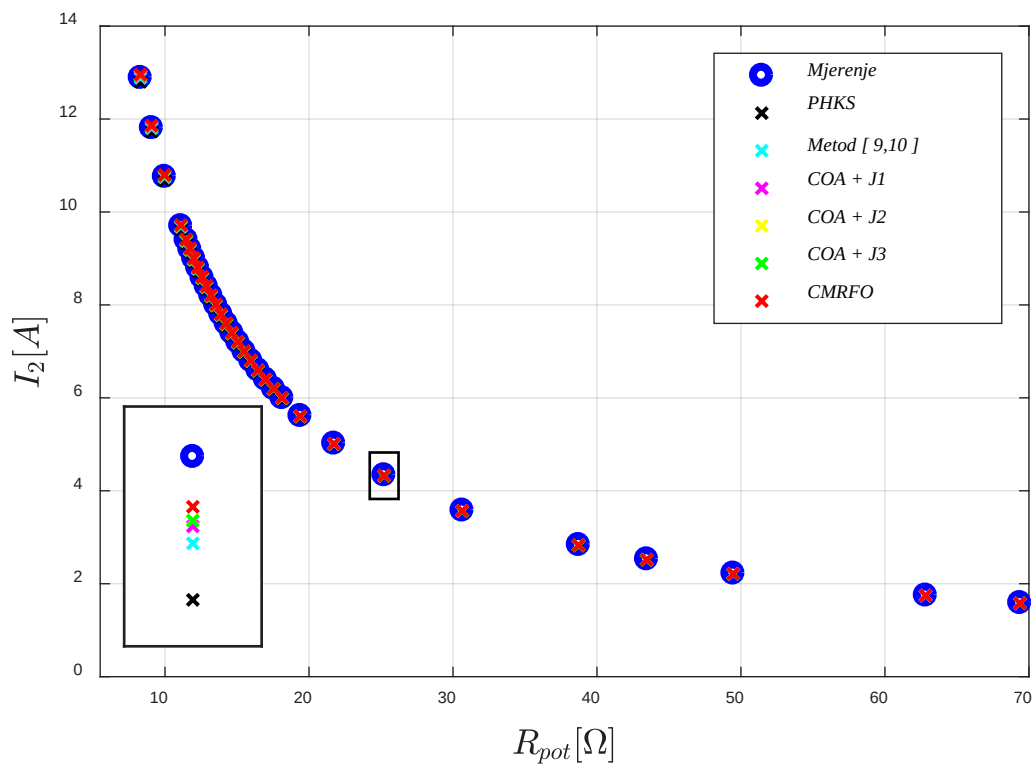
Slika 6.5 – Uticaj ΔP na estimirane gubitke u gvožđu

Na osnovu prikazanih rezultata, jasno je i očekivano da manje vrijednosti ΔP dovode do manjih devijacija vrijednosti ovih gubitaka u odnosu na izmjerenu vrijednost.

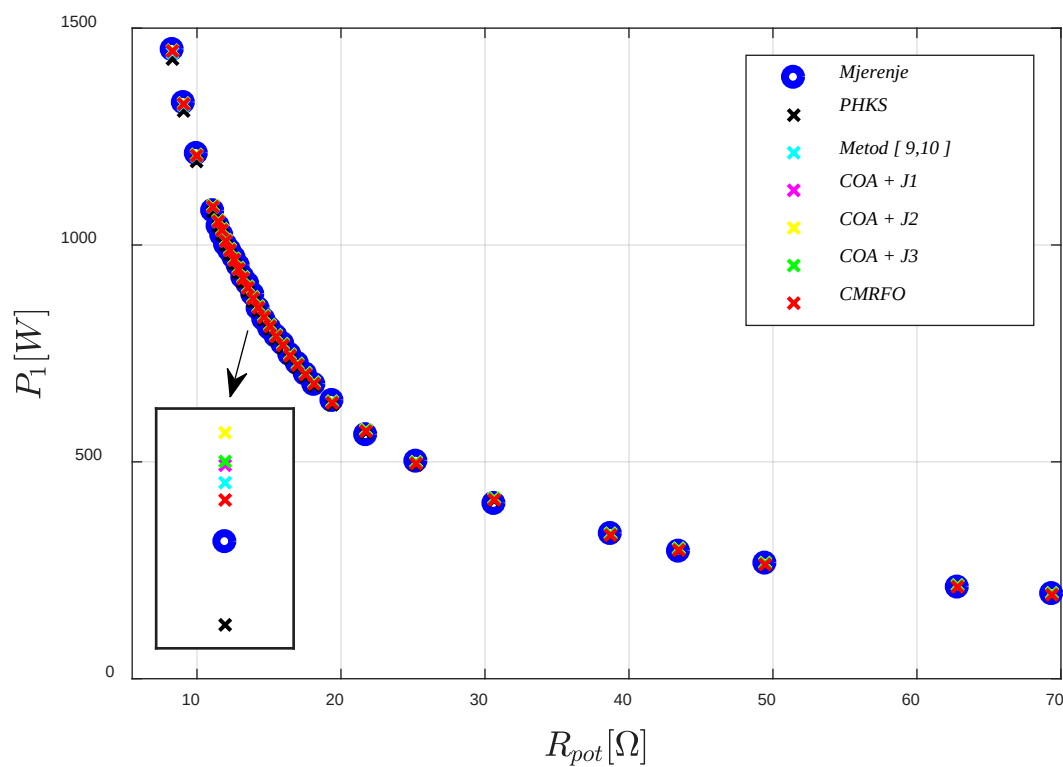
Na Sl. 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 i 6.11, prikazane su estimirane i izmjerene vrijednosti struje primara i sekundara, zatim ulazne i izlazne aktivne snage, napona sekundara i ulazne reaktivne snage.



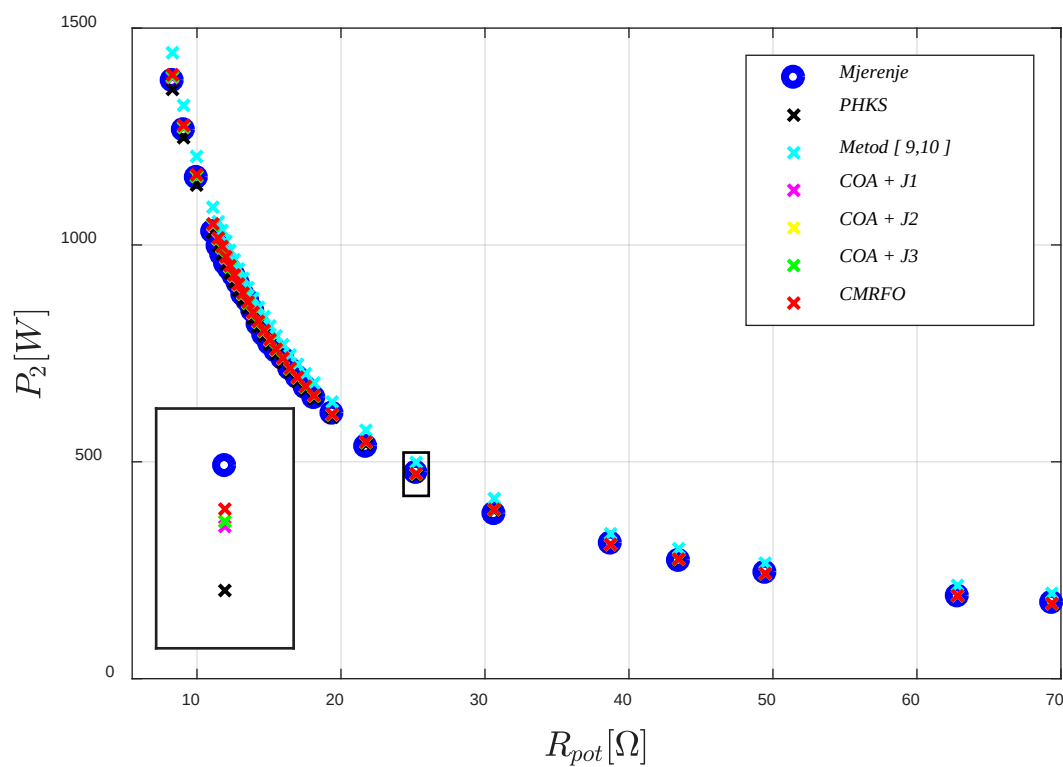
Slika 6.6 – Struja primara u funkciji otpornosti potrošača



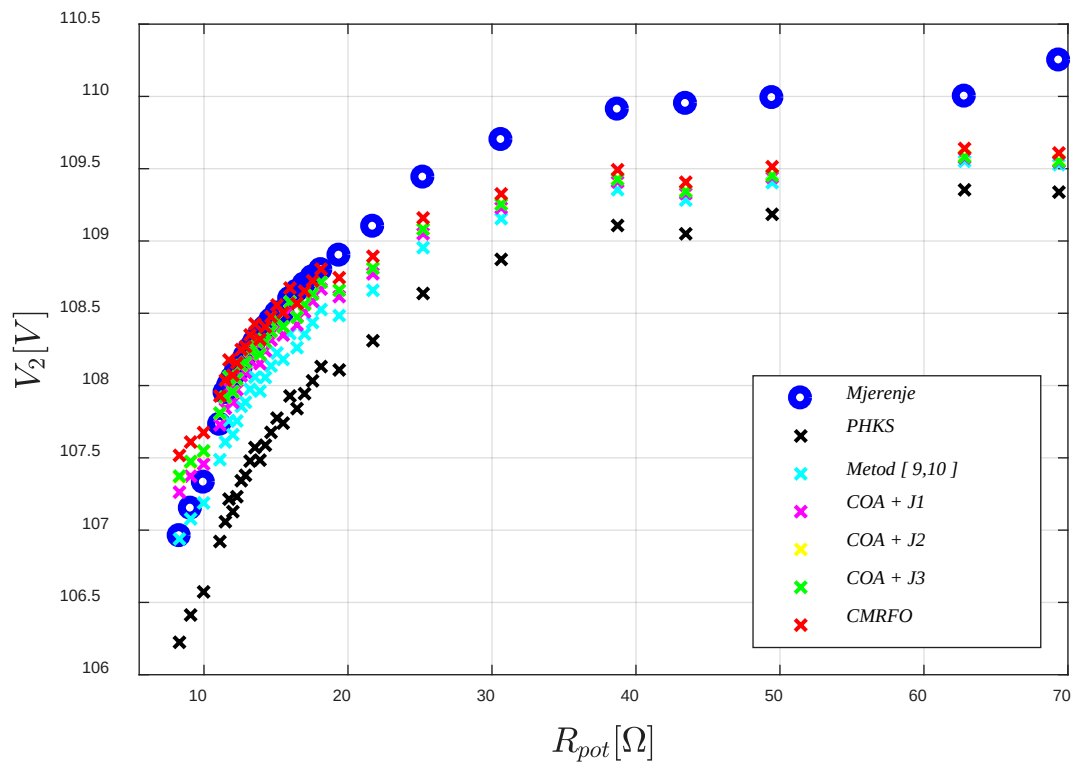
Slika 6.7 – Struja sekundara u funkciji otpornosti potrošača



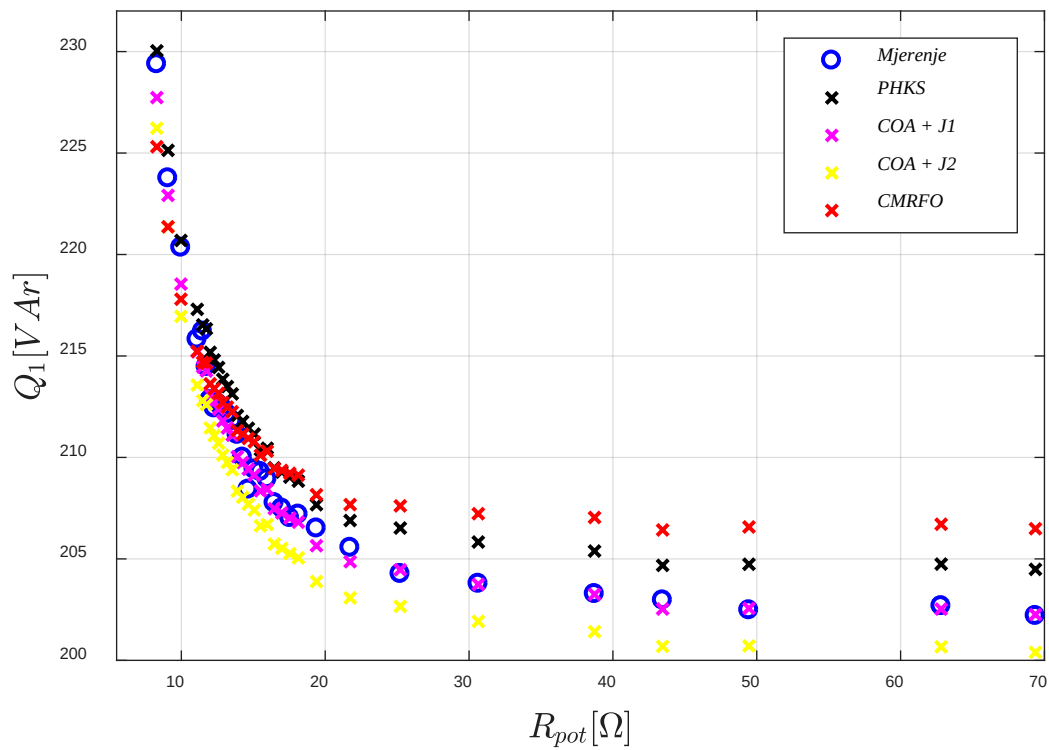
Slika 6.8 – Ulazna aktivna snaga u funkciji otpornosti potrošača



Slika 6.9 – Izlazna aktivna snaga u funkciji otpornosti potrošača



Slika 6.10 – Napon sekundara u funkciji otpornosti potrošača



Slika 6.11 – Ulazna reaktivna snaga u funkciji otpornosti potrošača

S obzirom da svi optimizacioni metodi, diskutovani u ovom radu, koriste kriterijumske funkcije u kojima figurišu struje primara i sekundara, očekivana su dobra poklapanja estimiranih i izmjerenih vrijednosti u slučaju ovih električnih veličina, što se može i vidjeti na slikama 6.6 i 6.7. Ono što je takođe očigledno je da, u ovom pogledu, najveća odstupanja javljaju kod vrijednosti koje su proračunate na osnovu rezultata ogleda PH i KS. Slična je situacija i u slučaju procjene ulazne i izlazne aktivne snage. Naime, u pogledu snaga, prednost imaju oni metodi koji koriste kriterijumsku funkciju u kojoj figurišu ove veličine. Sa Sl. 6.8 i 6.9 može se konstatovati da CMRFO postiže najbolji rezultat. Na Sl. 6.10 prikazane su vrijednosti napona sekundarnog namotaja. Vrijednosti dobijene pomoću parametara koji odgovaraju CMRFO metodu, najbliže u izmjerenim, dok se najveća odstupanja uočavaju u slučaju PH i KS metoda. Konačno, na Sl. 6.11, koja prikazuje vrijednosti ulazne reaktivne snage, uočavamo da je najbolje poklapanje ostvareno rezultatima primjene COA sa kriterijumskom funkcijom (5.1), dok CMRFO pokazuje najveća odstupanja. Međutim, treba istaći da ni u jednom od navedenih metoda, reaktivna snaga nije uzeta kao kriterijum pri estimaciji.

7. Zaključak

Cilj istraživanja, prezentovanog u ovom radu, bila je primjena predloženog Haotičnog Optimizacionog Algoritma u estimaciji parametara zamjenske šeme monofaznog dvonožnog transformatora. Primjena ovog algoritma, testirana je uz upotrebu podataka dostupnih u literaturi, ali i na osnovu vrijednosti odgovarajućih električnih veličina, dobijenih mjerenjem, prilikom sprovođenja eksperimenata neophodnih za implementaciju algoritma. Prije svega, misli se na eksperiment opterećivanja transformatora u širokom dijapazonu vrijednosti impedanse potrošača, čime je simulirano pogonsko stanje mašine. Osim toga, sprovedeni su i ogledi praznog hoda i kratkog spoja, u cilju određivanja parametara transformatora klasičnim eksperimentalnim putem. U radu su izložena poređenja dobijenih rezultata, kako sa rezultatima dobijenim klasičnim putem, tako i sa rezultatima drugih istraživanja, odnosno rezultata dobijenih primjenom drugih optimizacionih algoritama, primjenjenih na problematiku određivanja parametara transformatora. Osim toga, u radu je razmotrena i upotreba različitih kriterijumskih funkcija pri estimaciji. Naime, u radu su prezentovani rezultati ostvareni upotrebom svake od predloženih funkcija. Međutim, zaključeno je da se najveća preciznost ostvaruje primjenom funkcije koja pored struja primarnog i sekundarnog kruga, zatim napona sekundara i ulazne i izlazne aktivne snage, u obzir uzima i raspodjelu gubitaka snage u transformatoru. Konstatovanjem činjenice da se gubici u gvožđu mogu smatrati konstantnim u kompletnom dijapazonu opterećenja, od praznog hoda, pa do nominalno opterećenog transformatora, otvorena je mogućnost uvažavanja ove restrikcije u procesu estimacije. Primjenom ove funkcije, u kombinaciji sa hibridnom verzijom jednog klasičnog metaheurističkog metoda optimizacije i prvobitno predloženog haotičnog optimizacionog algoritma, ostvareni su rezultati koji pokazuju dobra poklapanja sa izmjerenim vrijednostima električnih veličina, uzetih u obzir pri estimaciji. U radu je takođe konstatovano da predloženom algoritmu odgovara najmanja vrijednost standardne devijacije, od svih metoda razmotrenih u radu, kao i najmanja vrijednost kriterijumske funkcije, a samim tim i greške. Time je pokazano da se predloženi hibridni algoritam, može uspješno primjeniti u estimaciji parametara transformatora.

Literatura

1. Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. Transformer Engineering—Design and Practice; Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2004.
2. Chen, T.H.; Chang, Y.L. Integrated models of distribution transformers and their loads for three-phase power flow analyses. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1996, 11, 507–513.
3. Soltan, N.; Eggers, D.; Hameyer, K.; De Doncker, R.W. Iron Losses in a Medium-Frequency Transformer Operated in a High-Power DC–DC Converter. *IEEE Trans Magn.* 2014, 50, 953–956.
4. Amoiralis, E.I.; Tsili, M.A.; Kladas, A.G. Transformer Design and Optimization: A Literature Survey. *IEEE Trans Power Deliv.* 2009, 24, 1999–2024. [CrossRef]
5. Arunkumar, S.; Sandeep, V.; Shankar, S.; Gopalakrishnan, M.; Udayakumar, K.; Jayashankar, V. Impulse testing of power transformers—A model reference approach. *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.* 2004, 151, 25–30.
6. Bogarra, S.; Font, A.; Candela, I.; Pedra, J. Parameter estimation of a transformer with saturation using inrush measurements. *Electr. Power Syst. Res.* 2009, 79, 417–425.
7. Abdulsalam, S.G.; Xu, W.; Neves, W.L.; Liu, X. Estimation of transformer saturation characteristics from inrush current waveforms. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2006, 21, 170–177.
8. Shintemirov, A.; Tang, W.H.; Wu, Q.H. Transformer core parameter identification using frequency response analysis. *IEEE Trans. Magn.* 2010, 46, 141–149.
9. Mossad, M.I.; Mohamed, A.; Abu-Siada, A. Transformer Parameters Estimation from Nameplate Data Using Evolutionary Programming Techniques. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2014, 29, 2118–2123.
10. Illias, H.A.; Moua, K.J.; Bakar, H.A. Estimation of transformer parameters from nameplate data by imperialist competitive and gravitational search algorithms. *Swarm Evol. Comput.* 2017, 36, 18–26.
11. Padma, S.; Subramanian, S. Parameter estimation of single-phase core type transformer using bacterial foraging algorithm. *Engineering* 2010, 2, 917–925. [CrossRef]
12. Padma, S.; Subramanian, S. Bacterial Foraging Algorithm based Parameter Estimation of Three Winding Transformer. *Energy Power Eng.* 2011, 3, 135–143.
13. Thilagar, S.H.; Rao, G.S. Parameter Estimation of Three-Winding Transformer Using Genetic Algorithm. *Eng. Appl. Art. Intell.* 2002, 15, 429–437.

14. Yilmaz, Z.; Oksar, M.; Basciftci, F. Multi-Objective Artificial Bee Colony Algorithm to Estimate Transformer Equivalent Circuit Parameters. *Period. Eng. Nat. Sci.* 2017, 5, 271–277.
15. Bhowmick, D.; Manna, M.; Chowdhury, S.K. Estimation of equivalent circuit parameters of transformer and induction motor using PSO. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Trivandrum, India, 14–17 December 2016*.
16. Bhowmick, D.; Manna, M.; Chowdhury, S.K. Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Transformer and Induction Motor from Load Data. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018, 54, 2784–2791.
17. Rahimpour, E.; Bigdeli, M. Simplified transient model of transformer based on geometrical dimensions used in power network analysis and fault detection studies. In *Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Lisbon, Portugal, 18–20 March 2009*.
18. Kazemi, R.; Jazebi, S.; Deswal, D.; de León, F. Estimation of Design Parameters of Single-Phase Distribution Transformers from Terminal Measurements. *IEEE Trans Power Deliv.* 2017, 32, 2031–2039.
19. Rubežić, V.; Lazović, L.; Jovanović, A. Parameter identification of Jiles–Atherton model using the chaotic optimization method. *Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.* 2018, 37, 2067–2080.
20. Coelho, L.S. Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach. *Chaos Solitons Fractals* 2009, 39, 1504–1514.
21. Jovanović, A.; Lazović, L.; Rubežić, V. Adaptive Array Beamforming Using a Chaotic Beamforming Algorithm. *Int. J. Antennas Propag.* 2016, 2016, 1–8.
22. Coelho, L.S.; Guerra, F.; Batistela, N.J.; Leite, J.V. Multiobjective Cuckoo Search Algorithm Based on Duffing’s Oscillator Applied to Jiles–Atherton Vector Hysteresis Parameters Estimation. *IEEE Trans. Magn.* 2013, 49, 1745–1748.
23. Wang, W.B.; Feng, Q.D.; Liu, D. Application of Chaotic Particle Swarm Optimization Algorithm to Pattern Synthesis of Antenna Arrays. *Prog. Electromagn. Res.* 2011, 115, 173–189.
24. Yang, D.; Li, G.; Cheng, G. On the efficiency of chaos optimization algorithms for global optimization. *Chaos Solitons Fractals* 2007, 34, 1366–1375.
25. D.Mujičić, M. Čalasan, V. Rubežić, and L. Lazović, “Transformer parameters estimation by using chaotic optimization approach,” in *Proc. 18th Int. Symp. INFOTEH-JAHORINA*, Mar. 2019, pp. 248–252.

26. M. Čalasan, D. Mujičić, V. Rubežić, and M. Radulović, "Estimation of equivalent circuit parameters of single-phase transformer by using chaotic optimization approach," *Energies*, vol. 12, 2019, Art. no. 1697.
27. M. P. Čalasan, A. Jovanović, V. Rubežić, D. Mujičić and A. Deriszadeh, "Notes on Parameter Estimation for Single-Phase Transformer," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3710-3718, July-Aug. 2020
28. Bertuglia, C.S.; Via, F. *Nonlinearity, Chaos, and Complexity*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2005.
29. Sprott, J.C. *Chaos and Time-Series Analysis*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2003.
30. W. Zhao, Z. Zhang, and L. Wang, "Manta ray foraging optimization: An effective bio-inspired optimizer for engineering applications," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 87, Jan. 2020, Art. no. 103300.
31. G. Joksimović, "Transformatori", Nerecenzirana skripta, Podgorica, 2015 god.
32. M. Đurović, "Transformatori", UNIREKS, Podgorica, 1995 god.
33. I. Vujošević, "Analiza elektroenergetskih sistema I", Elektrotehnički fakultet Podgorica, 2006 god.
34. IEEE Guide for Transformer Loss Measurement, IEEE Std C57.123-2010 (Revision of IEEE Std C57.123-2002), Aug. 3, 2010, pp. 1–49.