

Dr. sc. Mario Jurković
Končar D&ST
mario.jurkovic@koncar-dst.hr

Zlatko Grman, mag. ing. el.
Končar D&ST
zlatko.grman@koncar-dst.hr

AUTOTRANSFORMATORI ZA POKRETANJE ELEKTRIČNIH MOTORA

SAŽETAK

Električni motori pri pokretanju iz mirovanja povlače struju koja višestruko premašuje nazivnu, što može izazvati neželjena preopterećenja mreže. Kako bi se smanjio udar struje i olakšao rad elektroenergetskog sustava, koriste se različite metode pokretanja. Jedna od tih metoda je i pokretanje pomoću autotransformatora startera.

Tijekom pokretanja električnog motora pomoću startera, koji se odvija u tri faze, koristi se njegova specifična izvedba kako bi se ograničila struja koju električni motor može povući iz mreže, uzevši u obzir mehaničke karakteristike pogona električnog motora. Nakon završetka procesa pokretanja električni motor priključuje se direktno na mrežu. U ovom radu opisane su karakteristike i specifičnosti ovakvog proizvoda te primjena u elektroenergetskom sustavu.

Ključne riječi: autotransformator, starter, pokretanje elektromotora, prigušnica

AUTOTRANSFORMERS FOR STARTING OF ELECTRIC MOTORS

SUMMARY

Electric motors draw a current several times higher than the nominal value during startup, which can cause undesirable network overloads. To reduce inrush current and facilitate the operation of the power system, various starting methods are used. One such method is starting with an autotransformer starter.

During the startup of an electric motor using a starter, which takes place in three stages, its specific design is utilized to limit the current that the electric motor can draw from the network, taking into account the mechanical characteristics of the motor drive. After the startup process is completed, the electric motor is directly connected to the network. This paper describes the characteristics and specifics of this product, as well as its application in the power system.

Key words: autotransformer, starter, electric motor start-up, reactor

1. UVOD

Električni motori, odnosno elektromotori, široko su rasprostranjeni u raznim primjenama. Čine preko 90% svih motora korištenih u industrijskoj upotrebi. Njihovo pokretanje može biti štetno, kako za sam elektromotor tako i za mrežu, jer prilikom pokretanja povlače struju višestruko veću od nazivne [1].

Pokretanje elektromotora ostvarivo je raznim metodama od kojih svaka ima svoje prednosti i mane te primjenu za određeni tip elektromotora. U današnje vrijeme ponajviše se koristi pokretanje uz pomoć preklopke zvijezda-trokut ili korištenjem mekog pokretača (eng. soft starter) za elektromotore vrlo velikih snaga. Osim najčešće korištenog mekog pokretača, za elektromotore velikih snaga u industrijskim postrojenjima koristi se i pokretanje pomoću autotransformatora [1].

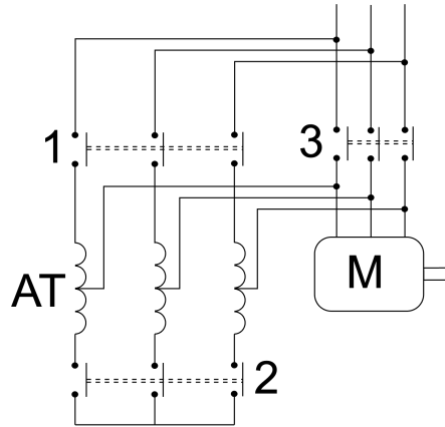
Uobičajen naziv za autotransformator za pokretanje elektromotora je autotransformator starter, da bi se razlikovao od običnog autotransformatora, čija je namjena, a i izvedba, različita od namjene autotransformatora startera.

2. POKRETANJE ELEKTROMOTORA POMOĆU AUTOTRANSFORMATORA

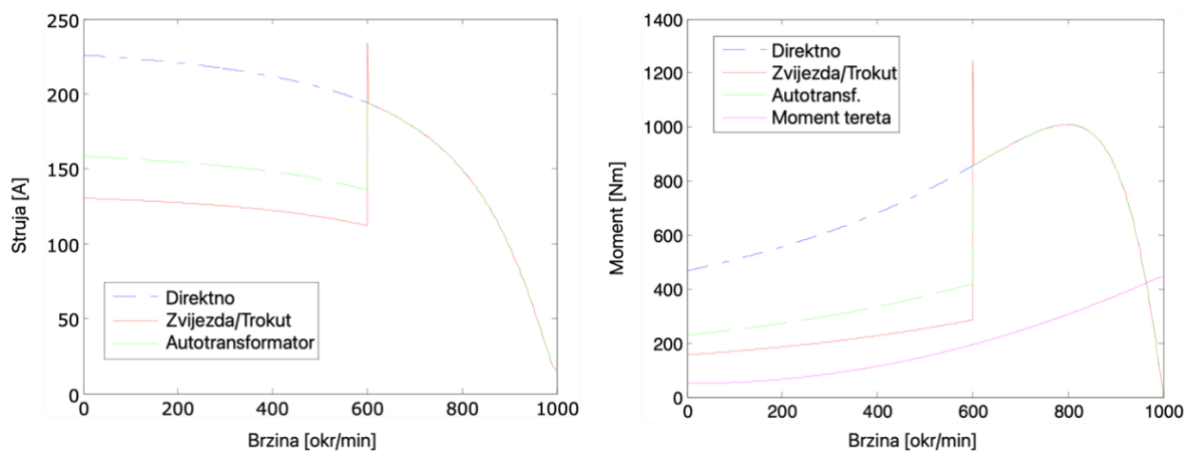
Priključci elektromotora spojeni su na sekundarnu stranu autotransformatora, odnosno na sniženi napon u odnosu na mrežni napon. Zbog sniženog napona manja je i struja pokretanja, a time i udar na mrežu, a to je glavna prednost pokretanja elektromotora pomoću autotransformatora. Elektromotor se pokreće s ovako sniženim naponom, a zatim se, nakon što se ispuni unaprijed određeni uvjet, elektromotor prebacuje na mrežni napon. Taj uvjet može biti unaprijed zadano vrijeme, razina struje, napon sabirnice ili brzina elektromotora. Još jedna prednost pokretanja pomoću autotransformatora je mogućnost smanjenja vibracija i razine buke tijekom pokretanja. Ovaj način pokretanja može se smatrati poboljšanom verzijom pokretanja pomoću preklopke zvijezda/trokut. U odnosu na druge načine pokretanja, ovaj način pokretanja predstavlja dobar omjer cijene i karakteristika, pa predstavlja zanimljivu opciju za kupce koji time mogu izbjeći visoke troškove nabave novijih sustava pokretanja gdje se koristi elektronika [2], [3].

Prebacivanje između sniženog napona i mrežnog napona može se izvršiti metodom prijelaza u otvorenom ili zatvorenom krugu. Tijekom pokretanja startera s prijelazom u otvorenom krugu, autotransformator primjenjuje sniženi napon na elektromotor sve dok elektromotor ne postigne brzinu određenu sekundarnim naponom autotransformatora. Kada se ta brzina postigne, sklopka na priključku autotransformatora se isključuje, a druga sklopka zatvara spoj između elektromotora i punog mrežnog napona kako bi se postigla puna brzina. Zbog toga dolazi do skoka struje prilikom ponovnog povezivanja elektromotora na napajanje, uzrokujući veliki strujni udar kroz namote elektromotora. To može s vremenom uzrokovati oštećenja. Kako bi se ovaj problem izbjegao, razvijen je *Korndorfferov starter*, koji je starter s prijelazom u zatvorenom krugu. Ovom metodom elektromotor nikada nije potpuno odspojen od napajanja, čime se eliminira skok struje prisutan kod startera s prijelazom u otvorenom krugu [2], [3].

Na slici 1 prikazana je shema pokretanja elektromotora pomoću autotransformatora startera. U početnom trenutku se uklape sklopke 1 i 2 te elektromotor dođe na sniženi napon. Nakon što elektromotor postigne brzinu vrtnje koja odgovara tom naponu, sklopka 2 se isklopi te elektromotor dođe na mrežni napon preko serijskog namota autotransformatora startera. Nakon što elektromotor postigne nazivnu brzinu vrtnje, u istom trenutku se isklopi sklopka 1, a uklopi sklopka 3 te je time završeno pokretanje elektromotora i on je direktno spojen na mrežu. Na slici 2 prikazana je usporedba struje, odnosno momenta elektromotora, u ovisnosti o brzini vrtnje, za razne načine pokretanja elektromotora. Na grafovima je vidljiv izraziti skok struje, odnosno momenta, prilikom prebacivanja elektromotora sa sniženog na mrežni napon, za pokretanje pomoću preklopke zvijezda/trokut, a što se eliminira upotrebom autotransformatora startera za pokretanje elektromotora. Važno je naglasiti da se radi o starteru s prijelazom u zatvorenom krugu, dok starter s prijelazom u otvorenom krugu ne eliminira skok struje.



Slika 1. Shema pokretanja elektromotora pomoću autotransformatora startera [4]



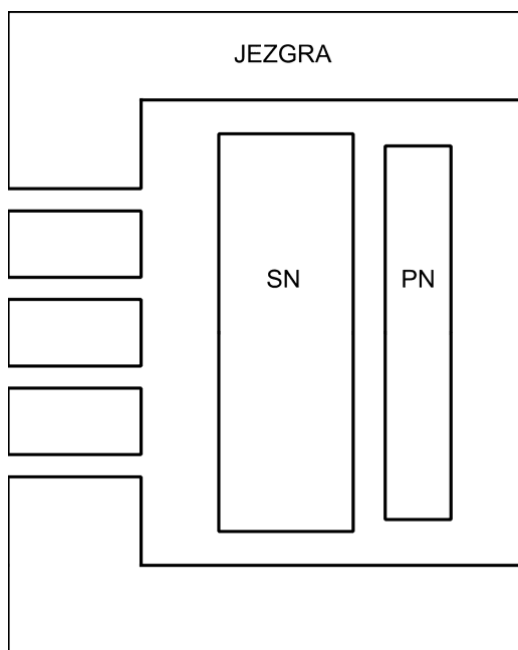
Slika 2. Usporedba struje i momenta elektromotora u ovisnosti o brzini vrtnje elektromotora za različite načine pokretanja [3]

3. IZVEDBA AUTOTRANSFORMATORA ZA POKRETANJE ELEKTROMOTORA

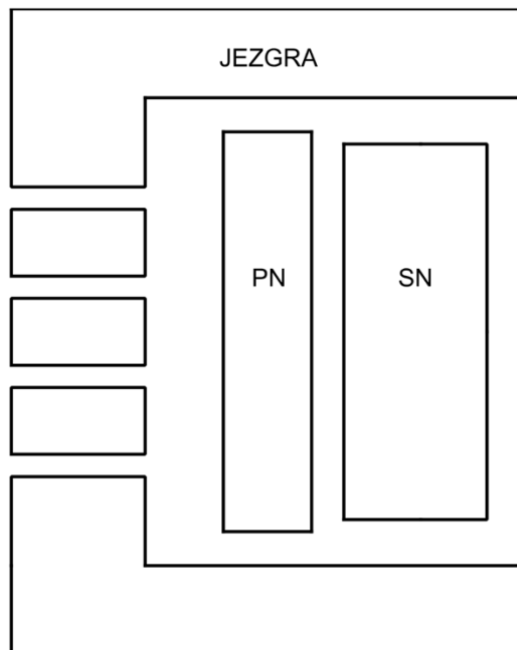
Autotransformator starter zapravo je klasični autotransformator kojemu su dodani nemagnetski raspori u jezgri. U pravilu, ima izvode u namotu koji omogućuju odabir adekvatnog napona na elektromotoru prilikom pokretanja, prema njegovoj karakteristici. Prilikom pokretanja potrebno je odabrati takav sniženi napon da moment u tom trenutku bude jednak ili veći od momenta potrebnog za pokretanje. Najčešće korištene vrijednosti napona na izvodima iznose 80%, 65% i 50% nazivnog napona. Na izvodu od 50% nazivnog napona, struja primara startera (struja koju starter vuče iz mreže) iznosi 25% nazivne struje elektromotora [2], [3]. Starter može biti izveden u trofaznoj ili jednofaznoj varijanti.

U prethodnom poglavlju je objašnjeno na koji način se odvija pokretanje elektromotora pomoću autotransformatora startera (slika 1). Tijekom prve faze pokretanja, kada su uklopljene sklopke 1 i 2, starter se ponaša kao klasični autotransformator. U drugoj fazi pokretanja, kada je uklopljena samo sklopka 1, serijski namot autotransformatora ponaša se kao prigušnica koja ima lineariziranu jezgru, tj. nemagnetske raspore u stupovima jezgre. Zbog tih raspore struja praznog hoda startera je znatno veća od struje praznog hoda klasičnog autotransformatora.

Poput klasičnog autotransformatora, namot se sastoji od serijskog (SN) i paralelnog (PN) namota. Izgled jedne faze trofaznog startera pokazuju slike 3 i 4, na kojima su prikazane dvije različite geometrije. Prva geometrija je sa serijskim namotom smještenim do jezgre, a zatim paralelni smješten oko njega (slika 3). Druga geometrija je kada imamo paralelni namot smješten do jezgre, a zatim serijski oko njega (slika 4).



Slika 3. Starter sa serijskim namotom do jezgre

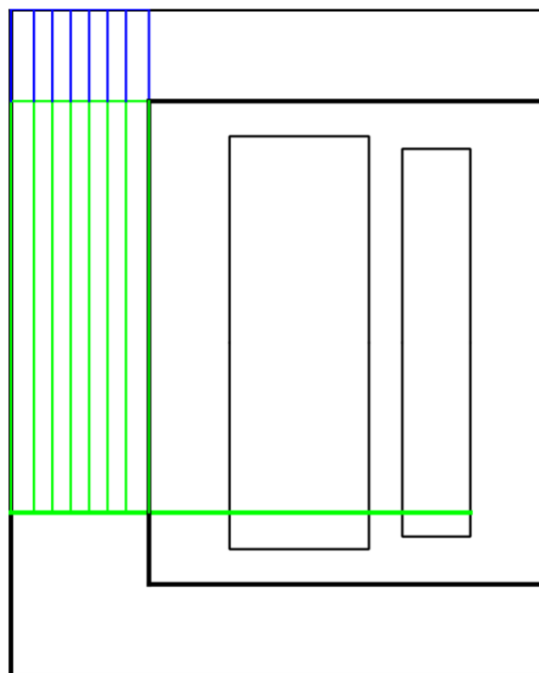


Slika 4. Starter s paralelnim namotom do jezgre

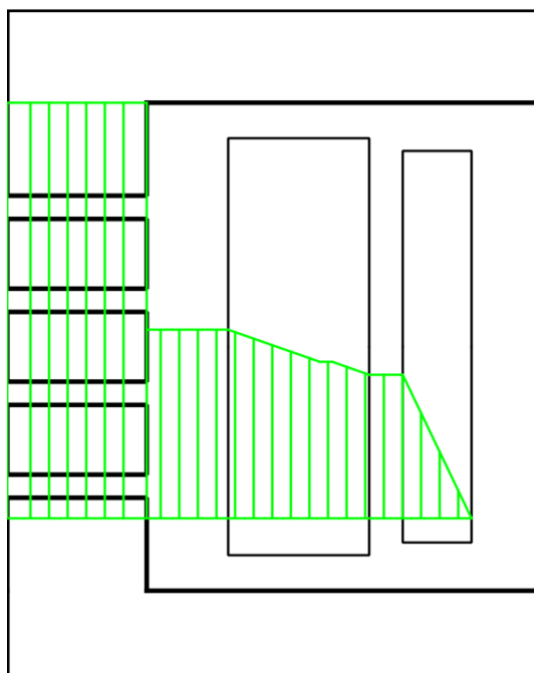
3.1. Jezgra startera

Kada se neopterećeni starter priključi na nazivni napon, kroz njegove zavojice teče struja praznog hoda I_0 koja unutar startera izgrađuje magnetsko polje. Njen iznos određuje narinuti napon i impedancija praznog hoda startera.

Kada u jezgri ne bi bilo zračnih raspورا, induktivitet startera bi bio mnogo veći, a struja praznog hoda bi bila neznatna. Omjer primarnog i sekundarnih napona odgovarao bi omjeru brojeva zavoja, kako to izgleda u transformatoru ili autotransformatoru sa željeznom jezgrom (slika 5).



Slika 5. Dijagram magnetske indukcije u autotransformatoru bez raspورا u jezgri



Slika 6. Dijagram magnetske indukcije u starteru za vrijeme praznog hoda

Jezgru autotransformatora startera izvodimo sa zračnim rasporima. Slika 6 pokazuje dijagram magnetske indukcije u starteru za vrijeme praznog hoda. Zbog raspora u jezgri dio magnetskog toka izvan jezgre više nije zanemariv, odnosno struja praznog hoda je znatno veća od struje praznog hoda klasičnog autotransformatora, s jezgrom bez raspora.

Tipska snaga autotransformatora – S_T (snaga koju može prenijeti ekvivalentni dvonamotni transformator u normalnim uvjetima rada), računa se prema:

$$S_T = U_1 * I_1 * \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) [\text{kVA}], \quad (1)$$

gdje je:

U_1	napon mreže [kV]
I_1	struja kroz serijski namot SN [A]
U_2	napon elektromotora [kV]

Ukupna aksijalna širina svih zračnih raspora u jezgri određuje se preko formule:

$$\sum \delta_0 = \frac{500 * \frac{S_T}{3}}{f * Q_{ef_jez} * B^2} [\text{mm}] \quad (2)$$

gdje je:

S_T	tipska snaga autotransformatora [kVA]
f	nazivna frekvencija napona mreže [Hz]
Q_{ef_jez}	efektivni presjek jezgre [mm^2]
B	magnetska indukcija u jezgri [T]

Ukupna širina svih zračnih raspora raspodjeljuje se na više manjih raspora. Što je više raspora, to je veća buka i vibracije te kompleksnija izvedba steznog sustava, zbog čega projektant u fazi projektiranja autotransformatora startera mora odabrati optimalan broj raspora, da zadovolji tražene parametre uz što manju buku i vibracije.

Struju praznog hoda jezgre s rasporima računamo pomoću formule:

$$I_0 = \frac{B * \sum \delta_0}{\sqrt{2} * \mu_0 * N_{max}} [A] \quad (3)$$

gdje je:

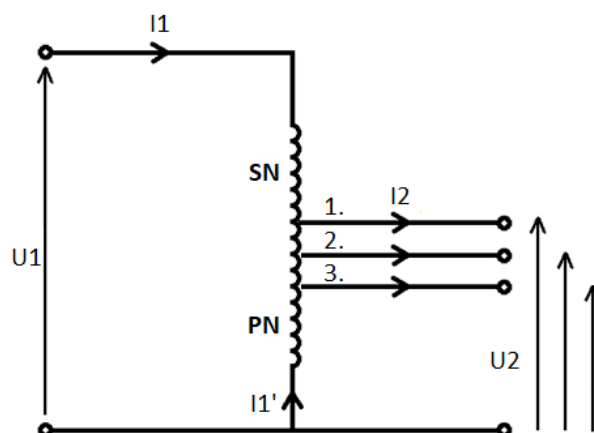
B	magnetska indukcija u jezgri [T]
δ_0	aksijalna širina zračnog raspora [mm]
μ_0	magnetska permeabilnost vakuuma [H/m]
N_{max}	ukupan broj zavoja startera [-]

Limovi jezgre startera složeni su od standardnih materijala korištenih za izradu jezgri transformatora.

3.2. Namoti startera

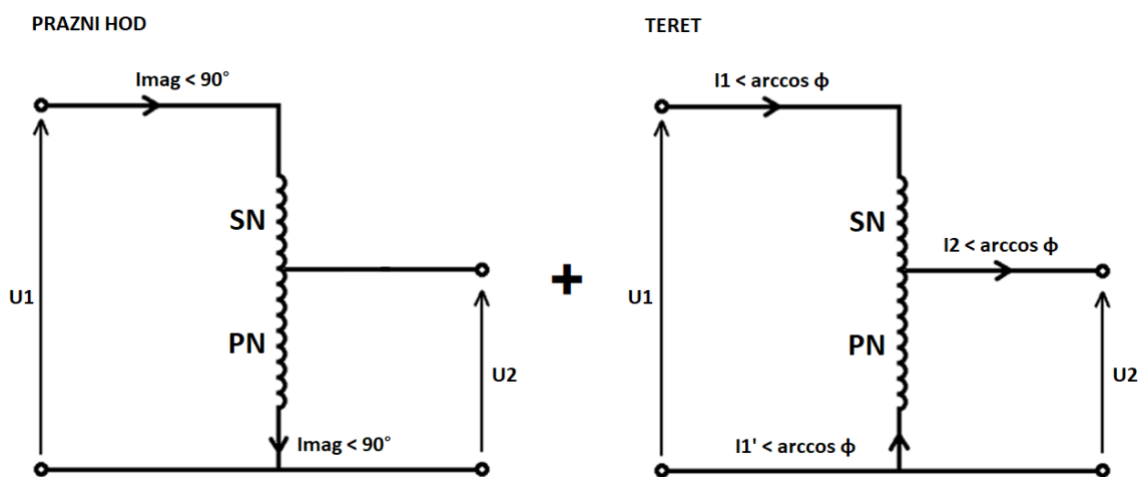
Na slici 7 prikazana je shema namota startera. Za proračun namota startera potrebni su podaci o elektromotoru kojega je potrebno pokrenuti. Uz snagu, napon i struju važan podatak su faktori snage za zakočeno stanje (mirovanje prije pokretanja) te kod nazivnog broja okretaja. Za svaki otcjep iz namota računamo struju kroz namot za dva slučaja:

1. U samom početku zaleta elektromotora.
2. Kod nazivnog broja okretaja elektromotora.



Slika 7. Shema namota startera

Struja kroz namot je zbroj struje potrebne za magnetiziranje jezgre, odnosno stvaranje magnetskog polja, te struje potrebne za napajanje elektromotora (Slika 8). Struja magnetiziranja jezgre je čisto induktivnog karaktera, dok je struja tereta dominantno radnog karaktera u zaletu, a dominantno induktivnog karaktera kod nazivnog broja okretaja elektromotora.



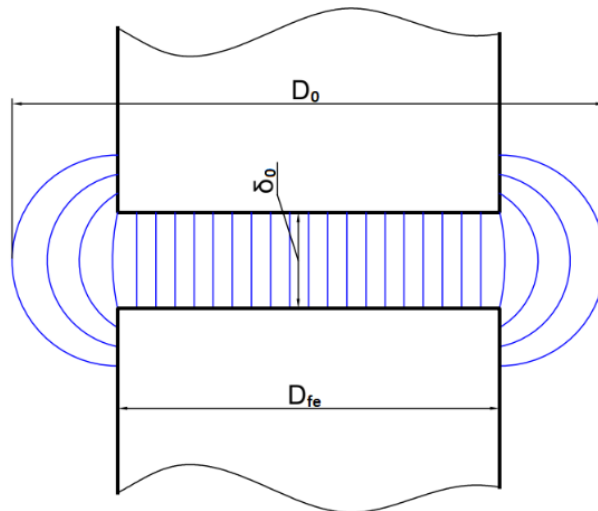
Slika 8. Struje kroz namot startera

Nakon što se izračunaju struje za sve otcjepe i za oba slučaja (pokretanje elektromotora i elektromotor u nazivnoj brzini vrtnje), uzima se najveća vrijednost struje koja prolazi kroz serijski i paralelni namot. Važno je uzeti u obzir i vrijeme trajanja određene faze pokretanja, jer ukupna procedura pokretanja je reda 30-ak sekundi. Dakle, opterećenost serijskog i paralelnog namota strujom zaleta traje svega par desetaka sekundi. Treba uzeti u obzir i učestalost pokretanja elektromotora. Ova tri faktora (najveća vrijednost struje, trajanje opterećenja, učestalost pokretanja) kriterij su za odabir presjeka vodiča za namot.

3.2.1 Kontrola pada napona

Iznosi reaktancija startera računaju se za drugu fazu zaleta elektromotora kada serijski namot služi kao linearizirani induktivni otpor spojen između elektromotora i mreže. Reaktancija se koristi pri kontroli pada napona koja je potrebna da ne dođe do kočenja elektromotora.

Na slici 9 prikazan je magnetski tok u rasporu. Izlazeći iz magnetskih limova u okolni nemagnetski prostor silnice se odbijaju i magnetski tok zauzima površinu koja je veća od presjeka željeza u stupu, što je potrebno uzeti u obzir prilikom izračuna reaktancija.



Slika 9. Magnetski tok u rasporu

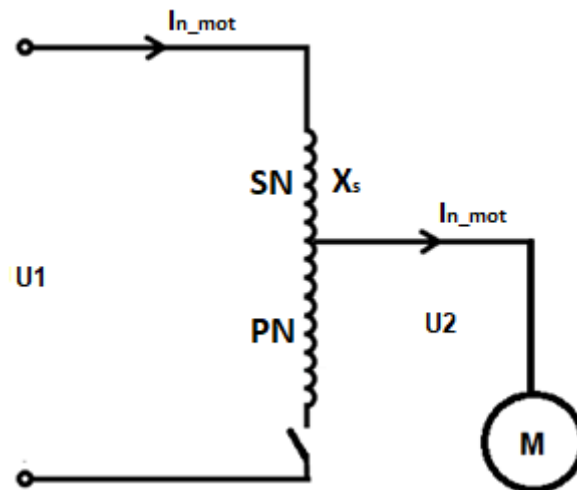
Kontrola pada napona provodi se na način da se za svaki otcjep provjerava kriterij:

$$U_2 = U_1 - 1,1 * I_{n_mot} * X_s > U_{otcjep} \quad (8)$$

gdje je:

U_1	napon mreže [V]
I_{n_mot}	struja kroz serijski namot SN i elektromotor [A]
X_s	reaktancija serijskog namota [Ω]
U_2	napon elektromotora [V]
U_{otcjep}	nazivni napon odgovarajućeg odcjeka sekundara [V]

U svim otcjepima ovaj kriterij mora biti zadovoljen. Na slici 10 prikazan je spoj startera u drugoj fazi pokretanja.



Slika 10. Spoj startera u drugoj fazi pokretanja

3.2.2 Provjera pogreške omjera transformacije

U vanjskim zavojima namota se inducira veći napon nego u unutrašnjim. Zbog tog razloga, starter kojemu je serijski namot do jezgre ima pozitivnu naponsku pogrešku, a onaj kojemu je do jezgre paralelni namot ima negativnu naponsku pogrešku. Računska pogreška omjera transformacije definira se kao:

$$p\% = \left(\frac{U_{1n}/U_{2n}}{E/E_2} - 1 \right) \cdot 100 \quad (9)$$

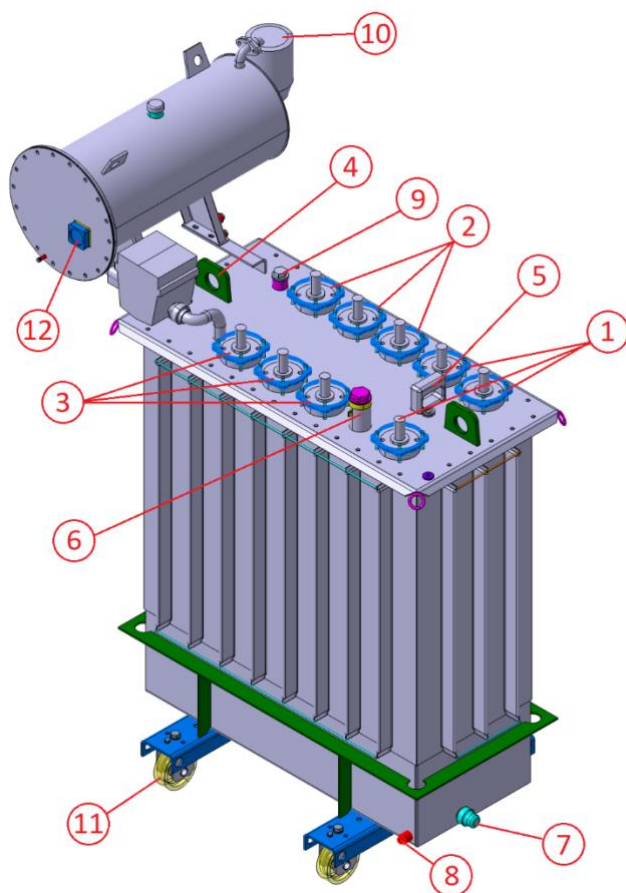
gdje je:

- U_{1n} nazivni napon primara startera
- U_{2n} nazivni napon odgovarajućeg odcjeka sekundara
- E napon induciran u starteru
- E_2 napon induciran u odgovarajućem sekundaru startera

Bilo da se radi o pozitivnoj ili negativnoj pogrešci omjera transformacije, da bi se izbjegla, potrebno ju je unaprijed izračunati, a zatim promjenom omjera broja zavoja svesti na zadovoljavajući iznos.

4. PRIMJENA AUTROTRANSFORMATORA STARTERA KOD ELEKTRIČNIH MOTORA

Na slici 11 prikazana je izvedba startera za pokretanje asinkronog motora snage 3500 kW sa osnovnim komponentama:



1. VN provodnici – krajevi namota (X_A , X_B , X_C)
2. VN provodnici – otcjepi iz namota (a, b, c)
3. VN provodnici – početci namota (A, B, C)
4. Kuke za podizanje transformatora
5. Ručica preklopke
6. Otvor za nalijevanje ulja
7. Ispust ulja
8. Priključak za uzemljenje
9. Džep za termometar
10. Sušionik zraka
11. Kotači
12. Uljokaz

Slika 11. Primjer izvedbe autotransformatora

Neke od prednosti korištenja autotransformatora startera za pokretanje električnih motora su:

- **Fleksibilnost:** Različiti naponski izvodi autotransformatora omogućuju prilagođavanje potezne struje i momenta. Izvodi prilikom projektiranja mogu biti prilagođeni zahtjevima prema tipu elektromotora kojeg se pokreće. Npr. Za izvode od 50%, 65% i 80% nazivnog napona smanjuje se potezni moment na 25%, 42%, odnosno 64%. Napon koji se

primjenjuje na elektromotor može se povećavati u više koraka kako bi se postiglo glatko ubrzanje.

- Fino pokretanje: omogućava kontinuirano napajanje elektromotora tijekom prijelaza sa smanjenog na nazivni napon elektromotora. Time se izbjegava visoko prijelazno preklapanje te nema opasnosti od neželjene prorade nadstrujne zaštite. Prijelaz se odvija bez mehaničkih trzaja na opremi što je osobito korisno u primjenama poput pumpi, ventilatora i kompresora.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je primjena autotransformatora startera za pokretanje električnih motora. Objašnjena su njegova osnovna obilježja te ključni zahtjevi koje je potrebno ispuniti prilikom projektiranja takve vrste transformatora. Također su navedeni prednosti koje ova izvedba transformatora donosi.

Najjednostavnije i najpovoljnije rješenje za pokretanje elektromotora je izravno uključanje ili pokretanje spojem zvijezda-trokut, dok su najskuplja rješenja ona temeljena na energetskej elektronici, poput mekih pokretača i frekvencijskih pretvarača. Pokretanje pomoću autotransformatora nalazi se između ova dva ekstrema, nudeći ravnotežu između cijene i performansi. Izbor metode pokretanja ovisi o specifičnostima postrojenja, dostupnom budžetu, zahtjevima sustava te o tome radi li se o novoj instalaciji ili zamjeni postojećeg uređaja, a na kraju je izbor optimalnog načina pokretanja, uzevši u obzir sve navedene parametre, na projektantu postrojenja.

5. LITERATURA

- [1] E. Kućan, „Pokretanje i regulacija brzine vrtnje asinkronih motora“, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2022., završni rad.
- [2] J. Larabee, B. Pellegrino, B. Flick, „Induction Motor Starting Methods and Issues“, Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Denver, CO, USA, 2005, pp. 217-222
- [3] K. Pillay, M. Nour, K. H. Yang, D. N. Datu Harun i L. K. Haw, "Assessment and comparison of conventional motor starters and modern power electronic drives for induction motor starting characteristics," 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009, pp. 584-589
- [4] Zureks, „Three-phase autotransformer starter“, Wikimedia Commons, Public Domain, 01.02.2025., <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8973047>