
Radovan Radosavljević ¹⁾, Jelena Krstović ²⁾, Petar Kujundžić, Veljko Lukić

Primer vazdušne energetske prigušnice za zaštitu transformatora od struje kratkog spoja, primenjen u praksi

Rezime:

U radu će biti opisana vazdušna energetska prigušnica kao element elektroenergetskog sistema, čija je namena da zaštiti transformator od struja kratkih spojeva ograničavanjem njenih vrednosti na unapred zadatu prihvatljivu vrednost. I pored ulaganja u izradu prigušnice, efektivno se postižu značajne uštede investicionog ulaganja pri dimenzionisanju druge opreme u EES, naročito kada su u pitanju sklopni aparati. Pored opisa glavnih karakteristika vazdušnih prigušnica i standardnih rešenja ugradnje, detaljno će se izložiti i metodologija proračuna. Kompletan postupak će biti ilustrovan sa rezultatima proračuna trofazne vazdušne prigušnice u vertikalnom sklopu, prema kome je ona i proizvedena 2001. godine i instalisana u postrojenju 6,3 kV sa transformatorom od 10 MVA u „TE Kolubara“, Veliki Crljeni. Izložiće se i procedura ispitivanja sa kompletnim ispitnim rezultatima. Kao dodatak, daće se prikaz raspodele magnetskog polja u ravni i provera proračunatih vrednosti induktivnosti, pomoću softverskog alata FEMM.

Ključne reči: prigušnica, induktivnost, kratak spoj, dinamička sila

Abstract:

PROTECTION OF TRANSFORMER FROM SHORT CIRCUIT CURRENTS BY USE OF AIR CORE REACTOR

This topic deals with an air core reactor as an element of electrical power system used for protection of power transformer from short circuit currents by limitation of its parameters to predefined acceptable value. Besides investments in production of air core reactor, significant savings are made in investments related to design of other equipment in the Electrical Power System, especially when switching devices are concerned.

Besides description of main characteristics of air core reactors and standard installation solutions, calculation methodology will be given in detail. Complete procedure is illustrated with calculation results for three-phase air core reactor in vertical assembly. The reactor was manufactured in year 2001., installed in the TE "Kolubara", Veliki Crljeni, substation 6,3 kV with 10 MVA power transformer. Furthermore, testing procedure is presented with complete testing results. In addition, distribution of magnetic field in plane is given as well as specific presentations of distribution of flux density in radial and axial directions.

Key words: reactor, inductances, short circuit, dynamic force

1. UVOD

Prigušnice (PR) kao i transformatori (TR) su osnovni elementi u proizvodnji prenosu i distribuciji električne energije. PR imaju vrlo široku primenu u električnim postrojenjima svih nominalnih napona, na različitim mestima i sa različitim funkcijama. Kriterijumi za

klasifikaciju PR po grupama su veoma različiti, a razlog tome je raznovrsna primena i veliki spektar različitih karakteristika. Definicija tipova i oblasti primene PR dati su u međunarodnom standardu IEC 60076-6.

Generalno se može reći da je PR (kalem, solenoid, reaktor) induktivni namotaj koji

svojim induktivnim otporom može da ograniči, priguši ili reguliše struje kvara, najčešće struje kratkog spoja (SKS) ili uklopnih operacija. PR je po svojoj prirodi pasivna električna komponenta koja akumulira energiju u magnetskom polju prouzrokovanom od struje u namotaju. Ova energija se meri njenom induktivnošću kao posledica tog magnetskog polja. Takođe se može reći da je induktivnost mera količine elektromotorne sile generisane po jediničnoj promeni struje. Magnetski fluks koji namotaj stvara može se povećati tako što će se namotaj staviti oko gvođenog jezgra, koje ima znatno veću magnetnu provodnost od vazduha, pa samim tim se induktivnost namotaja može povećati. Međutim ako induktivni otpor PR treba da bude konstantne vrednosti u svim režimima rada onda namotaj treba da ima vazdušno jezgro, pa se zato u praksi naziva vazdušna PR, koja u elektroenergetskom sistemu predstavlja pasivni element.

2. PRIMENA PRIGUŠNICA U ELEKTROENERGETSKOM SISTEMU

Na osnovu uloge koju PR imaju u elektroenergetskom sistemu (EES), opšta podela je na linearne i šantne. Linearne ili serijske PR najčešće se koriste za ograničenje struje kvara i u opštem slučaju izrađuju se sa vazdušnim jezgrom i serijski se uključuju sa uređajem koga štite. Imaju stalnu vrednost induktivnog otpora. Šantne prigušnice svojom reaktansom mogu da kompenzuju kapacitivne struje koje se javljaju kod dugačkih vazdušnih vodova i kablova ili specijalnim ispitnim uređajima i vezuju se između faznog provodnika i zemlje. Kako ove PR rade u paraleli sa sistemom, one ne trpe SKS, ali su izložene prenaponima, pa zato moraju biti dimenzionisane na izolacioni nivo sistema. Rade se kao vazdušne ili sa gvođenim jezgrom, a induktivnost definiše broj navojaka, prečnik namotaja i odnos magnetskog fluksa koji se zatvara u vazdušnim procepima i u samom jezgru.

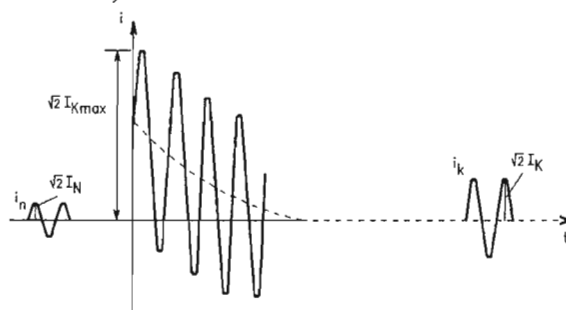
Najveću primenu energetske PR u EES imaju za:

- ograničenje SKS
- uzemljenje neutralne tačke mreže („veštačka nula“)
- ograničenje struje zemljospoja
- ograničenje uklopne struje kondenzatora
- startovanje asinhronih motora

- prenos telekomunikacionih signala, tzv. VF prigušnice
- kompenzaciju kapacitivnih struja, itd.

3. VAZDUŠNE ENERGETSKE PRIGUŠNICE

Vazdušna PR je samoinduktivni kalem sa vazdušnim jezgrom čija je osnovna karakteristika konstantna vrednost induktivnosti, kako u normalnom režimu tako i u režimu kratkog spoja. U slučaju da je jezgro gvođeno, velika SKS bi dovela do zasićenja jezgra što bi za posledicu imalo značajno smanjenje impedanse prigušnice i to onda kada je ta impedansa najpotrebnija. U električnom pogledu PR se može definisati svojim koeficijentom samoindukcije (L) i nominalnom strujom (I_n) u normalnom radnom režimu. Tema ovog rada su vazdušne energetske PR za zaštitu TR od SKS, ne zalazeći u teorijsko tumačenje pojave koje se dešavaju u režimu kratkog spoja niti o vrstama kratkog spoja zavisno od toga da li je zvezdište sistema uzemljeno ili ne, niti o trenutka kada kratak spoj nastaje. Navodimo samo dominantne veličine. Osnovne karakteristične veličine SKS, ilustrovane slikom 1, su:



Slika 1. Dijagram struje kratkog spoja

I_n (A) – nominalna struja sistema

$I_{k \max}$ (kA) – maksimalna efektivna vrednost odnosno udarna SKS koja predstavlja aperiodičnu komponentu sastavljenu od jednosmernog i naizmeničnog člana. Njena vrednost je najveća u trenutku kada napon prolazi kroz nulu, jer se tada pojavljuje maksimalna jednosmerna komponenta u prelaznom periodu izraženom u sekundama. Kao posledica ove struje javljaju se velika dinamička i termička naprezanja koja mogu dovesti do velikog oštećenja opreme. Ova struja je merodavna za proveru PR na dinamičko nap

I_k (kA) – ustaljena ili trajna SKS koja predstavlja periodičnu sinusnu struju čija je amplituda oko (20÷25) puta veća od amplitude nominalne struje. Ona je merodavna za proveru PR na termičko naprezanje, koje je manje opasno od dinamičkog.

t_k (s) – vreme trajanja kratkog spoja

Relacija koja povezuje maksimalnu i ustaljenu

vrednost SKS glasi: $I_{k\max} = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$

Međunarodni standard IEC 60353 preporučuje standardne vrednosti nominalnih struja i induktivnosti, tabela 1:

I_n (A)	630	800	1000	1250	1600 i više
I_k (kA)	16	20	25	31,5	40
$I_{k\max}$ (kA)	41	51	64	80,5	102
L (mH)	0,1 ÷ 1				

4. MOGUĆA REŠENJA ZA PREKIDANJE I OGRANIČENJE STRUJE KRATKOG SPOJA

Problem prekidanja SKS se standardno rešava pomoću sklopnih aparata i osigurača velike snage. Pored dobrih karakteristika, ovi prekidni elementi imaju i određene mane, kao što su:

- Prekidači su vrlo skupi za izradu i održavanje i imaju ograničeno vreme trajanja i rada i ne mogu prekinuti struju pre prvog prolaska strujnog talasa kroz nulu.

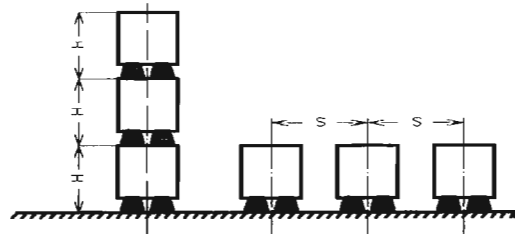
- Osigurači imaju malu podnošljivu struju i moraju se često menjati.

Problem ograničavanja SKS se može rešavati na nekoliko načina od kojih svaki ima prednosti, a takođe i mane. Jedan od načina je instalacija TR velike impedanse kratkog spoja u_k (%), ali koji zbog povećanih gubitaka čini sistem nestabilnim. Drugi način je upotreba vazdušne PR serijski vezane sa TR koja omogućava dimenzionisanje prekidača manjom snagom, jer je investicija za izradu prigušnice manja od cene za zamenu ili izradu novog prekidača. Za inženjere koji se u praksi bave ovim problemom veoma je važno da budu upoznati sa tehnikama ograničavanja SKS, posebno sa karakteristikama i osobinama vazdušne PR kao tehničko-ekonomski najprihvatljivijeg i najefikasnijeg rešenja za ograničavanje SKS i zaštite TR od oštećenja.

5. VAZDUŠNA PRIGUŠNICA KAO ZAŠTITA TRANSFORMATORA OD OŠTEĆENJA USLED UDARA STRUJE KRATKOG SPOJA

Kvarovi u EES se često javljaju i ne mogu se izbeći. Osim štete koja nastaje u blizini kvara (zbog dejstva električnog luka), struja kvara koja teče od izvora do mesta kvara izaziva velika termička i dinamička naprezanja opreme, kao što su kablovi, nadzemni vodovi, sklopni aparati, TR i drugi elementi. Sa druge strane priključenje novih izvora napajanja na lokalnu distributivnu mrežu, kao i povećanje proizvodnje električne energije i povezivanje nekoliko mreža, ima za posledicu povećanje vrednosti SKS, koja nije bila planirana u prethodnoj dugoročnoj prognozi. Posebno, stalan porast proizvodnje električne energije ima za posledicu, da postojeće mreže prevazilaze granice svoje tehničke mogućnosti. Dakle, uvođenje vazdušne PR (CLR – Current Limiter Reactor) u sistem omogućava funkcionalnost prekidača čak i kada struja kvara prelazi prethodno predviđenu maksimalnu vrednost prekidne struje.

Tako se zamena opreme može izbeći ili u krajnjem slučaju odložiti za kasnije. U slučaju novo planiranih mreža PR omogućavaju korišćenje opreme sa nižim nominalnim električnim parametrima, što dovodi do značajne finansijske uštede. Negativni efekti PR u mreži, kao što su pad napona i Džulovi gubici su ekonomski prihvatljiviji i lakši za otklanjanje u odnosu na zamenu prekidača sa većom prekidnom snagom ili TR veće snage. Vazdušne PR za ograničenje SKS ima smisla ugrađivati samo ako je na taj način moguće koristiti rasklopne aparate manje prekidne snage, jer su u suprotnom slučaju uštede male. Uglavnom se ugrađuju u razvodna postrojenja za nominalne napone do 35 kV, nominalne struje do 1 kA i koeficijenta magnetske sprege 4 do 6 %. Izrađuju se kao monofazne ili trofazne izvedene u vertikalnom ili horizontalnom sklopu, slika 2.



Slika 2. Vertikalni i horizontalni sklop trofazne prigušnice

Tipičan slučaj primene vazdušne PR je trafo stanica sa dva TR velikih snaga, koji su predviđeni da rade paralelno, slika 3. Struja trofaznog kratkog spoja na jednoj od sekcija sabirnice je:

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{X_T \parallel (X_T + X_P)}$$

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_T + X_T + X_P}{X_T \cdot (X_T + X_P)}$$

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 + X_P / X_T}{X_T + X_P}$$

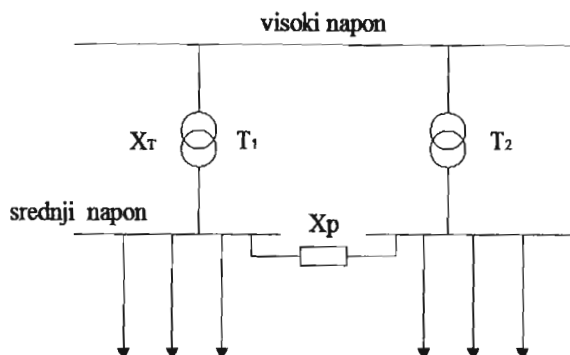
Brojni primer: $U_n = 6,3 \text{ kV}$, $X_T = 0,2 \Omega$,
 $X_P = 0,4 \Omega$

Bez prigušnice, $X_P = 0 \Omega$:

$$I_k = \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2}{0,2} = 36,37 \text{ kA}$$

Sa prigušnicom, i $X_P = 0,4 \Omega$:

$$I_k = \frac{6,3}{\sqrt{3}} \cdot \frac{2 + 0,4/0,2}{0,2 + 0,4} = 24,24 \text{ kA}$$



Slika 3. Prigušnica postavljena u spojnom polju

PR induktivne otpornosti $0,4 \text{ } \Omega$ instalisana u spojnom polju sabirnica smanjuje SKS na obe sekcije, i omogućava primenu rasklopne opreme za manje snage. Smanjivanjem struje, smanjuju se i „propadi“ napona za vreme kvara, što utiče na poboljšanje kvaliteta napona u mreži za vreme kvarova.

6. KARAKTERISTIČNE ELEKTRIČNE VELIČINE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE

$U_n \text{ (V)}$ - nominalni napon mreže, koji određuje stepen izolacije namotaja

$I_n \text{ (A)}$ - nominalna struja, tj. trajno dozvoljena struja mreže

$X_P \text{ (}\Omega\text{)}$ - reaktansa prigušnice (po fazi trofazne) kako u normalnom pogonu, tako i pri kratkom spoju (pasivna komponenta

$I_{k \text{ max}}$ - udarna SKS koja definiše dinamičku otpornost prigušnice

$I_k \text{ (kA)}$ - jednosekundna, termička struja koja definiše termički impuls

$$I_k \cdot \sqrt{t_k}$$

$t_k \text{ (s)}$ - vreme trajanja kratkog spoja do isključenja uređaja

$u_k \text{ (\%)}$ - napon kratkog spoja ili faktor magnetske sprege

Osnovne relacije za izračunavanje električnih veličina PR:

$$\Delta U \text{ (V)} = X \cdot I_n$$

$$X \text{ (}\Omega\text{)} = \omega \cdot L = 0,314 \cdot L$$

$$u_{kPR} \text{ (\%)} = \frac{\Delta U}{U_n / \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot X}{U_n} \cdot 100$$

$$X \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{u_k \text{ (\%)} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}$$

$$I_k \text{ (kA)} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \frac{u_k \text{ (\%)} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n}}$$

$$I_k \text{ (kA)} = I_n \cdot \frac{100}{u_k \text{ (\%)}}$$

7. ODREĐIVANJE PARAMETARA TROFAZNE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE ZA ZAŠTITU TRANSFORMATORA SNAGE 10 MVA OD STRUJA KRATKOG SPOJA

U razvodnom postrojenju u TE „Kolubara“ – Veliki Crljeni ugrađena je trofazna vazdušna PR domaće proizvodnje za zaštitu TR od SKS, čije su karakteristike, prikazane u tabeli 2.

Proračun parametara PR za ograničenje SKS na sabirnicama 6,3 kV, za planiranu snagu kratkog spoja na sabirnicama 110 kV mreže: $S_k = 4000 \text{ MVA}$, prikazan je na slici 4.

Trajna SKS, koju prigušnica treba da podnese je:

$$I_{K \max} = 2,54 \cdot 16,67 = 42,34 \text{ kA}$$

PR induktivnog otpora 0,218 Ω , smanjila je strujno opterećenje TR, na strani 6,3 kV sa 8,93 kA na 6 kA, što znači da i prekidač može da se odabere za 6 kA. Usvaja se trofazna PR, čije su karakteristike predstavljene u tabeli 3.

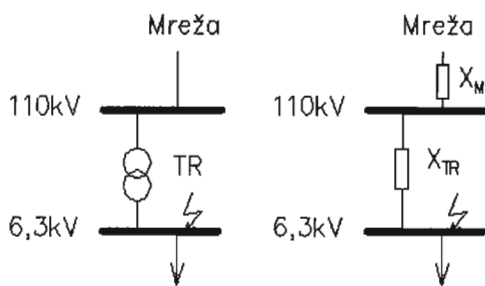
Tabela 2. Parametri transformatora koji se štiti prigušnicom

S_n (MVA)	U_1 / U_{20} (kV)	sprega	u_k (%)	I_1 / I_2 (A)
10	110 / 6,3	Yd5	11	52,48 / (529) 916,43 \rightarrow 1000

Tabela 3. Parametri proračunate prigušnice

U_n (kV)	I_n (A)	X (Ω)	u_k (%)	L (mH)	I_k / t_k (kA/s)
6,3	1000	0,218	6	0,7	17 / 2

Transformator bez prigušnice:



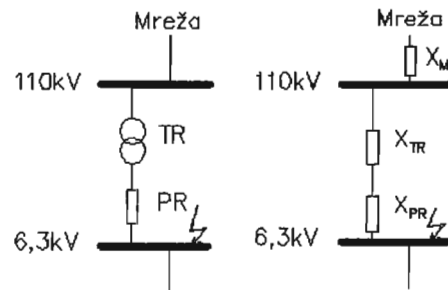
$$X_M = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_k''} = \frac{1,1 \cdot 6,3^2}{4000} = 0,011 \Omega$$

$$X_{TR} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{TR}''} = \frac{11}{100} \cdot \frac{6,3^2}{10} = 0,437 \Omega$$

$$X_e = X_M + X_{TR} = 0,011 + 0,437 = 0,448 \Omega$$

$$I_k = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_e} = \frac{1,1 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,448} = 8,93 \text{ kA}$$

Transformator sa prigušnicom ($u_{kPR} = 6\%$):



$$X_{PR} = \frac{u_{kPR}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 1} = 0,218 \Omega$$

$$L = \frac{0,218}{0,314} = 0,694 \rightarrow 0,7 \text{ mH}$$

$$X_e = X_M + X_{TR} + X_{PR}$$

$$X_e = 0,011 + 0,437 + 0,218 = 0,666 \Omega$$

$$I_k = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_e} = \frac{1,1 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,666} = 6 \text{ kA}$$

Slika 4. Proračun struja kratkog spoja u slučaju bez prigušnice i sa postavljenom prigušnicom

8. PROJEKTOVANJE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE

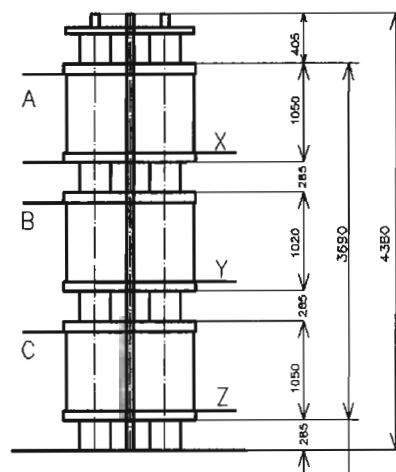
Cilj projektovanja prigušnice je određivanje svih tehnički relevantnih parametara, potrebnih za izradu konstrukcione dokumentacije, potrebne za proizvodnju. Proračun PR se sastoji iz tri dela: električnog, termičkog i dinamičkog. Električni proračun se uvek svodi na izračunavanje induktivnosti, pošto se prethodno usvoje vrednosti za N , D_{SR} , provodnik i dimenzije namotaja. Problem koji se ovde javlja je postojanje velikog broja različitih vrednosti za parametre N i D , koji definišu PR, pri čemu je njihova međuzavisnost nelinearna i mnogostruka. Da bi se našle optimalne vrednosti parametara N i D sa aspekta minimalne težine, koji će zadovoljiti sve električne, termičke i dinamičke uslove, potrebno je uraditi što je moguće veći broj kombinacija parametara N i D . Ako se od ručno obrađenih iteracija izabere ona najbolja sa aspekta nekog kriterijuma (dimenzija, masa, zagrevanje namotaja) postavlja se pitanje da li je to rešenje najbolje, jer postoji mnogo neobrađenih kombinacija za čiju bi obradu trebalo veliko strpljenje, umešnosti i vremena. Danas se to uspešno postiže korišćenjem određenog softverskog programa.

Termički proračun se svodi na proveru zagrevanja namotaja pri trajnoj nominalnoj struji, koje treba da bude ispod 100 K, ako se PR radi sa izolacionim materijalima termičke klase F (155 °C). Kako je PR u režimu kratkog spoja izložena mnogostruko povećanoj struji od nominalne, potrebno je namotaj proveriti na termički impuls $I_k \cdot \sqrt{t_k}$. Dinamički proračun se svodi na izračunavanje dinamičkih naprezanja i proveru mehaničke otpornosti namotaja, a takođe i izolatora, postavljenih između namotaja.

9. IZRADA TROFAZNE VAZDUŠNE PRIGUŠNICE

Za ograničenje SKS na sekundarnoj strani TR snage 10 MVA na sabirnicama 6,3 kV instalisanog u TE „Kolubara“ primenjena je trofazna vazдушna PR izvedena u vertikalnom sklopu čije su karakteristike određene u odeljku 7, a dispozicija prikazana na slici 5. Namotaji postavljeni koaksijalno jedan iznad drugog na istom prečniku, cilindričnog su oblika i spiralno namotani sa masivnim

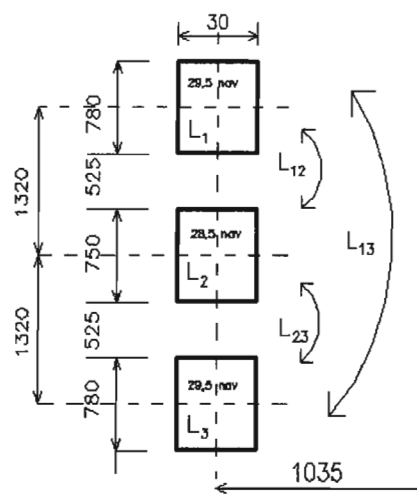
profilnim provodnikom 30 x 22 mm od aldreja (legura Al Mg Si-0,5) na srednjem prečniku od 1035 mm, slika 6. Gornji i donji namotaj imaju po 29,5 navojaka, a srednji 28,5 nav. Namotanih još pola navojaka omogućava da izlazni priključak bude na suprotnoj strani od ulaznog, što je povoljnije za razvod u postrojenju. Provodnici su po visini odvojeni odstojnicima od lexana, debljine 5 mm, i namotaj ima dobro vazdušno hlađenje, slika 7. Aksijalno stezanje namotaja se postiže pomoću laminatnih prstenova i aluminijumskih krstova povezanih sa laminatnim zategama. Na taj način je postignuto odlično pritezanje namotaja. Rastojanje između namotaja od 285 mm (slika 5) je postignuto pomoću porcelanskih potpornih izolatora SI - 12 raspoređenih 6 komada po obimu. Visine gornjeg i donjeg namotaja su $h_1 = h_3 = 780$ mm, a srednjeg $h_2 = 750$ mm, a debljine namotaja su $a = 30$ mm. Namotaji trofazne PR u vertikalnom sklopu su elektromagnetski spregnuti pa su ekvivalentne induktivnosti pojedinih faza veće od induktivnosti monofaznih jedinica. Da bi se dobili jednaki naponi u sve tri faze PR, namotaj srednje faze je namotan sa jednim navojkom manje i suprotnog smera motanja od gornjeg i donjeg namotaja, čime se postiže još jedan efekat, a to je smanjenje naprezanja na pritisak izolatora srednje faze, umesto naprezanja na istežanje koje takođe u proračunu mora da se proveriti.



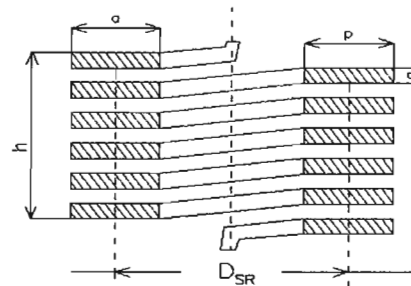
Slika 5. – Dispozicija prigušnice

10. PRORAČUN PRIGUŠNICE

Relacije, koje se koriste za izračunavanje električnih, termičkih i dinamičkih veličina sa računskim vrednostima su prikazane na slikama 8 a) i b), 12, 13.



Slika 6. Dimenzije vertikalnog sklopa



Slika 7. Sistem spiralnog motanja namotaja

Električni proračun – Proračun induktivnosti:

Samoinduktivnosti i dimenzioni koeficijent gornjeg i donjeg namotaja, u vertikalnom sklopu :

$$L_1 = L_3 = N_1^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-6} = 0,711 \text{ mH} \quad \lambda_1 = 7,9$$

Samoinduktivnost i dimenzioni koeficijent srednjeg namotaja, u vertikalnom sklopu:

$$L_2 = N_2^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-6} = 0,680 \text{ mH} \quad \lambda_2 = 8,1$$

λ_1, λ_2 - dimenzioni koeficijenti dati na dijagramu, slika 9.

Provera induktivnosti pojedinačnih namotaja po relaciji Wheeler-a:

$$L_1 = L_3 = \frac{7,875 \cdot N_1^2 \cdot D_{SR}^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot D_{SR} + 9 \cdot h + 10 \cdot a} = 0,704 \text{ mH}, \quad L_2 = 0,674 \text{ mH}$$

Međuinduktivnosti srednjeg sa gornjim i donjim namotajem, kao i gornjeg i donjeg namotaja:

$$L_{12} = L_{32} = N_1^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_{12} \cdot 10^{-6} = 0,045 \text{ mH} \quad L_{13} = N_2^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_{13} \cdot 10^{-6} = 0,0063 \text{ mH}$$

Dimenzioni koeficijenti za računanje međuinduktivnosti, dati na slici 10 :

$$\lambda_{12} = 0,5, \quad \lambda_{13} = 0,075$$

Koeficijenti elektromagnetske sprege:

$$u_x = \frac{\Delta U \cdot \sqrt{3}}{U_n} \cdot 100 = 6,29 \%$$

$$k_{12} = k_{23} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{1e} \cdot L_{2e}}} \cdot 100 = 6,18 \%$$

$$k_{13} = \frac{L_{13}}{\sqrt{L_{1e} \cdot L_{3e}}} \cdot 100 = 0,86 \%$$

Ekvivalentne induktivnosti svakog od namotaja, računane uzimajući u obzir i međuinduktivnosti:

$$L_{1e} = L_{3e} = \left[L_1 + \frac{L_{12} - L_{13}}{2} \right] = 0,73 \text{ mH} \quad L_{2e} = [L_2 + L_{12}] = 0,681 + 0,045 = 0,726 \text{ mH}$$

Slika 8. a) Električni proračun: Proračun induktivnosti

Električni proračun:

Reaktanse sva tri namotaja, na osnovu proračunatih samoinduktivnosti:

$$X_1 = X_3 = \omega \cdot L_1 = 0,223 \Omega \qquad X_2 = 0,2138 \Omega$$

Padovi napona na svakom od namotaja, računati za nominalnu struju:

$$\Delta U_1 = \Delta U_3 = X_1 \cdot I_n = 223 V \qquad \Delta U_2 = 213,8 V$$

Reaktanse sva tri namotaja, na osnovu proračunatih ekvivalentnih induktivnosti:

$$X_{1e} = X_{3e} = 0,314 \cdot L_{1e} = 0,229 \Omega \qquad X_{2e} = 0,314 \cdot L_{2e} = 0,228 \Omega$$

Padovi napona, računati za ekvivalentne induktivnosti i reaktanse i nominalnu struju:

$$\Delta U_1 = \Delta U_3 = X_{1e} \cdot 1000 = 229 V \qquad \Delta U_2 = X_{2e} \cdot 1000 = 228 V$$

Aktivni otpori namotaja:

$$R_{1_{20^\circ C}} = R_3 = \frac{1}{30,5} \cdot \frac{\pi \cdot D_{SR} \cdot N_1}{S_{Ald}} \cdot 10^{-3} \cdot k_{f_{120}} = 4,765 \cdot 10^{-3} \cdot 1,97 = 9,38 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{2_{20^\circ C}} = 4,603 \cdot 10^{-3} \cdot 1,98 = 9,11 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Ukupne mase svakog od namotaja:

$$m_1 = m_3 = 2,7 \cdot \pi \cdot D_{SR} \cdot N_1 \cdot S_{ald} \cdot 10^{-6} = 171 \text{ kg} \qquad m_2 = 165 \text{ kg}$$

Provera srednjeg prečnika može da se uradi po sledećoj relaciji:

$$D_{SR} = 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a+h)^{0,428} = 107,5 \text{ cm} \rightarrow \text{usvojeno } 1035 \text{ mm}$$

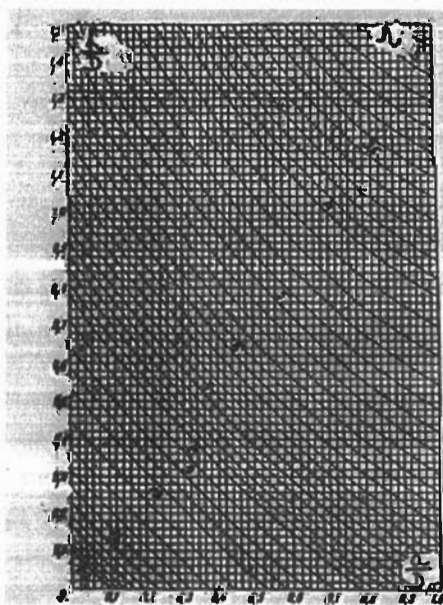
Fildov sačinilac za profilisani oblik provodnika:

$$k_{f_1} = 1 + 0,0173 \cdot m^2 \cdot \left(\frac{N \cdot q}{h}\right)^2 \cdot p^4 = 1,97$$

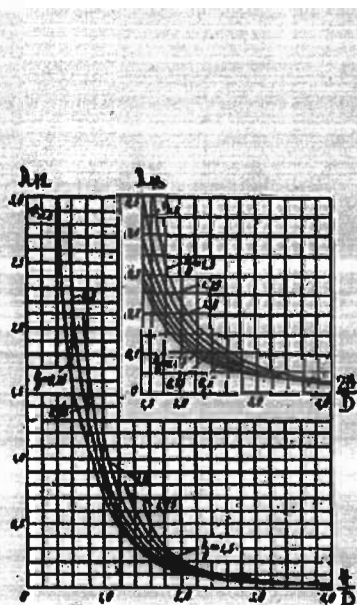
Generisana snaga gubitaka:

$$P_1 = P_3 = 16,53 \cdot m_1 \cdot \Delta_1^2 \cdot k_{f_1} = 12781 W \qquad P_2 = 12395 W$$

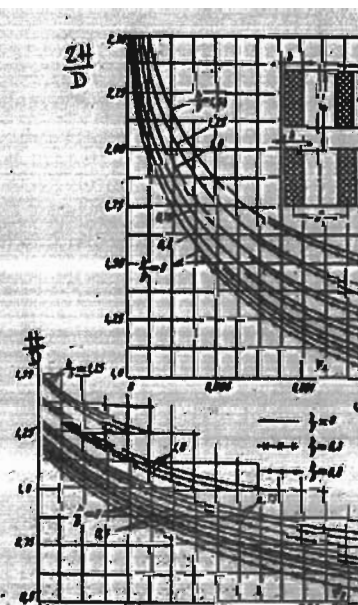
Slika 8. b) Električni proračun



Slika 9. Dijagram λ



Slika 10. Dijagram $\lambda_{12}, \lambda_{13}$



Slika 11. Dijagram Ψ_{12}

Termički proračun:

Ekvivalentne površine namotaja sa kojih se temperatura odvodi strujanjem i zračenjem:

$$S_{STR} = 2 \cdot \pi \cdot D_{SR} \cdot N \cdot (q + 0,8 \cdot p) = 8,824 \text{ m}^2 \quad S_{ZR} = \pi \cdot D_2 \cdot h = 2,609 \text{ m}^2$$

Nadtemperatura namotaja:

$$\Delta\theta_1 = \frac{P_{120}}{13 \cdot S_{STR} + 7 \cdot S_{ZR}} = 97 \text{ }^\circ\text{C} \quad \Delta\theta_1 \approx \Delta\theta_2$$

Temperatura namotaja, čineći pretpostavku da je temperatura ambijenta $v_{amb} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\theta_1 = \Delta\theta_1 + 40(^\circ\text{C})$$

Termička izdržljivost namotaja:

$$I_K \cdot \sqrt{t_K} = S_{Ald} \cdot \sqrt{\frac{0,02246}{k_F} \ln \frac{1,7236}{1 + 0,00361 \cdot \theta_1}} = 26,62 > 17 \cdot \sqrt{2} \quad - \text{zadovoljen uslov}$$

Slika 12. Proračun prigušnice na termička naprezanja

Dinamički proračun:

Maksimalna struja kratkog spoja:

$$I_{K \max} = 2,54 \cdot I_k = 43,18 \text{ kA}$$

Maksimalna aksijalna dinamička sila:

$$F_{A \max} = I_{k \max}^2 \cdot 0,0705 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{h / D_{SR}}{\sqrt{4(h / D_{SR})^2 + 1}} = 20,51 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

Rastojanje između podmetača:

$$l = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot q^2 \cdot \sigma_{sav}}{F_{A \max}}} = 16,82 \text{ cm}$$

, a usvojeno je $l = 13,548 \text{ cm}$ i 24 podmetača dimenzija (5x30x25)mm

Naprezanje provodnika na savijanje:

$$\sigma_{sav} = \frac{F_{\max} \cdot l^2}{2 \cdot p \cdot q^2} = 130 < (300 \leftrightarrow 500) \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \quad - \text{zadovoljen uslov}$$

Maksimalna radijalna dinamička sila:

$$F_{R \max} = I_{k \max}^2 \cdot 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{h / (2 \cdot D_{SR})}{\sqrt{4(h / 2 \cdot D_{SR})^2 + 1}} = 27 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

Naprezanje provodnika na kidanje:

$$\sigma_{kid} = \frac{F_{R \max} \cdot D_{SR}}{2 \cdot S_{Ald}} = 212 < (800 \leftrightarrow 1200) \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \quad - \text{zadovoljen uslov}$$

$$\text{Dimenzioni koeficijent: } \Psi = 0,1574 \cdot \frac{h / D_{SR}}{\sqrt{4 \cdot (h / D_{SR})^2 + 1}} = 0,064$$

Maksimalna podnosiva struja kratkog spoja:

$$I_{k \max} = 11 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{Ald} \cdot h \cdot m}{N_1 \cdot l \cdot \Psi}} = 49,34 > 43,18 \text{ kA} \quad - \text{zadovoljen uslov}$$

Slika 13. Proračun prigušnice na dinamička naprezanja

11. PROVERA IZOLATORA NA DINAMIČKO NAPREZANJE

Izolaciono rastojanje između faznih namotaja ostvareno je pomoću 6 potpornih izolatora Si – 12, postavljenih po obimu namotaja. U toku kratkog spoja, između namotaja susednih faza vertikalno postavljenih deluju dinamičke aksijalne sile, koje zavise od dimenzija namotaja, međusobnog rastojanja i rezultantnog magnetskog fluksa. Ove sile se periodično menjaju između ekstremnih vrednosti na istežanje i sabijanje izolatora, što zavisi od smera magnetskog fluksa odnosno od usvojenih referentnih smerova motanja namotaja. U slučaju da su sva tri namotaja motana u istom smeru, dinamička sila na istežanje izolatora je oko tri puta veća od sile na sabijanje izolatora. Međutim pošto je poznata karakteristika potpornih izolatora da su otporniji na sile sabijanja, to je još jedan razlog za motanje srednjeg namotaja u suprotnom smeru od gornjeg i donjeg namotaja, jer je u tom slučaju sila sabijanja oko tri puta veća od sile istežanja, što se vidi iz sledećih relacija:

$$F_{ist} = 0,25 \cdot I_{k \max}^2 \cdot N^2 \cdot \Psi_{12}$$

$$F_{sab} = 0,75 \cdot I_{k \max}^2 \cdot N^2 \cdot \Psi_{12}$$

Ukupna sila istežanja je:

$$F_{ist} = 0,25 \cdot (43,18 \cdot 10^3)^2 \cdot \left(\frac{29,5 + 28,5}{2}\right)^2 \cdot 10^{-8}$$

$$F_{ist} = 3920 \text{ kp}$$

Sila istežanja na jednom izolatoru je:

$$F_{ist \text{ izol}} = \frac{3920 - (240 + 4 \cdot 6)}{6} = 610$$

$$F_{ist \text{ izol.}} = 610 < 640 \text{ kp} \text{ - uslov je zadovoljen}$$

Ukupna sila sabijanja je:

$$F_{sab} = 0,75 \cdot (43,18 \cdot 10^3)^2 \cdot 29^2 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6}$$

$$F_{sab} = 11755 \text{ kp}$$

Sila sabijanja na jednom izolatoru:

$$F_{sab \text{ izol}} = \frac{11755 + 2 \cdot 264}{6} = 2048 \text{ kp}$$

$F_{sab \text{ izol.}} = 2048 < 3000 \text{ kp}$ - uslov je zadovoljen.

Dimenzioni koeficijent Ψ_{12} , određen sa dijagrama slika 11:

$$\Psi_{12} = f\left(\frac{h}{D_{SR}}, \frac{H}{D_{SR}}\right) = 0,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kp}}{\text{A}^2}$$

$$I_{k \text{ izol}} = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\frac{F_{sab \text{ izol}} \cdot 6 - 2 \cdot (1,4 \cdot m_1 + 4 \cdot 6)}{0,75 \cdot \Psi_{12}}}$$

$$I_{k \text{ izol.}} = 43,103 \text{ kA}$$

Ukupne težine PR:

$$m_{1PR} = m_{3PR} = 1,4 \cdot 171 = 240 \text{ kg}$$

$$m_{2PR} = 1,4 \cdot m_2 = 1,4 \cdot 165 = 231 \text{ kg}$$

$$m_{PR} = 2 \cdot 240 + 231 + 22 \cdot 6 = 843 \rightarrow 850 \text{ kg}$$

Dimenzije prigušnice su:

$$\phi 1065 \times 4380$$

Na osnovu rezultata proračuna može se zaključiti da su svi tehnički uslovi ispunjeni, posebno da su postignute jednake reaktanse i padovi napona namotaja, što je bio zadatak proračuna. Ispitivanja, koja su sprovedena na PR potvrdila su računске vrednosti.

12. ISPITIVANJE PRIGUŠNICE

Prigušnica, izvedena u realnom trofaznom vertikalnom sklopu, čija je dispozicija prikazana na slici 5, je ispitana u ispitnoj stanici proizvođača u skladu sa međunarodnim standardom IEC 60076-6. **Merenja reaktansi** su urađena za dva karakteristična slučaja: jednofazno napajanje svakog namotaja i trofazno napajanje sklopa. U oba slučaja primenjena je U-I metoda. Cilj ovih merenja je bio određivanje reaktanse prigušnica pojedinačno, kao i određivanje međusobnih induktivnosti i vrednosti koeficijenata elektromagnetske sprege između pojedinih namotaja. Pri monofaznom napajanju prigušnice merena je struja, pad napona i aktivna snaga, a istovremeno su mereni naponi i na ostale dve prigušnice da bi se odredio koeficijent elektromagnetske sprege između namotaja. Relacije za izračunavanje induktivnosti i međuinduktivnosti su bile:

$$L \text{ (mH)} = \frac{\sqrt{U^2 - R^2 \cdot I^2}}{314 \cdot I} \quad \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

$$R \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{P}{I^2} \quad L_{12} \text{ (mH)} = \frac{U_{12}}{\omega \cdot I_1}$$

$$k_{12} = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

, gde je U_{12} (V) napon izmeren na prigušnici 2, kada kroz prigušnicu 1 protiče struja I_1 .

Cilj trofaznog merenja bio je određivanje ekvivalentnih vrednosti reaktansi prigušnica u vertikalnom sklopu, pri trofaznom napajanju što najviše odgovara realnoj situaciji u kojoj će prigušnica biti u pogonu. Prigušnice su trofazno napajane, a vezane su u zvezdu. Merena je struja kroz prigušnicu, pad napona na PR i aktivna snaga, a izračunavanje je bilo prema navedenim relacijama. Rezultati merenja vrednosti sopstvene induktivnosti i aktivnog otpora namotaja 1, 2, i 3 sprovedeno je napajanjem jednofaznom naizmeničnom strujom. Rezultati merenja vrednosti međuinduktivnosti, koeficijenta sprege između susednih namotaja i aktivne otpornosti, sprovedeno trofaznim napajanjem, prikazano je uporedno sa računskim vrednostima u tabeli 4. a), b), c).

Na PR je urađen **ogled zagrevanja**, čiji je cilj bio određivanje maksimalnih temperatura do kojih se zagrevaju namotaji pri nominalnoj struji, odnosno maksimalnih porasta temperatura u odnosu na ambijent. Namotaji montirani u trofaznom vertikalnom sklopu bili su vezani na red (slika 14). U nedostatku odgovarajućeg strujnog izvora naizmenične struje PR su opterećene jednosmernom punovalnom ispravljenom strujom nominalne vrednosti 1000 A.

Detaljna merenja temperature izvedena su na namotaju 1, pošto je on najviši i najviše se zagreva. Merenja su izvedena termoparovima koji su preko instrumenta "HP34970A" vezani na PC računar, tako da je omogućena trajna registracija vrednosti temperature. Termoparovi su postavljeni u tri karakteristične tačke namotaja 1 (najvišem, srednjem i najnižem navojku) i dve tačke okolnog ambijenta (na 1 m od poda i 1 m od prigušnice 3, i na polovini visine namotaja, 1 m od namotaja 1. Na namotajima 2 i 3 su takođe merene temperature kontaktnim termometrom. Tabela prikaz vrednosti temperatura izmerenih u pojedinim tačkama (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5) nećemo ovde prikazati zbog ograničene dužine teksta rada. Maksimalna vrednost

povišenja temperature namotaja 1 u tački T_5 je prema izmerenim temperaturama u tačkama T_5 i T_3 :

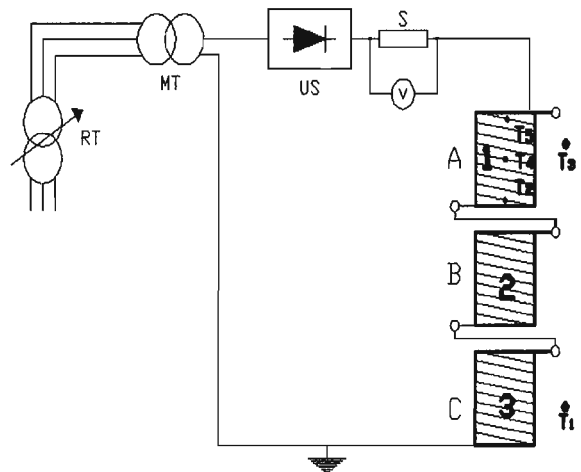
$$\theta_{T5\max} = 109,06^\circ\text{C} \quad \theta_{T3\text{amb}} = 25,57^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = \theta_5 - \theta_3 = 83,49 \text{ K}$$

Na prigušnici je takođe izvršeno merenje otpora namotaja pri jednosmernoj struji pomoću dva Tompsonova merna mosta i digitalnim miliometrom. Otpori namotaja su mereni pre početka ogleda zagrevanja kada su namotaji bili na temperaturi ambijenta od $18,5^\circ\text{C}$ (tačka T_3) i oni su iznosili: $R_1 = 4,82 \text{ m}\Omega$, $R_2 = 4,37 \text{ m}\Omega$, $R_3 = 4,73 \text{ m}\Omega$.

Na osnovu ovih početnih temperatura i izračunate vrednosti otpora u trenutku isključenja struje prema poznatoj relaciji:

$$R(t) = A_0 + B_0 \cdot e^{-t/T}$$



Slika 14. – Električna šema za ogled zagrevanja prigušnice

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad \theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (\theta_1 + 278) - 278$$

$$\text{Namotaj 1: } R_2 = 6,35 \Omega, R_1 = 4,82 \Omega \\ \theta_1 = 18,5^\circ\text{C}, \theta_{\max} = 112,62^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{6,35}{4,82} \cdot (18,5 + 278) - 278 = 112,61^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = 112,61 - 18,5 = 94,11 < 100 \text{ K}$$

$$\text{Namotaj 2: } R_2 = 5,495 \Omega, R_1 = 4,37 \Omega \\ \theta_1 = 18,5^\circ\text{C}, \theta_{\max} = 94,83^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = \frac{5,495}{4,37} \cdot (18,5 + 278) - 278 = 94,83^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta = 94,83 - 18,5 = 76,33^\circ\text{C} < 100\text{ K}$$

Ovi rezultati pokazuju da vrednost maksimalne nadtemperature za namotaj 1, mereno metodom otpora, zadovoljava uslov koji postavlja standard.

Dielektričko ispitivanje prigušnice izvršeno je naizmeničnim naponom od 20 kV i to dovodenjem jedne PR pod ispitni napon od 20 kV, pri čemu je susedna PR bila uzemljena. Procedura je sprovedena na sve tri prigušnice. Na taj način je izvršeno ispitivanje izolatora koji su montirani na prigušnicama. Sve prigušnice su uspešno izdržale ispitivanje ovim naponom u trajanju od 1 minuta. Izolatori između namotaja su u normalnom radu izloženi linijskim naponima, pa su zato ponovljena ispitivanja potpornih izolatora Si-12, podnosivim naponom, 50 Hz od 28 kV, u trajanju od 1 minuta. Ovaj ispitni napon odgovara 12 kV na faznoj izolaciji, odnosno 7,2 kV na međufaznoj izolaciji, što je ovde slučaj.

Na osnovu rezultata ispitivanja, izveden je zaključak, da je:

1. izmerena induktivnost prigušnice u granicama tolerancije za ugovorenu vrednost:
 $L = 0,7 + 20\% = 0,84\text{ mH}$.
2. Omski otpor, izmeren jednosmernom

strujom odgovara očekivanim vrednostima.

3. PR je uspešno prošla ispitivanje grejanjem jednosmernom strujom, u znatno nepovoljnijim uslovima od onih koje ima u realnom pogonu, zbog blizine metalnog krova u hali u kojoj je ispitivana i koji onemogućava normalno strujanje vazduha. Test grejanja nije bilo moguće tehnički sprovesti sa naizmeničnom strujom, pa su gubici u namotajima nešto manji nego što bi bili pri grejanju naizmeničnom strujom, ali se ovaj efekat kompenzuje nepovoljnim uslovima hlađenja.

4. PR je uspešno prošla dielektričko ispitivanje naponom do 20 kV, a izolatori naponom od 28 kV, u trajanju od 1 minuta. Konačan zaključak je bio da je PR uspešno prošla sva ispitivanja zahtevana međunarodnim standardom IEC60076-6. Ovde mora da se napomene da dinamičko ispitivanje prigušnice i ispitivanje atmosferskim udarnim talasom nije sprovedeno iz razloga što su ova ispitivanja urađena na VF prigušnici nominalne struje 1250 A i induktivnosti 0,5 mH, koja ima isto konstruktivno rešenje i slične dimenzije kao namotaji koji su primenjeni kod ove prigušnice za ograničenje SKS. Prvo ispitivanje je obavljeno u laboratoriji snage u Krajevi, a drugo u Institutu Nikola Tesla. Oba ispitivanja je namotaj uspešno prošao, bez ikakvih naznaka za dielektrično i dinamičko oštećenje namotaja, o čemu se poseduje međunarodni atest.

TABELA 4

a) Rezultati računskih i merenih vrednosti pri jednofaznom napajanju prigušnice

NAMOTAJ	Računske vrednosti							Merenе vrednosti						
	L (mH)	X (Ω)	Međuinđuktivnosti (mH)				R (Ω)	L (mH)	X (Ω)	Međuinđuktivnosti (mH)				R (Ω)
1	0,711	0,223	L ₁₂	k ₁₂	L ₁₃	k ₁₃	9,33	0,697	0,2189	L ₁₂	k ₁₂	L ₁₃	k ₁₃	9,056
			0,0445	6,46	0,0063	0,88				nije moglo da se izmeri				
2	0,6809	0,223	L ₂₁	k ₂₁	L ₂₃	k ₂₃	9,062	0,649	0,2039	L ₂₁	k ₂₁	L ₂₃	k ₂₃	8,906
			0,0445	6,46	0,0445	6,46				0,0430	6,39	0,0465	6,92	
3	0,711	0,223	L ₃₁	k ₃₁	L ₃₂	k ₃₂	9,33	0,696	0,2186	L ₃₁	k ₃₁	L ₃₂	k ₃₂	8,953
			0,0063	0,88	0,0445	6,46				0,0056	0,8	0,0404		

b) Rezultati računskih i merenih vrednosti pri trofaznom napajanju prigušnice

NAMOTAJ	Računske vrednosti		Merenе vrednosti			
	L _c (mH)	X _c (Ω)	L _c (mH)	X _c (Ω)	ΔU (V)	R (Ω)
1	0,730	0,229	0,711	0,223	223	
2	0,726	0,228	0,685	0,215	215	10,02
3	0,730	0,229	0,717	0,225	225	9,06

c) Rezultati računskih i merenih vrednosti aktivnih otpora jednosmernom strujom

NAMOTAJ	R (Ω)		
	Računske vrednosti	Koeficijent spage	Merenе vrednosti
1	4,765	1,97	4,82
2	4,603	1,98	4,37
3	4,765	1,97	4,73

F10

13. ZAKLJUČAK

Energetske PR danas predstavljaju standardni i nezaobilazni element elektroenergetskog sistema. Kako u domaćoj stručnoj literaturi tako i u prezentovanim radovima na stručnim savetovanjima PR nisu dovoljno obrađene, bez detaljnog osvrta na projektovanje i probleme koji se tada javljaju. Za PR se može reći da su specijalni slučaj TR, pa malobrojnost literature o njima je upravo postojanje bogate literature o TR u kojoj se samo ukratko opisuju. Vazdušne PR se primenjuju kada se zahteva stalna vrednost induktivnog otpora u normalnom radnom režimu i režimu kratkog spoja ili pri uklopnim operacijama kondenzatora. Pošto one nemaju gvozdeno jezgro, projektovanje, konstrukcija i proizvodnja vazdušnih PR je jednostavnija od PR sa gvozdenim jezgrom.

U radu je detaljno opisana vazдушna PR čije su karakteristike 1000 A i 0,7 mH koja ima ulogu zaštite TR snage 10 MVA. Efekat primene ove PR bio je smanjenje struje kratkog spoja na 6,3 kV strani transformatora sa 9 kA na 6 kA, što znači za čitavih 34 %. Na taj način dozvoljena je upotreba prekidača i ostale opreme manje snage i time je postignuta znatna finansijska ušteda, što predstavlja osnovni razlog korišćenja PR. Pozitivni rezultati proračuna i ispitivanja, koji su u ovom radu prezentovani, potvrđeni su u praksi jer ova PR već oko 10 godina radi bez ikakvih problema u TE "Kolubara".




Ovaj rad može da posluži projektantima PR kao praktična baza za dalje usavršavanje metodologije projektovanja i razvijanje odgovarajućeg softvera za postizanje optimalnog rešenja sa aspekta minimalne težine, a time i skraćivanje vremena izrade.

14. LITERATURA

- [1] V. G. Sternin, A. K. Karpenskij: "Prigušnice za ograničenje struje", Moskva, 1965
- [2] P. L. Kalantarov, L.A. Cejtlin: "Proračun induktivnosti", Moskva, 1955

- [3] V.V. Mihajlov: "Proračun i konstrukcija visokonaponskih uređaja", Moskva, 1955
- [4] L.V. Leites: "Elektromagnetski proračun transformatora i prigušnica", Moskva 1981
- [5] V. Pinter: "Induktivni kalemovi za ograničenje struje kratkog spoja", Zagreb, 1980
- [6] J. Krstović: "Primene folijskog namotaja u cilju povećanja dinamičke otpornosti vazdušnih prigušnica. Praktične smernice za projektovanje i konstrukciju", JUKO-CIGRE, 2009
- [7] J. Krstović, R. Radosavljević: "Projektovanje distributivnih transformatora", Beograd, 2009J.
- [8] Krstović: "Projektovanje, konstrukcija i ispitivanje VF prigušnica", JUKO – CIGRE, 2005
- [9] P. Kujundžić: "Proračun i optimizacija vazdušnih energetskih prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja" – master rad, ETF-Beograd, 2010. god.
- [10] Ispitne metode i rezultati ispitivanja prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja od strane ETF, Beograd, 2001
- [11] Ispitne metode i rezultati ispitivanja VF prigušnica od strane firme Instituta Nikola Tesla i High Power Laboratory, Crajova, Rumunija, 2000.
- [12] Praktična iskustva iz proizvodnje vazdušnih prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora, domaćeg proizvođača Energoremont
- [13] Praktična iskustva iz proizvodnje vazdušnih prigušnica domaćih proizvođača Rade Končar, Energoinvest
- [14] Katalozi proizvođača prigušnica: Rade Končar, Energoinvest, Westinghouse, Energoremont, BBC
- [15] Međunarodni standard IEC 60076-6
- [16] David Meeker: "Finite Element Method Magnetics, Version 3.3 , User's manual", March 2003.

PRILOG 1.

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU BULEVAR KRALJA ALEKSANDRA 73 BEOGRAD			
ISPITNI LIST		Br. VN-011-2001	
PRIGUŠNICA ZA OGRANIČENJE STRUJE KRATKOG SPOJA			
Proizvođač: Energoremont, Beograd.			
TEHNIČKI PODACI			
Tip: ERPS-1000/0,7	Fabr. Br: 131/01	Godina proizvodnje: 2001	
Nazivni napon: 6.3 kV	$\Delta U=6\%$	Frekvencija: 50 Hz	Term. klasa izolac: F
Nazivna struja: 1000 (A)	$I_k/t_k=16,67/2,5$ kA/s	Stupanj izolacije: 28 kV	
Impedansa: $0,218 \Omega$	Broj faza: 3	Hladjenje: AN	Masa: 850 kg
REZULTATI ISPITIVANJA			
1. Ispitivanje izolacije dovedenim naponom			
Ispitivanje podnosivim naponom između namotaja i prema zemlji: 28 kV za 60 s			
2. Merenje omskog otpora naizmeničnom strujom			
$R_{A-X}=8,95$ m Ω	$R_{B-Y}=8,01$ m Ω	$R_{C-Z}=9,06$ m Ω	
3. Merenje induktivnosti namotaja pri trofaznom napajanju			
Namotaj A: 0,718 mH	Namotaj B: 0,685 mH	Namotaj C: 0,711 mH	
4. Merenje impedanse			
Napon: $U=42,2$ V	Struja: $I=188$ A	Impedansa $Z=0,2244 \Omega$	$\Delta U=6,17$ %
5. Ispitivanje porasta temperature pri struji od 1000 A			
Porast temperature pri struji od 1000 A: 89,34 K			
6. Ispitivanja su uradjena u skladu sa propisima JUS N.H1.289			
Položaj namotaja vertikalan			
Priključci kao na slici			
	A		x
	B		Y
	C		Z
7. Zaključak: Prigušnica je uspešno prošla ispitivanje			
Mesto ispitivanja: Energoremont Ispitna stanica, Pančevo		Ispitivanje izvršio Elektrotehnički fakultet u Beogradu	
		Odgovorne lice: <i>[Signature]</i> <i>[Stamp]</i>	
Ispitivanjem rukovodio:	prof. Milan Savić	<i>[Stamp]</i> Kontrola: <i>[Signature]</i>	
Ispitali:	<i>[Signature]</i> prof. Dragutin Salamon Branislav Bukorović		
Beograd, 24-12.2001			

PRILOG 2.



Slika trofazne vazdušne prigušnice

PRILOG 3.

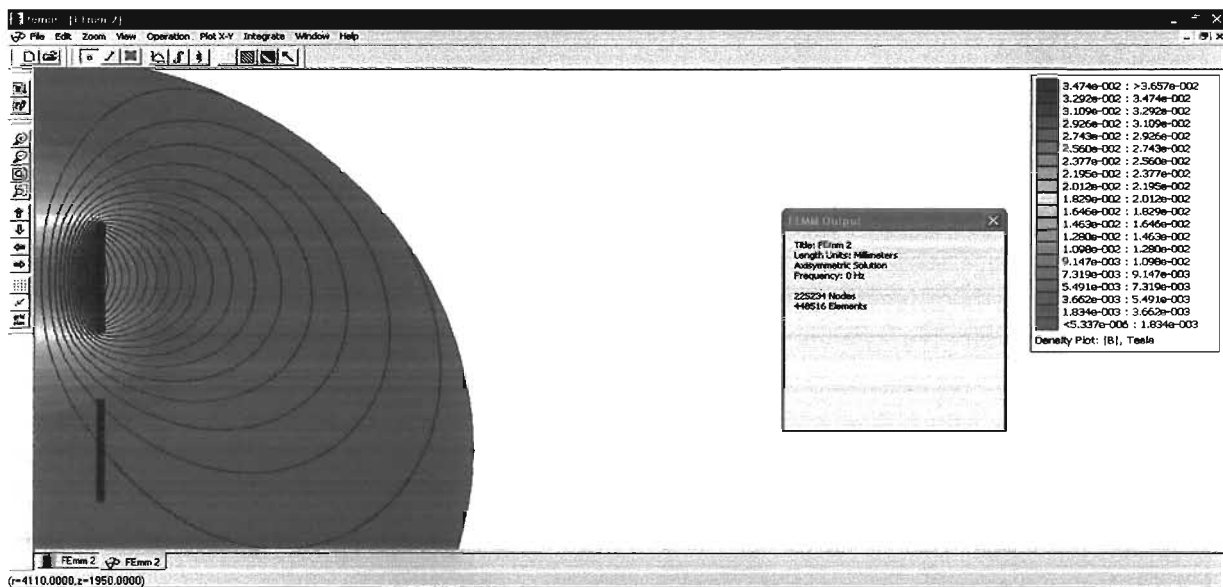
Finite Element Method Magnetics (FEMM) je softverski paket za rešavanje i analizu problema u 2D ravni u sporopromenljivom magnetskom i elektrostatičkom polju. Funkcionalno se može podeliti u tri celine. Prva je *Preprocessor* u kojoj zadajemo geometriju problema, definišemo radni prostor, elemente i materijal koji se koristi, ukratko modelujemo grafički projektovanu trofaznu prigušnicu. Drugi je *Solver* tokom kojeg na osnovu zadatih ulaznih podataka, program

rešava Maxwell jednačine u cilju računanja vrednosti magnetskog polja u zadatom radnom prostoru u kome se nalazi prigušnica. *Postprocessor* je treći deo programa FEMM koji grafički prikazuje rezultantno polje u prostoru, a korisnik ima mogućnost da izračunava mnogobrojne fizičke veličine kao i da crta raspodelu polja, konkretno magnetske indukcije B (T) u proizvoljnim pravcima.

Projektovana prigušnica je modelovana u software FEMM i prikazaćemo:



Slika 15. Raspodela magnetske indukcije u prostoru (poluprečnik radnog prostora je 4 metra od ose prigušnice), kada samo kroz srednji namotaj teče struja, uz prisustvo gornjeg i donjeg namotaja



Slika 16. Raspodela magnetske indukcije u prostoru, kada samo kroz gornji namotaj teče struja (zbog simetrije isto važi i za donji), uz prisustvo srednjeg i donjeg namotaja



Slika 17. Raspodela magnetske indukcije u prostoru, kada kroz sva tri namotaja teče struja

Korišćenjem software-a FEMM moguće je izračunati sopstvene induktivnosti i međuinduktivnosti namotaja projektovane trofazne prigušnice i tako proveriti proračunate vrednosti. To ćemo uraditi za dva slučaja, kada je broj navojaka za 0,5 navojaka manji i veći od stvarnog, tj. kada namotaji imaju celi broj navojaka.

Vrednosti se dobijaju pomoću jednačina, čije integrale program računa izabiranjem odgovarajuće aplikacije i one glase:

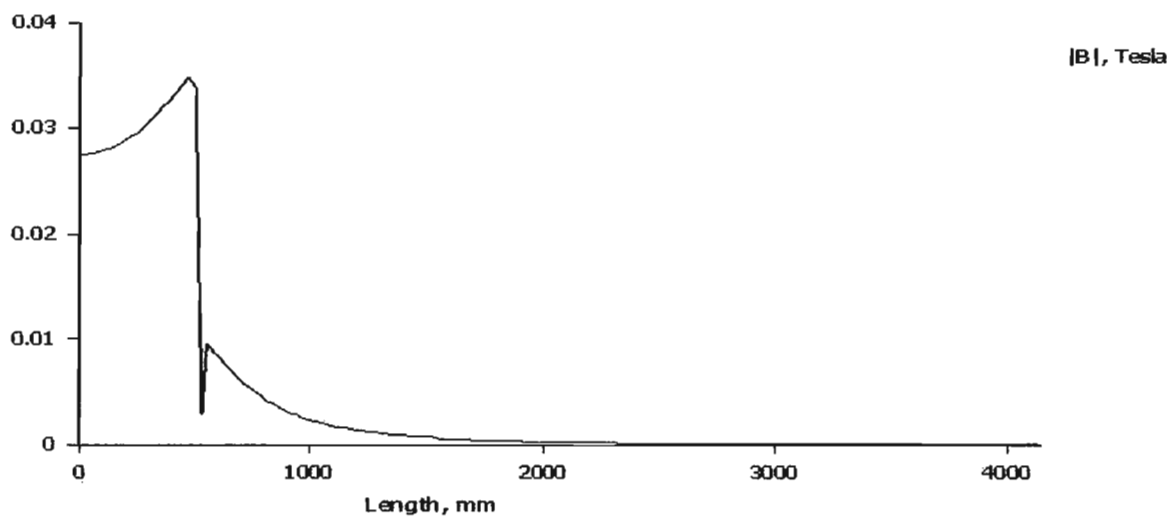
$$L_{\text{samoinduktivnost}} = \frac{\int A \cdot J \cdot dV}{i^2} \quad i$$

$$L_{\text{međuinduktivnost}} = \frac{N_2}{i_1^2 \cdot S_2 \text{ nav}} \cdot \int A_1 \cdot dV_2$$

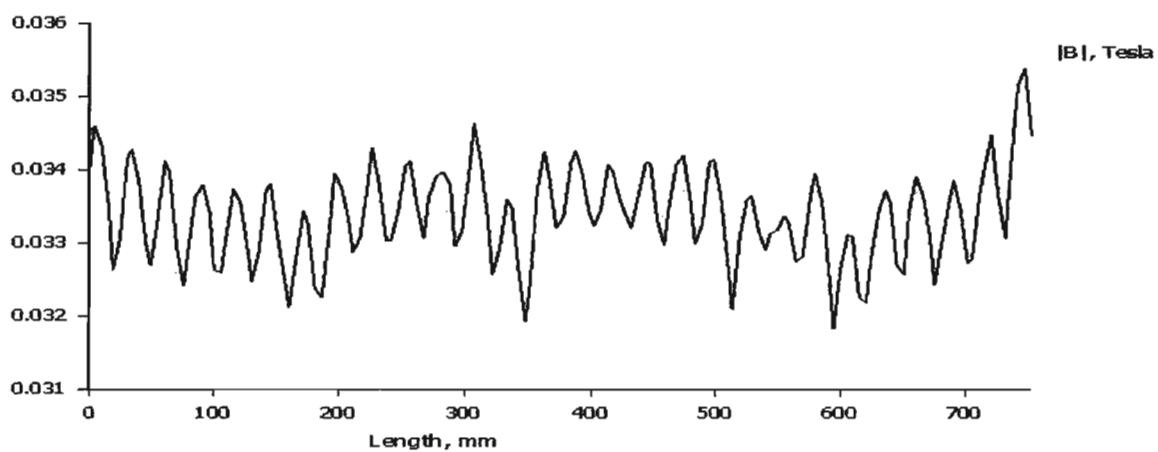
Dobijeni rezultati su predstavljeni u tabeli 5:

Tabela 5. Sopstvene induktivnosti i međuinduktivnosti izračunate primenom software FEMM

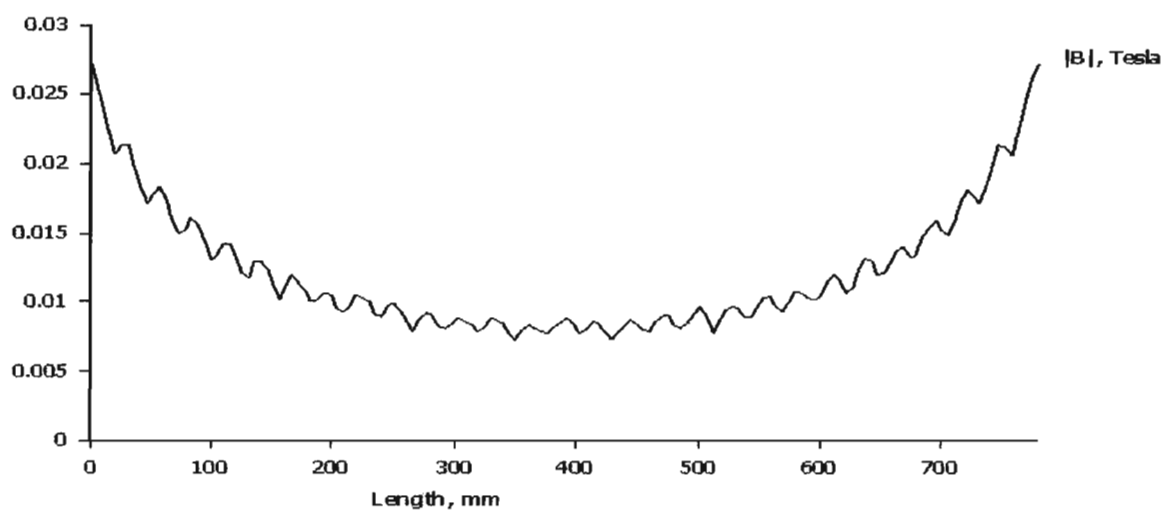
Stvarno : $N_1 = N_3 = 29,5$, $N_2 = 28,5$	Sa manjim brojem navojaka $N_1 = N_3 = 29$, $N_2 = 28$	Sa većim brojem navojaka $N_1 = N_3 = 30$, $N_2 = 29$
Sopstvene induktivnosti:		
$L_1 = L_3$ (mH)	0,689615	0,722753
L_2 (mH)	0,656374	0,689196
Međuinduktivnosti:		
$L_{12} = L_{23}$ (mH)	0,046213	0,0477
L_{13} (mH)	0,0072904	0,0074076



Slika 18. Raspodela magnetske indukcije u radijalnom pravcu, od sredine ose prigušnice (za srednji namotaj) do razdaljine od 4 metra



Slika 19. Raspodela magnetske indukcije u aksijalnom pravcu, duž unutrašnje ivice namotaja (za srednji namotaj)



Slika 20. Raspodela magnetske indukcije u aksijalnom pravcu, duž spoljašnje ivice namotaja (za srednji namotaj)



Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Katedra za energetske pretvarače i pogone

Proračun
vazdušnih energetskih prigušnica
za ograničenje struje kratkog spoja
(UPUTSTVO)

SADRŽAJ:

UVOD	3
1. OPŠTE O PRIGUŠNICAMA	4
2. VRSTE I KLASIFIKACIJA PRIGUŠNICA	5
3. POREĐENJE PRIGUŠNICA SA TRANSFORMATORIMA	8
4. VAZDUŠNE ENERGETSKE PRIGUŠNICE	10
5. PRIGUŠNICE ZA OGRANIČENJE STRUJE KRATKOG SPOJA.....	10
5.1. Osnovni pojmovi o strujama kratkog spoja	10
5.2. Primer određivanja parametara prigušnice za zaštitu transformatora 10 MVA	11
5.3. Projektovanje vazdušne prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja	14
5.4. Karakteristične veličine neophodne za projektovanje vazdušnih prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja. Odnosi karakterističnih veličina	15
5.5. Dimenzionisanje namotaja.....	17
5.6. Tipovi namotaja vazdušnih prigušnica	18
5.7. Izračunavanje sopstvene induktivnosti namotaja.....	22
5.8. Izračunavanje međusobne induktivnosti susednih namotaja	24
5.9. Sistematizovan prikaz relacija za izračunavanje sopstvene induktivnosti i međusobnih induktivnosti za vertikalni sklop trofazne suve prigušnice	29
5.10. Sistematizovan prikaz relacija za izračunavanje sopstvene induktivnosti i međusobne induktivnosti za horizontalni sklop trofazne suve prigušnice.....	30
5.11. Izračunavanje gubitaka snage prigušnice.....	31
5.12. Termički proračun	32
5.13. Dinamički proračun	36
5.14. Ukupna masa prigušnice	44
6. RAČUNSKI PRIMERI PRORAČUNA.....	45
8. STANDARDNE DIMENZIJE PROVODNIKA	Error! Bookmark not defined.

UVOD

Prigušnice kao i kondenzatori su osnovni elementi sistema proizvodnje, distribucije i prenosa električne energije pa zato one imaju vrlo široku primenu u električnim postrojenjima svih nominalnih napona na različitim mestima i sa različitim funkcijama, kako u postrojenjima sa naizmeničnim tako i u postrojenjima sa jednosmernim naponom. Mogu se dimenzionisati za struje u opsegu od samo nekoliko ampera do nekoliko desetina i hiljada ampera. Predmet ovoga rada su vazdušne prigušnice sa teorijskim i praktičnim pristupom projektovanju.

Projektovanje je jedna od osnovnih i slobodno možemo reći najvažnijih inženjerskih aktivnosti i predstavlja prvu kariku u lancu realizacije svakog uređaja pa i prigušnice.

Problem, koji se javlja pri proračunu prigušnice zadatih karakteristika je postojanje velikog broja različitih električnih i geometrijskih veličina koje zadovoljavaju zadate tehničke uslove. Inženjer, koji se po prvi put susreće sa problemom definisanja prigušnice zadate funkcije i tehničkih uslova, ne može brzo i uspešno da uradi projekat bez određenog iskustva i praktičnih podataka o proizvedenim prigušnicama sličnih funkcija i karakteristika. Zato projektant, da bi izračunao vrednost induktivnosti, osnovnu karakteristiku prigušnice, mora da pođe od neke pretpostavljene vrednosti za broj navojaka N , srednji prečnik namotaja D_{sr} i dimenzije namotaja, najčešće na osnovu nekog poznatog rešenja. Tako izračunata vrednost induktivnosti redovno neće zadovoljiti zahtevanu vrednost. Tada, primenjujući iterativan postupak proračunavanja, menjajući vrednosti za N i D_{sr} , postepenim približavanjem dolazi se do parametara onog namotaja koji će imati zadanu induktivnost. Često je za to potrebno mnogo vremena.

1. OPŠTE O PRIGUŠNICAMA

Prigušnice ili reaktori su elektromagnetski uređaji koji su našli veliku primenu u svim oblastima elektrotehnike. To su induktivni namotaji ili kalemovi koji svojim induktivnim otporom ograničavaju, prigušuju ili regulišu velike struje nastale usled različitih uzroka, najčešće usled kratkih spojeva ili uklopnih operacija, pa u zavisnosti od funkcije imaju i odgovarajuće karakteristike.

Prigušnica je pasivna električna komponenta koja može da akumulira energiju u magnetskom polju koje stvara struja koja kroz nju prolazi. Njena mogućnost skladištenja energije se meri njenom induktivnošću koja je izražena u henrijima.

Induktivnost (L) je posledica magnetskog polja koje se formira oko provodnika kroz koji protiče struja. Ta struja, koja „teče“ kroz provodnik oko njega stvara magnetski fluks proporcionalan struji. Promena ove struje stvara odgovarajuću promenu magnetskog fluksa srazmerno kojoj se indukuje elektromotorna sila (EMS). Ova EMS teži da se odupre promeni struje.

Induktivnost je mera količine elektromotorne sile generisane po jediničnoj promeni struje. Na primer, prigušnica sa induktivnošću od jednog henrija proizvodi EMS od jednog volta kada se struja kroz prigušnicu menja brzinom od jednog ampera u sekundi. Broj navojaka, dimenzije namotaja i materijal jezgra oko koga je on namotan utiču na induktivnost. Magnetski fluks koji ovaj namotaj stvara može se povećati tako što će se namotaj staviti oko materijala sa velikom magnetskom permeabilnošću kao što je gvožđe. Ovako se može uvećati induktivnost oko 2000 puta u odnosu na slučaj kada je jezgro prigušnice bilo vazdušno.

Ako induktivni otpor prigušnice treba da bude konstantne i precizne vrednosti, onda namotaji nemaju gvozdeno jezgro već vazdušno, pa se zato ove prigušnice često nazivaju i vazdušne prigušnice.



Primenjuju se u:

- elektroenergetskim sistemima
- energetskej elektronici
- elektromotornim pogonima
- električnom osvetljenju
- telekomunikacijama

i drugim mnogobrojnim energetskim i elektronskim kolima sa najraznovrsnijom funkcijom.

2. VRSTE I KLASIFIKACIJA PRIGUŠNICA

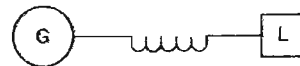
Kriterijumi za klasifikaciju prigušnica po grupama su veoma različiti a razlog tome je njihova raznovrsna primena i veliki spektar različitih karakteristika. Neki od tih kriterijuma su:

- Oblast primene
- Oblik Volt-Amperske karakteristike: mogu biti linearne (nezasitljive) ili nelinearne (zasitljive) prigušnice.
- Način uključivanja u strujno kolo: mogu biti serijske ili paralelne prigušnice.
- Učestanost napajanja prigušnice: mogu biti 50 Hz ili visokofrekventne prigušnice.
- Naponski nivo: mogu biti niskonaponske ili visokonaponske prigušnice.
- Konstrukcija prigušnice: mogu biti vazdušne ili prigušnice sa magnetskim jezgrom.
- Oblik magnetskog kola: mogu biti sa stubnim, oklopljenim ili torusnim jezgrom.
- Način promene induktivnosti namotaja: promenom veličine vazdušnog procepa ili promenom struje magnećenja, itd.

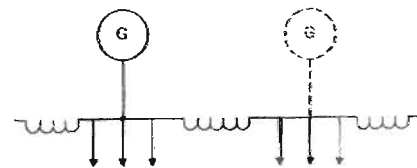
Prema oblastima primene i načinu uključanja u strujno kolo mogu se navesti definicije tipova prigušnica prema klasifikaciji Westinghouse i prema standardu IEC60076-6.

a. Prema klasifikaciji Westinghouse :

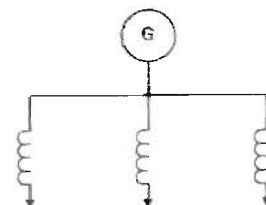
1. **Linijske prigušnice (line reactor)** koje se serijski uključuju u liniju između uređaja za napajanje električnom energijom i potrošača sa namenom da ograniče struju.



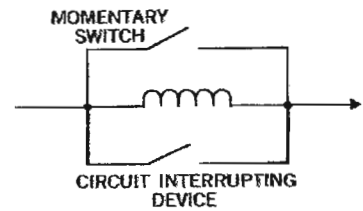
2. **Sabirne prigušnice (bus-tie reactor)** koje se uključuju između dva sistema sabirnica sa namenom da ograniče i lokalizuju struju nastalu usled nekog oštećenja u jednom sistemu sabirnica.



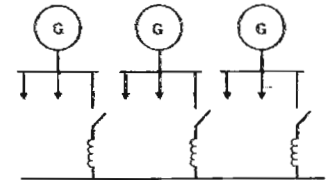
3. **Prigušnica za napajanje (feeder reactor)** koja se serijski priključuje u liniju napajanja sa ciljem ograničavanja i lokalizovanja struje nastale usled nekog oštećenja u vodu napajanja.



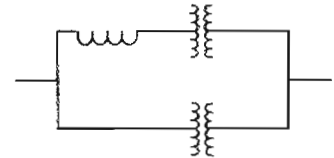
4. **Sinhronizacione prigušnice (synchronizing reactor)** koje se primenjuju za sinhronizaciju dva energetska sistema u cilju ograničenja struje u trenutku spoja preko otvorenog kontakta uređaja za prekidanje kontakta.



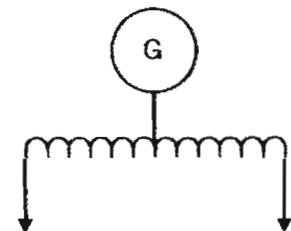
5. **Prigušnice za sinhronizaciju generatora (generator synchronizing reactor)** služe da ograniče struju u slučajevima veze dve ili više generatorskih sabirnica i običnih sabirnica.



6. **Prigušnice za paralelisanje (paralleling reactors)** služe za ograničenje struje u slučajevima korekcije podele struje između dva paralelno vezana transformatora ili električnih kola koja imaju različite impedanse.



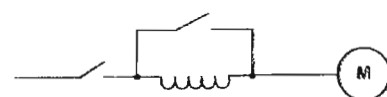
7. **Dupleks prigušnica (duplex reactor)** koja se koristi da ograniči struju za vezu između jednog izvoda napajanja i dva posebna sabirna voda ili napajanja. Ona minimizira veličinu neželjene struje koja se može vraćati sa jednog potrošača na drugi, zavisno od smetnji na nekom od njih (niska normalna reaktansa, visoka krajnja reaktansa).



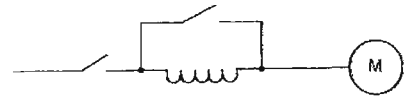
8. **Prigušnica za uzemljenje neutralne tačke (neutral grounding reactor)** se koristi da ograniči struju smetnji u liniji za uzemljenje na istu vrednost kolika je simetrična trofazna struja na generatoru.



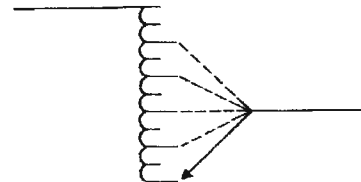
9. **Start prigušnica (starting reactor)** služi da ograniči polaznu struju mašine ili uređaja.



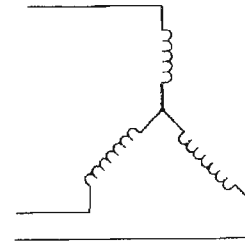
10. **Prigušnica za prigušenje jednosmerne struje** (D.C. smoothing reactor) koja se koristi za redukciju harmonika naizmenične struje i ravnanje (prigušenje) talasa jednosmerne struje.



11. **Ispitna prigušnica** (test reactor) je specijalni tip prigušnice koja se koristi da ograniči struju i promenu faktora snage pri ispitivanju električnih uređaja i obično ima izvode.



12. **Šant prigušnica** (shunt reactor) koja se koristi za snabdevanje reaktivnim opterećenjem u cilju balansa kapacitivnog efekta dugih prenosnih vodova, obično pomoću tercijalnog namotaja transformatora.



b. Prema međunarodnom standardu IEC60076-6:

1. **Šant prigušnica** (shunt reactor) je prigušnica povezana između faze i nule, faze i zemlje ili između faza u energetskom sistemu sa ciljem kompenzacije kapacitivne struje.
2. **Prigušnica za ograničenje struje** (current-limiting reactor) je prigušnica linijski vezana u energetskom sistemu sa ciljem ograničenja struje u slučaju kvara.
3. **Prigušnica za uzemljenje neutralne tačke** (neutral-earthing reactor) je prigušnica povezana između nule energetskog sistema i uzemljenja čija je uloga ograničenje struje zemljospoja na određenu željenu vrednost.
4. **Prigušnica za kontrolu protoka snage** (power flow control reactor) je prigušnica vezana na red u elektroenergetskom sistemu sa ciljem kontrole protoka energije.
5. **Start prigušnica** (motor starting reactor) je prigušnica povezana linijski sa motorom čija je uloga ograničenje polazne struje motora.
6. **Prigušnica za lučne peći** (arc-furnace series reactor) je prigušnica redno vezana sa lučnom peći sa ciljem povećanja efikasnosti operacije topljenja metala i smanjenja varijacije napona na energetskom sistemu.

7. **Prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora (damping reactor)** je prigušnica povezana linijski sa baterijom kondenzatora da ograniči uklopnu struju kondenzatora, struju isključenja kondenzatora zbog kvara ili prebacivanja na susedni kondenzator i / ili da „razdesi“ kondenzator kako bi se izbegla rezonansa sa elektroenergetskim sistemom.
8. **Prigušnica za filtriranje (filter reactor)** je prigušnica povezana na red ili paralelno sa kondenzatorima sa ciljem smanjenja ili blokiranja harmonika ili kontrolnih signala (ripl signal) sa frekvencijama do 10 kHz.
9. **Prigušnica za pražnjenje (discharge reactor)** je prigušnica koja se koristi u kolu za premošćavanje ili pražnjenje visokonaponske serijske baterije kondenzatora sa ciljem ograničenja struje u uslovima kvara.
10. **Transformator za uzemljenje neutralne tačke (earthing transformer /neutral coupler)** je trofazni transformator ili prigušnica povezana na mrežu da omogući nultu tačku za direktno uzemljenje ili za uzemljenje preko impedanse. Transformator može imati i dodatnu ulogu da snabdeva neko lokalno opterećenje.
11. **Prigušnice za gašenje luka (arc-suppression reactor)** su prigušnice povezane između nulte tačke i zemlje sa ciljem da kompenzuju kapacitivnu struju između faze i zemlje usled jednofaznog zemljospoja (Petersenka).
12. **Prigušnica za prigušenje jednosmerne struje (smoothing reactor)** je prigušnica povezana redno u sistemu jednosmernog napona da smanji protok naizmeničnih komponenti struje i priguši tranzijentne struje.

3. POREĐENJE PRIGUŠNICA SA TRANSFORMATORIMA

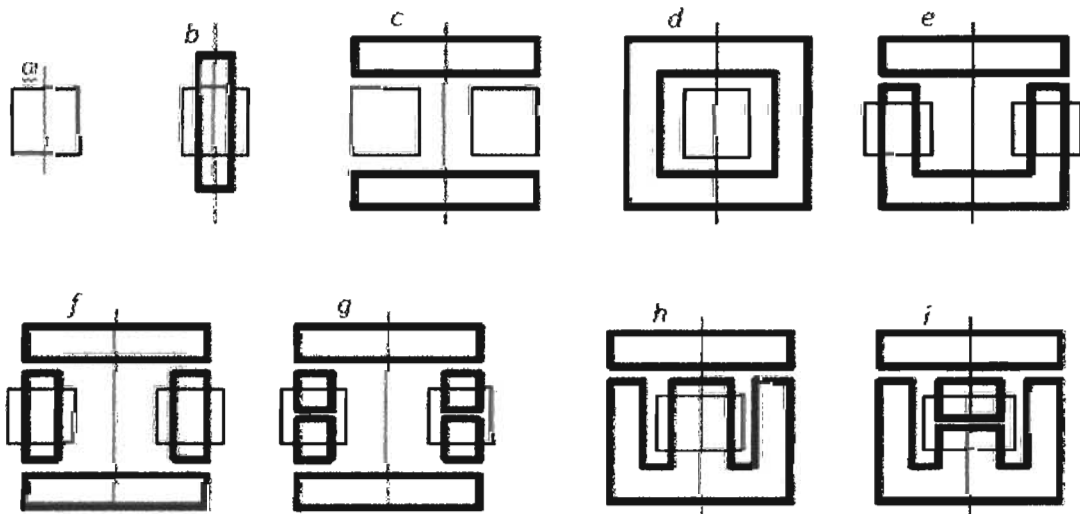
Najveću i najvažniju grupu među statičkim elektromagnetskim uređajima čine transformatori, a po elektromagnetskom procesu i principijalnim metodama proračuna prigušnice su veoma slične transformatorima. Dve ili više prigušnica koje imaju spregnut magnetski fluks formiraju transformator, a on predstavlja osnovnu komponentu svake električne mreže. Iz činjenice da prigušnice imaju samo jedan namotaj i da mogu da imaju vazdušno ili gvozdeno jezgro proizilazi razlika u karakteru elektromagnetskog procesa. Opšte je poznata činjenica da je kod transformatora magnetski fluks određen dovedenim naponom i da ne zavisi od struje opterećenja, dok je na primer kod vazdušnih prigušnica magnetski fluks određen strujom opterećenja i ne zavisi od napona na koji je prigušnica priključena.

Ono što je kod prigušnica prednost jeste to što se njene dimenzije, posebno kod vazdušnih prigušnica mogu menjati u širem opsegu nego što je to slučaj kod transformatora. Energetske prigušnice primenjene u praksi imaju mnogo više različitih karakteristika nego transformatori, pa se one grupišu u oko 40 vrsta, dok se transformatori analogno grupišu u manje od 10 vrsta.

U zavisnosti od namene i funkcije u električnom kolu, kod prigušnica sa gvozdanim jezgrom se primenjuje veći broj magnetskih sistema nego kod transformatora, kod kojih su najviše zastupljeni stubno, oklopljeno i torusno magnetsko kolo.

Sa aspekta potrebnih elektromagnetskih parametara, linearnosti Volt-Amperske karakteristike i odnosa parametara, konstrukcije prigušnica mogu se svrstati u četiri osnovne grupe (slika 3.1):

- prigušnice sa vazdušnim jezgrom (bez gvožđa) – a
- sa razmaknutim magnetskim sistemom – b, c, d
- magnetski sistemi sa vazdušnim procepom – e, f, g
- sa oklopljenim magnetskim sistemom – h, i



Slika 3.1 Različiti magnetski sistemi primenjeni kod prigušnica

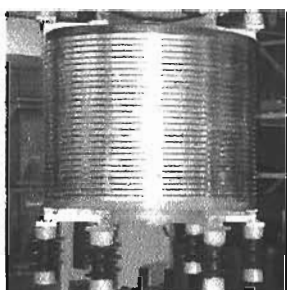
a – prigušnica bez gvožđa sa cilindričnim namotajem, b – stubna prigušnica bez jarma, c – prigušnica bez stubova, ali sa jarmovima, d – oklopljena prigušnica bez stuba, e – stubna prigušnica sa vazdušnim procepima prema gornjem jarmu, f – stubna prigušnica sa vazdušnim procepima prema oba jarma, g – stubna prigušnica sa vazdušnim procepima u stubovima i prema jarmovima, h – oklopljena prigušnica sa vazdušnim procepima prema gornjem jarmu, i – oklopljena prigušnica sa vazdušnim procepom u stubu i prema gornjem jarmu

4. VAZDUŠNE ENERGETSKE PRIGUŠNICE

Generalno rečeno vazдушna prigušnica predstavlja samoinduktivni kalem, odnosno namotaj sa vazдушnim jezgrom, koji se najčešće uključuje serijski u liniju sa uređajem koga štiti. U slučaju postojanja magnetskog jezgra u prigušnici velika struja kratkog spoja bi dovela do zasićenja jezgra, što za posledicu ima značajno smanjenje impedanse prigušnice i to onda kada je ona najpotrebnija (jer se tada gvožđe ponaša kao vazduh). Osnovna karakteristika vazdušne prigušnice je konstantna i precizna vrednost njenog induktivnog otpora kako u normalnom pogonu tako i pri tranzijentnim režimima. Zato se ona naziva i linearna prigušnica. Namotaj predstavlja glavni deo ove prigušnice i o njegovim karakteristikama će biti reči u daljem tekstu.

Prigušnica se u električnom pogledu može opisati sa svojim koeficijentom samoindukcije (L) i nominalnom strujom (I_n) u normalnom radnom režimu.

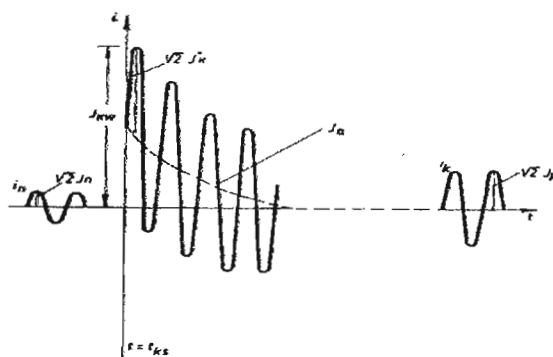
5. PRIGUŠNICE ZA OGRANIČENJE STRUJE KRATKOG SPOJA



Kada dođe do kratkog spoja na sekundarnoj strani transformatora, usled čega se ukupni otpor strujnog kola smanji na neznatnu vrednost, u strujnom kolu, koje sadrži i vazдушnu prigušnicu, još uvek postoji dodatni induktivni otpor njenog namotaja, koji priguši ili ograniči struju kratkog spoja na manje opasnu vrednost. To je razlog što se ovi elektromagnetski uređaji nazivaju prigušnice.

5.1. Osnovni pojmovi o strujama kratkog spoja

Ne ulazeći dublje u pojave, koje se dešavaju u režimu kratkog spoja, niti u objašnjenje o vrstama kratkog spoja zavisno od toga da li je zvezdište sistema uzemljeno ili neuzemljeno, niti od trenutka kada kratak spoj nastaje, radi jasnije predstave ovih pojava potrebno je objasniti osnovne karakteristične veličine struje kratkog spoja, ilustrovane slikom 5.1.



Slika 5.1 Tranzijenta struja kratkog spoja

I_{ud} – je udarna struja kratkog spoja maksimalne efektivne vrednosti I_{kmax} koja predstavlja aperiodičnu komponentu sastavljenu od dva člana: jednosmerne i naizmenične komponente. Njena maksimalna vrednost nastaje kada se kratak spoj desi u trenutku kada je nominalni napon jednak nuli, jer se tada pojavljuje maksimalna jednosmerna komponenta struje kratkog spoja. Ona je veoma velika i dostiže 30 ÷ 80 % veću amplitudu od amplitude ustaljene struje kratkog spoja. U prelaznom periodu, dok se struja kratkog spoja ne ustali kao posledica ove velike struje javljaju se termička i mehanička opterećenja koja mogu da dovedu do znatnih oštećenja transformatora.

Kritična amplituda struje kratkog spoja se određuje prema izrazu:

$$I_{ud} = I_{kmax} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 2,54 \cdot I_k \quad (5.1)$$

Gde je :

k – koeficijent kratkog spoja, koji uzima u obzir aperiodični karakter struje kratkog spoja

I_k – ustaljena ili trajna struja kratkog spoja, koja predstavlja periodičnu sinusoidalnu struju, čija je amplituda za red veličine veća od amplitude nominalne struje što će biti prikazano u sledećem primeru. Ona je merodavna za termičko naprezanje namotaja u kratkom spoju, koje je manje opasno od dinamičkog naprezanja.

U daljem tekstu I_{kmax} kritična amplituda struje kratkog spoja, biće označena sa I_{kd} (dinamička struja), a I_k trajna struja kratkog spoja biće označena sa I_{kT} (termička struja).

5.2. Primer određivanja parametara prigušnice za zaštitu transformatora snage 10 MVA

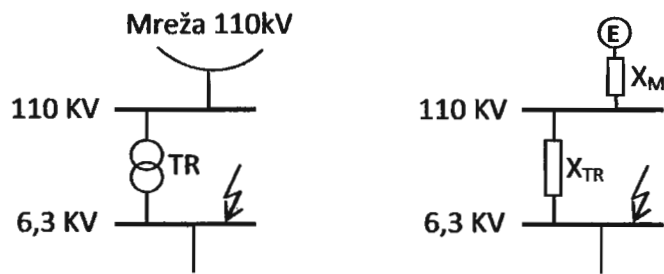
Strujne i naponske prilike u kolima sa uključenom prigušnicom, mogu se najlakše upoznati na sledećem primeru, ako se posmatra jednostavno strujno kolo sastavljeno od izvora napajanja, mreže, potrošača (tj. transformatora) i prigušnice koja treba da ga zaštiti u slučaju havarije na njegovim krajevima.

Proračun struje kratkog spoja na sabirnicama 6,3 kV postrojenja u „TE KOLUBARA“, koje se napaja preko transformatora čije su karakteristike:

Sn (MVA)	U_1/U_{20} (kV)	sprega	u_k (%)	I_{1n}/I_{2n} (A)
10	110/6.3	Yd5	11	52.48/(529) 916.43→1000

Proračun parametara prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja na sabirnicama 6,3 kV, za snagu kratkog spoja mreže: $S_k'' = 4000$ MVA.

Transformator bez prigušnice:



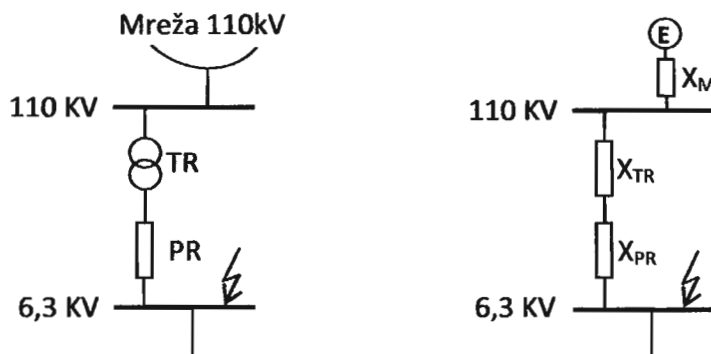
$$X_M = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_k^*} = \frac{1,1 \cdot 6,3^2}{4000} = 0,011 \Omega$$

$$X_{TR} = \frac{u_k \cdot U_n^2}{100 \cdot S_T} = \frac{11}{100} \cdot \frac{6,3^2}{10} = 0,437 \Omega$$

$$X_e = X_M + X_{TR} = 0,011 + 0,437 = 0,448 \Omega$$

$$I_{k2}^* = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_e} = \frac{1,1 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,448} = 8,93 \text{ kA}$$

Transformator sa prigušnicom ($u_{kPR} = 6\%$):



$$X_{PR} = \frac{u_{kPR} \cdot U_n}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 1} = 0,218 \Omega \quad L = \frac{0,218}{0,314} = 0,694 \rightarrow 0,7 \text{ mH}$$

$$X_e = X_M + X_{TR} + X_{PR} = 0,011 + 0,437 + 0,218 = 0,666 \Omega$$

$$I_{k2}^* = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot X_e} = \frac{1,1 \cdot 6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,666} = 6 \text{ kA}$$

$$I_{k2TR} = \frac{100}{u_{kTR}} \cdot I_n = \frac{100}{11} \cdot 1000 = 9,09 \text{ kA}$$

Usvaja se trofazna vazдушna prigušnica čije su karakteristike:

$$U_n = 6,3 \text{ kV}, I_n = 1000 \text{ A}, X = 0,218 \Omega, u_k = 6 \%, L = 0,7 \text{ mH}$$

Prigušnica će biti izvedena u trofaznom vertikalnom sklopu.

U navedenom primeru upotrebljena je jedna karakteristika prigušnice, faktor magnetske sprege, u_{kPR} (%), koji se definiše kao procentualni odnos pada napona na prigušnici i nominalnog napona mreže i računa se prema sledećem izrazu:

$$u_{kPR} = \frac{\Delta U}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot X_{PR}}{U_n} \cdot 100(\%) = \frac{\sqrt{3} \cdot 1000 \cdot 0,218}{6300} \cdot 100 = 5,993 \rightarrow 6\% \quad (5.2)$$

U praksi se uglavnom primenjuju prigušnice sa faktorom magnetske sprege 6 % (ređe 4 %).

Iz navedenog računskog primera se vidi da se za zadate parametre prigušnice određuje potrebni induktivni otpor prigušnice (X_{PR}), da bi se struja kratkog spoja na sekundarnoj strani transformatora ograničila na 6 kA, što je znatno niže od vrednosti 8.93 kA.

$$X_{PR} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \cdot \frac{u_k}{100} \quad (5.3)$$

Ako se zanemari induktivni otpor mreže u kratkom spoju, dolazi do izražaja samo induktivni otpor prigušnice, pa je struja kratkog spoja:

$$I_k = \frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot X_{PR}} = \frac{U_2}{\frac{U_2}{\sqrt{3} \cdot I_2} \cdot \frac{u_k}{100} \cdot \sqrt{3}} = I_2 \cdot \frac{100}{u_{kPR}} = I_{KT} \quad (5.4)$$

$$I_k = I_n \cdot \frac{100}{u_{kpr}} = 1000 \cdot \frac{100}{6} = 16,67 \text{ kA} \quad (5.5)$$

Navedena vrednost (16,67 kA) predstavlja trajnu vrednost struje kratkog spoja (I_{KT}) koja definiše termičku otpornost namotaja prigušnice. Maksimalna vrednost udarne struje kratkog spoja (I_{KD}), koja definiše dinamičku otpornost prigušnice je data izrazom:

$$I_{KD} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{KT} = 2,54 \cdot I_{KT}$$

Kako se vidi iz ovog primera za poznate uslove u mreži i karakteristike transformatora koji se štiti, može se odrediti potreban induktivni otpor prigušnice, da bi se postiglo željeno smanjenje struje kratkog spoja.

5.3. Projektovanje vazdušne prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja

Projektovanje je jedna od najvažnijih inženjerskih aktivnosti i predstavlja osnovnu kariku u lancu realizacije svakog tehničkog uređaja. Projekat prigušnice je osnovni dokument tehničke dokumentacije potrebne za proizvodnju i sastoji se od proračuna i konstruktivne tehničke dokumentacije. Izrada proračuna prethodi izradi konstrukcije.

Cilj proračuna, kojima se bave uglavnom projektanti transformatora je da se odrede svi tehnički parametri prigušnice, koji se proveravaju ispitivanjem na kraju proizvodnog procesa. Problem koji se javlja pri proračunu zadate prigušnice je postojanje velikog broja različitih vrednosti električnih i geometrijskih veličina koje definišu prigušnicu, pri čemu je zavisnost ovih veličina mnogostruka i nelinearna.

Osnovni zahtev koji prigušnica, kao element elektroenergetskog postrojenja treba da ispuni jeste pouzdanost u radu. Pošto je serijski vezana sa uređajem koga štiti, najčešće sa transformatorom, sve tehničke zahteve za transformator treba i ona da ispuni. Električni proračun se uvek svodi na izračunavanje induktivnosti namotaja, osnovne karakteristike prigušnica. Često je za izračunavanje induktivnosti potrebno mnogo vremena, pogotovo ako projektant, ne raspolaže sa parametrima izrađenih prigušnica sličnih karakteristika. Zato je potrebno da se u prvoj iteraciji pretpostavi neki broj navojaka, dimenzije provodnika i prečnik motanja namotaja.

Za jednu vrednost induktivnosti, može postojati mnogo računskih rešenja, koje će dati zahtevanu vrednost, pa je cilj proračuna naći optimalno rešenje sa aspekta minimalne težine materijala ili dimenzija prigušnice.

Za jednofaznu prigušnicu proračun je kraći i jednostavniji od proračuna za trofaznu prigušnicu jer ne postoje međusobne induktivnosti (međuinaktiviteti) i međusobni električni, termički i dinamički uticaji.

Proračun prigušnica se sastoji iz tri dela: električni, termički i dinamički.

Električni proračun se sastoji od izračunavanja induktivnosti namotaja za prethodno dimenzionisan namotaj, pada napona na njoj, težine provodnog materijala, gubitaka snage u namotaju i otpornosti namotaja.

Termički proračun se svodi na proveru zagrevanja namotaja pri trajnoj nominalnoj struji, kada srednja vrednost povećanja temperature namotaja $\Delta\theta$ ne treba da pređe vrednost od 100K za termičku klasu izolacije F(155°C). Da bi se zadovoljio ovaj termički uslov potrebno je da snaga hlađenja namotaja bude veća od snage zagrevanja. Kako je prigušnica u stanju kratkog spoja opterećena mnogostrukom povećanom strujom kratkog spoja potrebno je da se proverí termička izdržljivost prigušnice u kratkom spoju.

Dinamički proračun se svodi na izračunavanje dinamičkih naprezanja koja mehanički opterećuju prigušnicu pri nastanku kratkog spoja.

5.4. Karakteristične veličine neophodne za projektovanje vazdušnih prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja. Odnosi karakterističnih veličina

Za različite vrste prigušnica u zavisnosti od funkcija koje imaju u električnom kolu postoje različite veličine koje ih definišu, što je detaljno navedeno u važećem standardu za prigušnice IEC 60076-6. U skladu sa ovim standardom, neophodni tehnički podaci za projektovanje vazdušnih prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja su:

1. **Nominalna struja I_n (A)** – to je simetrična trofazna struja koju prigušnica mora trajno da vodi pri nominalnom naponu mreže i nominalnoj frekvenciji.
2. **Nominalna kratkotrajna ustaljena struja kratkog spoja I_k (kA)** – to je efektivna vrednost stacionarne simetrične komponente struje kratkog spoja, pri nominalnoj frekvenciji koju prigušnica mora da vodi u predviđenom vremenu $t_k(s)$. Ova struja proizilazi iz uslova mreže i njena vrednost ne treba da bude manja od najviše vrednosti struje u poznatim uslovima kvara u mreži. Ona definiše termičku izdržljivost prigušnice u kratkom spoju.
3. **Vreme trajanja nominalne kratkotrajne struje kratkog spoja $t_k(s)$**
4. **Nominalna impedansa prigušnice $X(\Omega)$** – to je zahtevana vrednost induktivne otpornosti po fazi prigušnice, pri nominalnoj frekvenciji i nominalnoj struji. Ova veličina ima značenje potrebne minimalne vrednosti. Dozvoljena maksimalna vrednost je $1,2 \cdot X$. Za trofaznu prigušnicu nominalna impedansa je srednja vrednost tri fazne impedanse.
5. **Faktor magnetske sprege $u_{kPR}(\%)$** ili procentualna reaktansa prigušnice, koja je najčešće 4% ili 6%.
6. **Stepen izolacije.** Predstavlja zahtev za dielektričnu otpornost izolacije između faza i prema zemlji i mora odgovarati najvišem naponu mreže U_m (kV) u kojoj će prigušnica biti ugrađena i prema kome su u skladu sa standardom za transformatore IEC 60076-3 određeni ispitni jednogminutni podnosivi naponi.

U_m (kV)	1.1	3.6	7.2	12	17.5	24	36
U_{isp} (kV)	3	10	20	28	38	50	70

7. Ako je prigušnica trofazna mora se zadati **oblik trofaznog sklopa**: vertikalni ili horizontalni
8. **Vrsta montaže**: unutrašnja ili spoljašnja
9. **Standard** za proizvodnju i ispitivanje
10. **Nominalna frekvencija**
11. **Vrednost I_{ud} (kA)**, ako je dat poseban zahtev za njenu vrednost koja je veća od iznosa **2.54·I_k**.

Zadate veličine:

$$U_n(V), \quad I_n(A), \quad L_n(mH), \quad I_k(kA) / t_k(s), \quad f(Hz)$$

Veličine koje se izračunavaju:

$$L(mH), X(\Omega), \Delta U(V), m_{pr}(kg), P_{cu}(W), \Delta\theta_{n\text{ amb}}(^{\circ}C), I_k \cdot \sqrt{t_k} (A \cdot s^{\frac{1}{2}})$$

$$F_A \left(\frac{kp}{cm}\right), F_R \left(\frac{kp}{cm}\right), \sigma_{sav} \left(\frac{kp}{cm^2}\right), \sigma_{kid} \left(\frac{kp}{cm^2}\right)$$

Napomena: Radi lakšeg izračunavanja, sile i naprezanja biće izražene u (kp/cm) i (kp/cm²) a konačne vrednosti se preračunavaju u jedinice SI sistema: (N/m) i (N/m²) koristeći relacije:

$$1 \text{ kp} = 9,8 \text{ N} \quad 1 \text{ Pa} = \frac{N}{m^2}$$

$$\left(\frac{kp}{cm}\right) = 9,8 \cdot 10^2 \left(\frac{N}{m}\right) \sim 10^3 \left(\frac{N}{m}\right)$$

$$\left(\frac{kp}{cm^2}\right) = 9,8 \cdot 10^4 \left(\frac{N}{m^2}\right) \sim 10^5 \left(\frac{N}{m^2}\right)$$

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 0,314 \cdot L (\Omega), \text{ pri čemu je } L \text{ u (mH)}. \tag{5.6}$$

$$\Delta U = X \cdot I_n = 0,314 \cdot L \cdot I_n \tag{5.7}$$

$$u_k = \frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot X}{U_n} \cdot 100 \rightarrow X = \frac{u_k(\%)}{100} \cdot \frac{U_n(V)}{\sqrt{3} \cdot I_n(A)} (\Omega) \tag{5.8}$$

$$u_k = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot L \cdot 0.314}{U_n} \cdot 100 = \frac{54.4 \cdot L \cdot I_n}{U_n} \quad U_n = \frac{54.4 \cdot L \cdot I_n}{u_k} \quad (5.9)$$

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot X} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n}} = I_n \cdot \frac{100}{u_k} \quad (5.10)$$

Iz poslednjeg izraza se vidi da manja vrednost u_{kPR} uslovljava veću vrednost struje I_k , što će biti pokazano u sledećem primeru.

Primer: $U_n = 6.3 \text{ kV}$, $I_n = 1000 \text{ A}$, $u_k = 6 \%$ ili 4% .

Za $u_k = 6 \%$:

$$X = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{6 \cdot 6300}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 1000} = 0.218 \Omega$$

$$L = \frac{X}{0.314} = \frac{0.218}{0.314} = 0.694 \text{ mH}$$

$$I_k = I_n \cdot \frac{100}{u_k} = 1000 \cdot \frac{100}{6} = 16.67 \text{ kA}$$

$$I_{ud} = 2.54 \cdot 16.67 = 42.43 \text{ kA}$$

Za $u_k = 4 \%$:

$$X = \frac{4}{100} \cdot \frac{6300}{\sqrt{3} \cdot 1000} = 0.1455 \Omega$$

$$L = \frac{0.1455}{0.314} = 0.463 \text{ mH}$$

$$I_k = 1000 \cdot \frac{100}{4} = 25 \text{ kA}$$

$$I_{ud} = 2.54 \cdot 25 = 63.5 \text{ kA}$$

5.5. Dimenzionisanje namotaja

Da bi se dimenzionisao namotaj potrebno je uraditi sledeće korake:

- Odabrati materijal za provodnik i izolaciju
- Usvojiti određen broj navojaka (N)
- Usvojiti vrstu namotaja, odnosno način motanja
- Odrediti dimenzije namotaja, njegovu širinu (a) i visinu (h)

- Odrediti koeficijent geometrije (λ) ako se L izračunava prema izrazu 5.17

Namotaji vazdušnih prigušnica se izrađuju od bakra, aluminijuma ili aldreja. Uglavnom je to bakar, ali ako je težina prigušnice kritičan faktor onda je to aluminijum. U nekim slučajevima kao što su VF prigušnice za prenos telekomunikacionih signala duž energetskih visokonaponskih vodova, koje se najčešće rade za struje 400 A i veće ili za trofaznu prigušnicu za ograničenje struje kratkog spoja u vertikalnom sklopu za struje 630 A i veće, namotaji se najčešće rade sa masivnim provodnikom od aldreja (legura Al Mg Si-0.5).

S obzirom da je aldrej specijalni provodni materijal koji ima različite fizičke karakteristike u odnosu na bakar i aluminijum u tabeli 5.1 su date fizičke karakteristike ova tri provodna materijala.

Vazdušne prigušnice se izrađuju sa suvom ili uljnom izolacijom. Najčešće upotrebljavani izolacioni materijali za suve vazdušne prigušnice su materijali koji pripadaju termičkoj klasi F(155°C) ili H(180°C), a po sastavu su sintetičkog porekla (aramidi, stakleno vlakno, smole). To su nomex-papir za međuslojnu izolaciju i slojevito presovani materijali (vitroplast, delmat, lexan) za odstoynike, podmetače, priključne ploče itd. Slojevito presovani materijali imaju opšti naziv laminati.

5.6. Tipovi namotaja vazdušnih prigušnica

Namotaji vazdušnih energetskih prigušnica su cilindričnog oblika, a motaju se kao spiralni ili slojni (jednoslojni, višeslojni i folijski).

U opštem slučaju namotaji suvih prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora rade se kao dvoslojni ili višeslojni cilindrični namotaji sa bakarnim provodnikom okruglog preseka (za struje do 40A) i profilnog preseka (za struje veće od 40A).

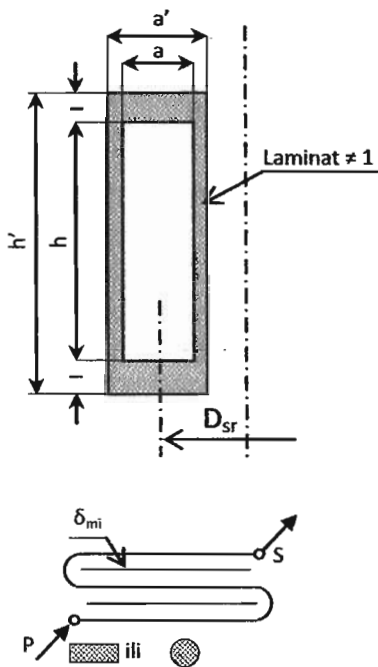
Namotaji suvih prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja i VF prigušnica uglavnom se izrađuju od masivnog profilnog provodnika od aldreja (legure aluminijuma magnezijuma i silicijuma) kao spiralni namotaj sa radijalnim kanalima između provodnika.

Namotaji za struje do 400 A ne zahtevaju kanal za hlađenje, a za veće struje zahtevaju jedan kanal, minimalne širine 10 mm.

Tabela 5.1 Fizičke osobine provodnih materijala

Fizičke osobine	Jedinice	Bakar ECu F20	Aluminijum EAl F7	Aldrej EAlMgSi 0,5	
Temperatura	T	°C	235	225	278
Temperaturni koeficijent promene otpora na 20 °C	$\alpha=1/T$	1/°C	0,00425	0,00444	0,00359
Specifična masa	γ	kg/dm ³	8,9	2,7	2,7
Specifična provodnost na 0°C	κ_0	Sm/mm ²	92,97	38,86	32,71
Specifična otpornost na 0°C	ρ_0	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,01588	0,02573	0,03057
Specifična provodnost na 20°C	κ_{20}	Sm/mm ²	57	35,7	30,5
Specifična otpornost na 20°C	ρ_{20}	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,01754	0,02801	0,03278
Temperaturni koeficijent gubitaka na 20°C	K_{20}	$\Omega\text{mm}^4/\text{kg}$	1,971	10,37	12,14
Temperaturni koeficijent promene specifične otpornosti	β_1	1/°C	0,004272	0,004463	0,003621
Specifična provodnost na 75°C	κ_{75}	Sm/mm ²	46,14	28,677	25,432
Specifična otpornost na 75°C	ρ_{75}	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,02167	0,03487	0,03932
Temperaturni koeficijent gubitaka na 75°C	K_{75}	$\Omega\text{mm}^4/\text{kg}$	2,434	12,91	14,56
Specifična provodnost na 120°C	κ_{120}	Sm/mm ²	40	24,69	22,40
Specifična otpornost na 120°C	ρ_{120}	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,025	0,04049	0,0446
Temperaturni koeficijent gubitaka na 120°C	K_{120}	$\Omega\text{mm}^4/\text{kg}$	2,808	14,998	16,533
Specifična toplota	C	Ws/kg°C	390	896	920
Dozvoljena temp. kratkog spoja	θ_{\max}	°C	250	200	200
Modul elastičnosti	E	Pa	$1,35 \cdot 10^6$	$0,65 \cdot 10^6$	$0,72 \cdot 10^6$
Dozvoljeno naprezanje na kidanje	σ_{KID}	Pa	$(11 \div 15) \cdot 10^7$	$(8 \div 11) \cdot 10^7$	$(8 \div 12) \cdot 10^7$
Dozvoljeno naprezanje na savijanje	σ_{SAV}	Pa	$(3,5 \div 5) \cdot 10^7$	$(1,7 \div 2,3) \cdot 10^7$	$(3 \div 3,5) \cdot 10^7$

5.6.1. Cilindrični, slojni namotaj bez kanala



$$N = n_{sl} \times N_{sl}$$

$$a = n_{sl} \cdot q' \text{ (ili } d') + (n_{sl} - 1) \cdot \delta_{mi}$$

$$h = (N_{sl} + 1) \cdot p' \text{ (ili } d')$$

$$a' = a + 2 \quad h' = h + 2l$$

δ_{mi} – debljina međuslojne izolacije
(0,2 ÷ 0,25)mm (nomex)

$l = (20 \div 50)$ mm debljina laminata

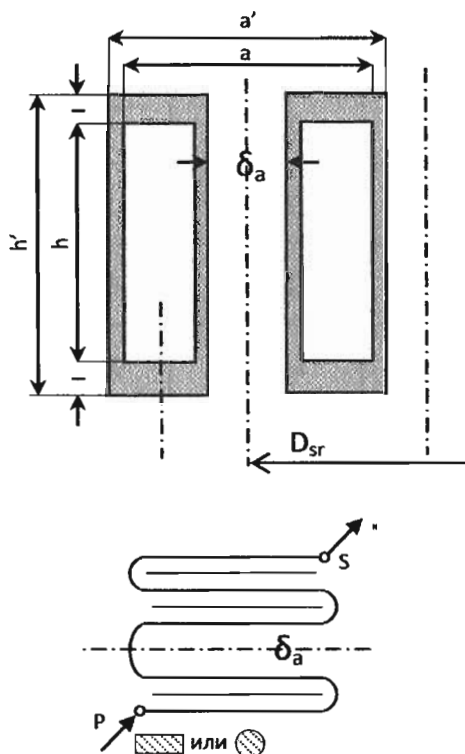
n_{sl} – broj slojeva

N_{sl} – broj navojaka po sloju

d', p', q' – dimenzije izolovanog provodnika

... (5.11)

5.6.2. Cilindrični slojni namotaj sa aksijalnim kanalom (δ_a)



$$N = n_{sl} \times N_{sl}$$

$$a = n_{sl} \cdot q' \text{ (ili } d') + (n_{sl} - 2) \cdot \delta_{mi} + \delta_a$$

$$h = (N_{sl} + 1) \cdot p' \text{ (ili } d')$$

$$a' = a + 2 \quad h' = h + 2l$$

δ_{mi} – debljina međuslojne izolacije
(0,2 ÷ 0,25)mm (nomeks)

$l = (20 \div 50)$ mm debljina laminata

$\delta_a = (8 \div 15)$ mm debljina aks. kanala

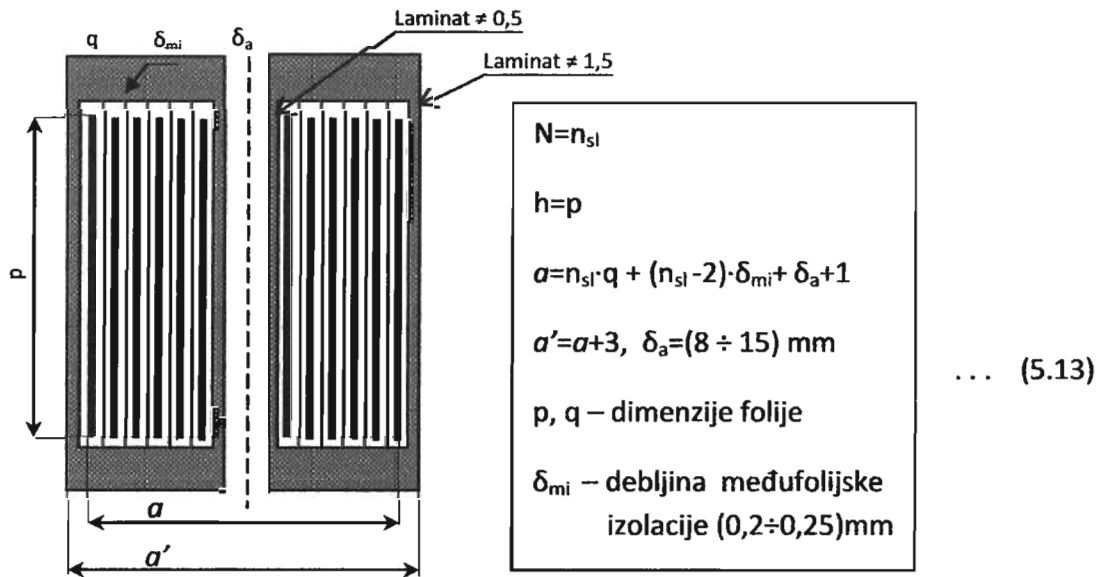
n_{sl} – broj slojeva

N_{sl} – broj navojaka po sloju

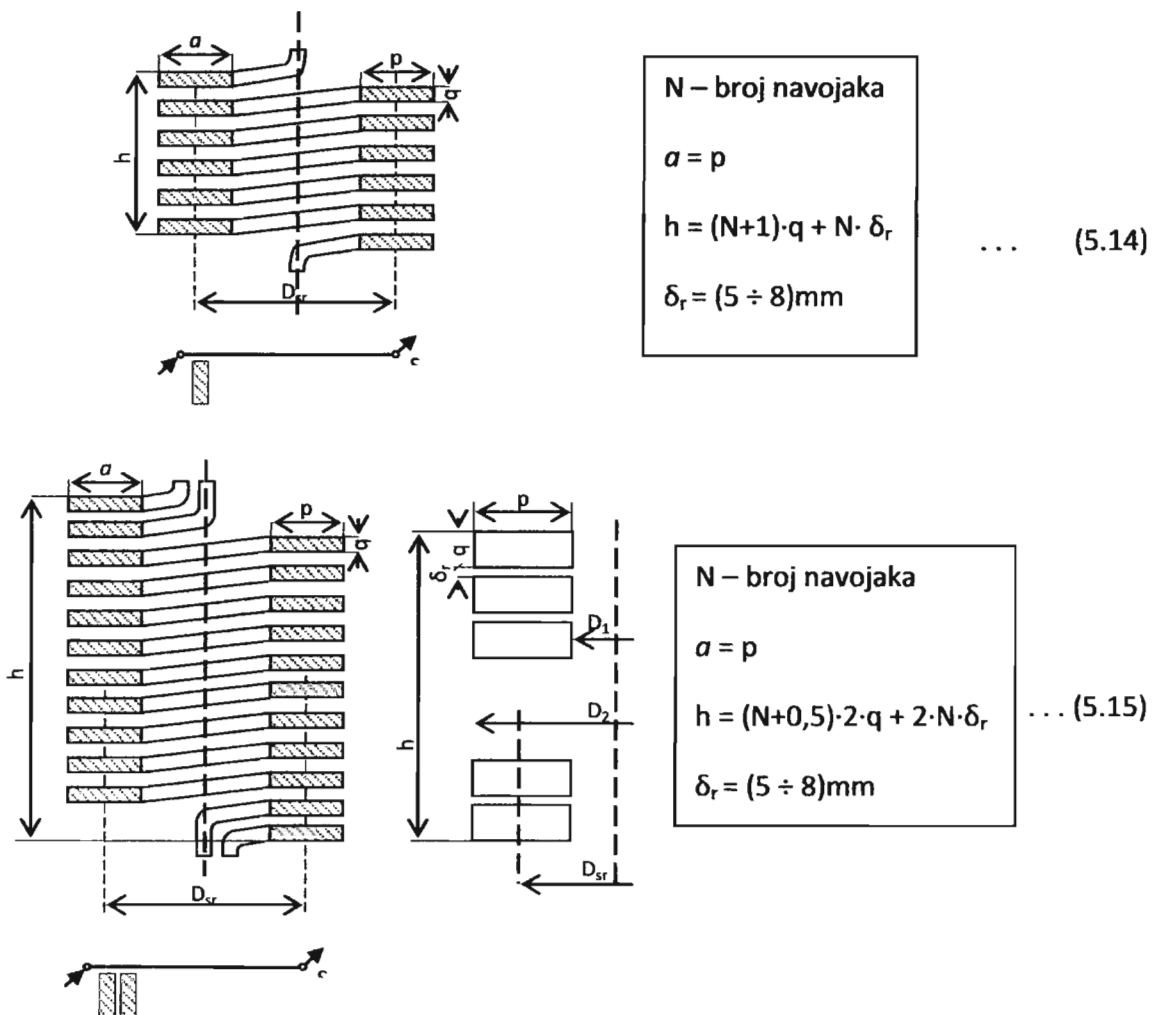
d', p', q' – dimenzije izolovanog provodnika

... (5.12)

5.6.3. Cilindrični slojni folijski namotaj sa kanalom



5.6.4. Spiralni namotaj sa jednim ili dva masivna provodnika



Pošto je namotaj dimenzionisan izračunavaju se sledeće veličine:

- Induktivnost namotaja L (mH)
- Induktivni otpor $X(\Omega) = \omega \cdot L$
- Induktivni pad napona..... $\Delta U(V) = X \cdot I$
- Stvarni koeficijent magnetske sprege $u_k(\%) = \frac{\Delta u}{U} \cdot 100$
 $\sqrt{3}$

5.7. Izračunavanje sopstvene induktivnosti namotaja

Za izračunavanje sopstvene induktivnosti namotaja postoje izrazi koji su teorijski izvedeni na osnovu opšte definicije samoinduktivnosti namotaja i oni će prvo biti izloženi u ovom poglavlju. U praksi se najčešće koriste čisto empirijski izrazi.

Pretpostavimo da imamo jednoslojan namotaj sa N navojaka visine h, namotanih na prečnik D kroz koje protiče struja I. Tada je jačina magnetskog polja:

$$H = \frac{N \cdot I}{h}$$

a gustina fluksa tj. magnetska indukcija:

$$B = \mu_0 \cdot H$$

Pod pretpostavkom da nema fluksa rasipanja (što je vrlo blisko realnom slučaju) ukupan fluks kroz namotaj je:

$$N \cdot \phi = L \cdot I; \quad \phi = B \cdot S$$

Pa sledi:

$$L = N \cdot \frac{\phi}{I} = N \cdot \frac{B \cdot S}{I} = N \cdot S \cdot \frac{\mu_0 \cdot H}{I} = N \cdot S \cdot \frac{\mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{h}}{I}$$

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot S}{h}$$

Za okrugao namotaj, srednjeg prečnika D_{sr} , površina poprečnog preseka magnetskog fluksa je:

$$S = \frac{D_{sr}^2 \cdot \pi}{4}$$

Pa je:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot D_{SR}^2}{4 \cdot h} \approx \frac{N^2 \cdot D_{SR}^2}{h} \cdot 10^{-6} \quad (5.16)$$

Ipak mnogo češće od ovog teorijski dobijenog izraza koriste se izrazi dobijeni na bazi iskustva koji su se pokazali kao tačniji. Tri najčešće relacije za izračunavanje induktivnosti su dali autori:

1. KARPENSKI I KALANTAROV:

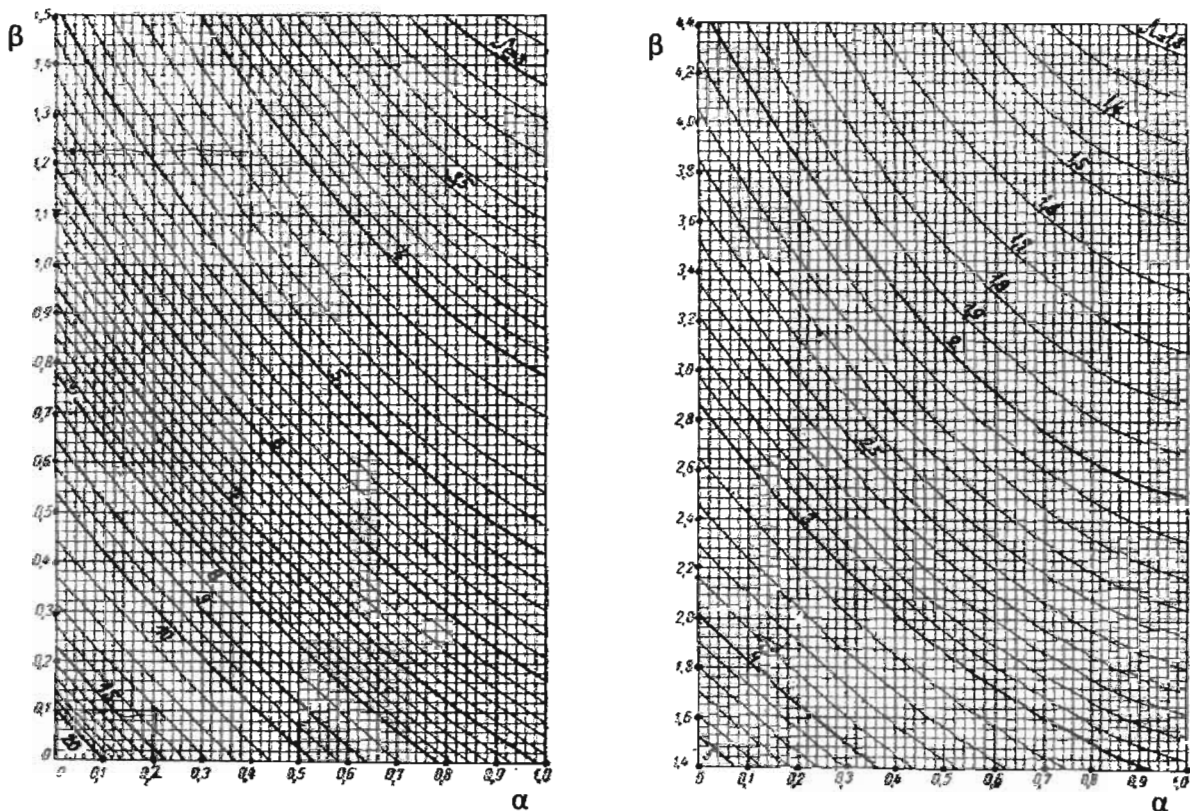
$$L = N^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} (mH) \quad (5.17)$$

Gde je:

D_{SR} (cm) – srednji prečnik namotaja

N – broj navojaka namotaja

λ – koeficijent geometrije koji zavisi od odnosa dimenzija $\alpha = \frac{a}{D_{SR}}$ i $\beta = \frac{h}{D_{SR}}$ i očitava se sa dijagrama na slici 5.2



Slika 5.2 Koeficijent geometrije λ

2. LEITES:

$$L = \frac{N^2 \cdot D_{SR}^2}{h} \cdot k_l \cdot 10^{-3} (mH) \quad (5.18)$$

Gde je:

$$k_l = \frac{\left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right)^2}{1 + \frac{0.45}{\beta}} \cdot 10^{-3}, \quad \alpha = \frac{a}{D_{SR}}, \quad \beta = \frac{h}{D_{SR}}$$

a, h, D_{sr} (m) – dimenzije namotaja

3. WHEELER:

$$L_w = \frac{7.875 \cdot N^2 \cdot D_{SR}^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot D_{SR} + 9 \cdot h + 10 \cdot a} (mH) \quad (5.19)$$

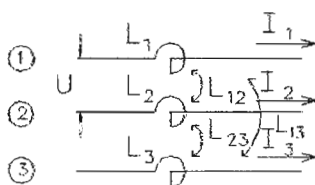
Gde su:

a, h, D_{sr} (m) – dimenzije namotaja

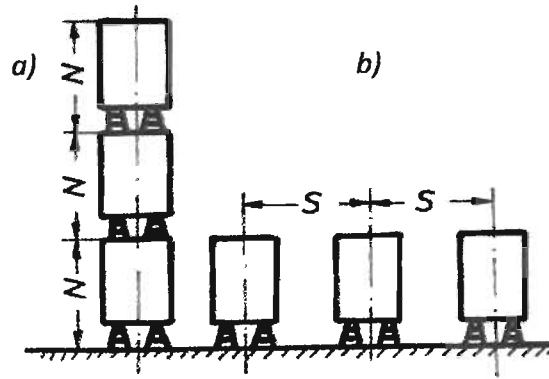
Sva tri izraza daju približno istu vrednost induktivnosti, ali se u praksi potvrđuje da je induktivnost izračunata prema prvom izrazu, najbliža merenoj vrednosti. Ono o čemu se mora voditi računa prilikom projektovanja prigušnice je da međunarodni standard IEC 60076-6 propisuje dozvoljene tolerancije za induktivnost od -0% do +20%.

5.8. Izračunavanje međusobne induktivnosti susednih namotaja

Kod trofazne prigušnice, koja može biti izvedena u vertikalnom ili horizontalnom sklopu slika 5.3, izračunavaju se sopstvene induktivnosti svakog namotaja (L_1, L_2, L_3), a takođe i sve ostale karakteristične veličine. Međutim, ovim električni proračun nije završen, jer mora da se uzme u obzir i međusobni uticaj namotaja pojedinih faza, koji se ispoljava preko međusobne induktivnosti (L_{12}, L_{13}, L_{23}).



Za određivanje ekvivalentnih induktivnosti namotaja uzimajući u obzir sopstvene induktivnosti namotaja (L_1, L_2, L_3) i međuinduktivnosti (L_{12}, L_{13}, L_{23}) posmatra se trofazni komplet prigušnica kao magnetsko vezani induktivni otpori, uključeni u trofaznu mrežu.



Slika 5.3 Vertikalni (a) i horizontalni (b) sklop trofazne prigušnice

Međusobna induktivnost dva koaksijalna (vertikalna) namotaja (na istom prečniku) – slika 5.3.a, može da se izrazi pomoću relacije:

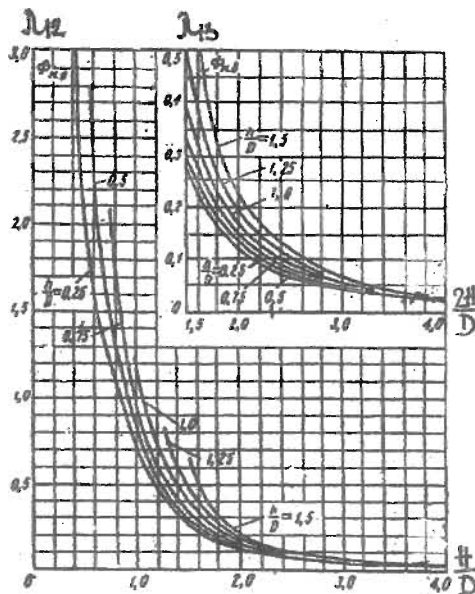
$$\left. \begin{aligned} L_{12} = L_{21} = L_{23} = L_{32} &= N_1^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_H \cdot 10^{-6} \\ L_{13} = L_{31} &= N_3^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_{2H} \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

gde se: $\lambda_H = f\left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{H}{D_{sr}}\right)$, $\lambda_{2H} = f\left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{2H}{D_{sr}}\right)$ očitavaju sa dijagrama sa slike 5.4.

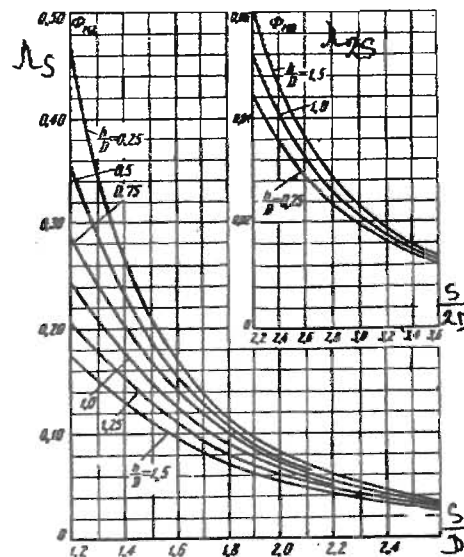
D_{sr} (cm) – srednji prečnik namotaja

h (cm) – visina namotaja

H (cm) – osno rastojanje dva koaksijalna namotaja



Slika 5.4 – Dijagram za λ_H i λ_{2H}



Slika 5.5 – Dijagram za λ_S i λ_{2S}

Međusobna induktivnost dva namotaja na istoj horizontalnoj osi (horizontalni sklop) slika 5.3.b , može da se izrazi pomoću relacije:

$$\left. \begin{aligned} L_{12} = L_{21} = L_{23} = L_{32} &= N_1^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_s \cdot 10^{-6} \\ L_{13} = L_{31} &= N_1^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_{2s} \cdot 10^{-6} \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

gde je: $\lambda_s = f\left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{S}{D_{sr}}\right)$, $\lambda_{2s} = f\left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{2S}{D_{sr}}\right)$ i očitava se sa dijagrama na slici 5.5.

Uticaj međusobnih induktivnosti između dva namotaja pojedinih faza na reaktansu svake faze prigušnice, može se izvesti iz relacija za pad napona svake faze.

Da bi se u sve tri faze vertikalnog trofaznog sklopa dobili isti naponi na namotajima, mora se srednji namotaj uraditi sa nešto manjim brojem navojaka (najčešće jedan navojak manje) i namotati u suprotnom smeru u odnosu na gornji i donji namotaj.

Da bi se izveli izrazi za rezultatne induktivnosti treba poći od izraza za padove napona na svakom namotaju, pod pretpostavkom da je prigušnica napajana simetričnim sistemom trofaznih napona, pa su padovi napona na prigušnicama:

$$\left. \begin{aligned} \underline{\Delta U}_1 &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_{12} \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_{13} \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{\Delta U}_2 &= j \cdot \omega \cdot L_{12} \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_{23} \cdot \underline{I}_3 \\ \underline{\Delta U}_3 &= j \cdot \omega \cdot L_{13} \cdot \underline{I}_1 + j \cdot \omega \cdot L_{23} \cdot \underline{I}_2 + j \cdot \omega \cdot L_3 \cdot \underline{I}_3 \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

Zanemarujući aktivne otpornosti, ekvivalentni induktivni otpori namotaja su:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{\underline{\Delta U}_1}{\underline{I}_1} = j \cdot \omega \cdot L_1 + j \cdot \omega \cdot \left(\frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_1} \cdot L_{12} + \frac{\underline{I}_3}{\underline{I}_1} \cdot L_{13} \right) \\ X_2 &= \frac{\underline{\Delta U}_2}{\underline{I}_2} = j \cdot \omega \cdot L_2 + j \cdot \omega \cdot \left(\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \cdot L_{12} + \frac{\underline{I}_3}{\underline{I}_2} \cdot L_{23} \right) \\ X_3 &= \frac{\underline{\Delta U}_3}{\underline{I}_3} = j \cdot \omega \cdot L_3 + j \cdot \omega \cdot \left(\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_3} \cdot L_{13} + \frac{\underline{I}_2}{\underline{I}_3} \cdot L_{23} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

Ako se izrazi pod 5.23 napišu u preuređenom obliku dobija se:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= j \cdot \omega \cdot L_1 + j \cdot \omega \cdot (\alpha^2 \cdot L_{12} + \alpha \cdot L_{13}) \\ X_2 &= j \cdot \omega \cdot L_2 + j \cdot \omega \cdot (\alpha^2 \cdot L_{23} + \alpha \cdot L_{12}) \\ X_3 &= j \cdot \omega \cdot L_3 + j \cdot \omega \cdot (\alpha^2 \cdot L_{13} + \alpha \cdot L_{23}) \end{aligned} \right\} \quad (5.24)$$

U opštem slučaju ekvivalentni otpori zavise od faznih struja. Ako fazne struje čine simetričan trofazni sistem može se napisati da je:

$$\underline{I}_1 = I, \underline{I}_2 = \underline{\alpha}^2 \cdot I, \underline{I}_3 = \underline{\alpha} \cdot I \quad (5.25)$$

Gde je fazni sačinilac α :

$$\underline{\alpha} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ tj. } \underline{\alpha}^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}, \underline{\alpha}^3 = 1.$$

Ako u izrazima (5.24) zamenimo fazni sačinilac α i zanemarimo članove koji predstavljaju aktivne otpornosti za **ekvivalentne induktivne otpornosti prigušnica u trofaznom vertikalnom sklopu**, u kome je srednji namotaj namotan u suprotnom smeru od gornjeg i donjeg namotaja (čime se smanjuje naprezanje na istezanje izolatora) dobija se:

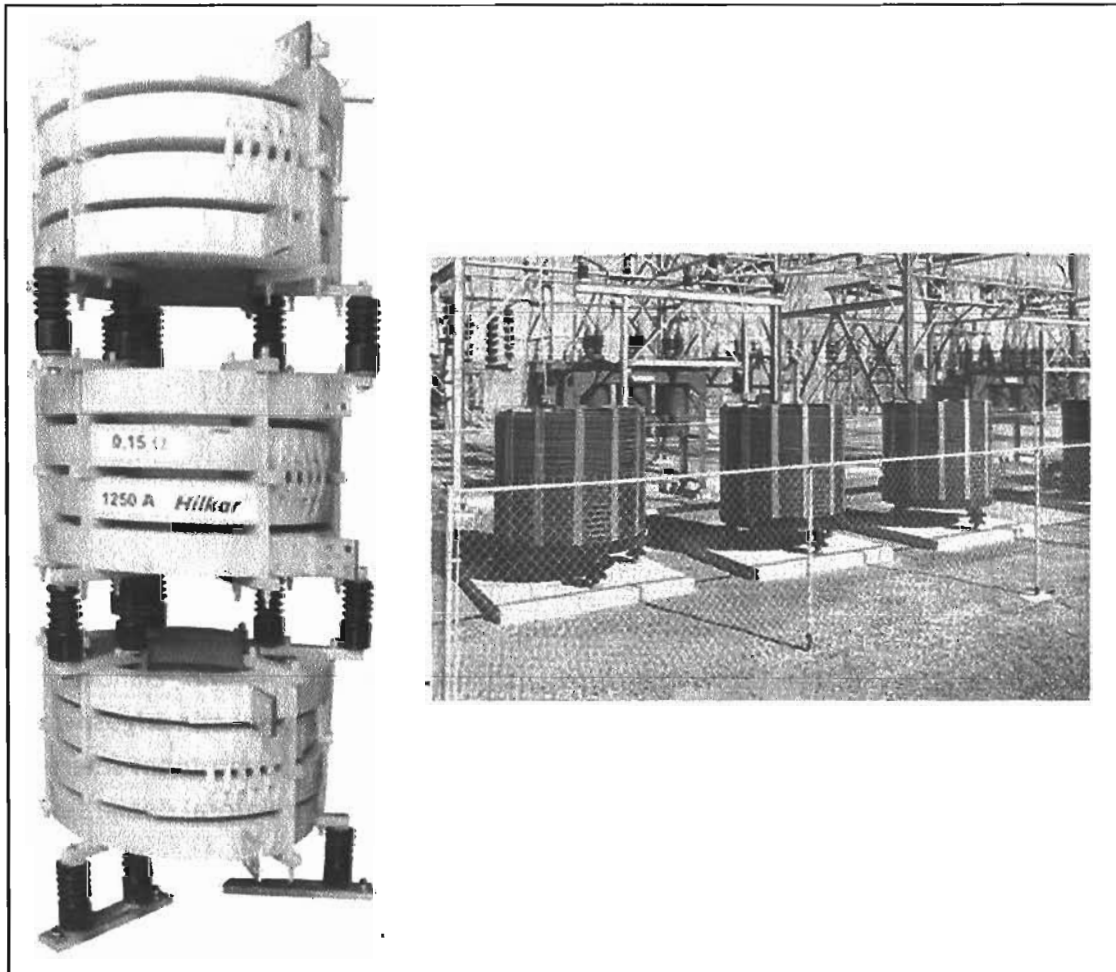
$$X_{1e} = X_{3e} = \omega \cdot \left[L_1 + \frac{L_{12} - L_{13}}{2} \right] \quad X_{2e} = \omega \cdot [L_2 + L_{12}] \quad (5.26)$$

Induktivnost namotaja u vertikalnom trofaznom sklopu može da ima pozitivnu ili negativnu vrednost zavisno od usvojenih referentnih smerova motanja namotaja. Najčešće se u praksi primenjuje isti smer motanja gornjeg i donjeg namotaja a suprotan smer za srednji namotaj.

Induktivnost namotaja u horizontalnom trofaznom sklopu ima negativnu vrednost, jer pri istim smerovima motanja namotaja i struja, magnetsko polje svakog namotaja slabi polje drugog namotaja i pad napona na prigušnicama se smanjuje. Dijagrame za određivanje koeficijenata geometrije monofaznih i trofaznih prigušnica sačinili su ruski autori Kalantarov P.L. i Cejtlin L.A. još 1955. godine.

Za ekvivalentne induktivne otpornosti pojedinih namotaja trofaznog horizontalnog sklopa, dobijaju se relacije:

$$X_{1e} = X_{3e} = \omega \cdot \left[L_1 - \frac{L_{12} + L_{13}}{2} \right] \quad X_{2e} = \omega \cdot [L_2 + L_{12}] \quad (5.27)$$

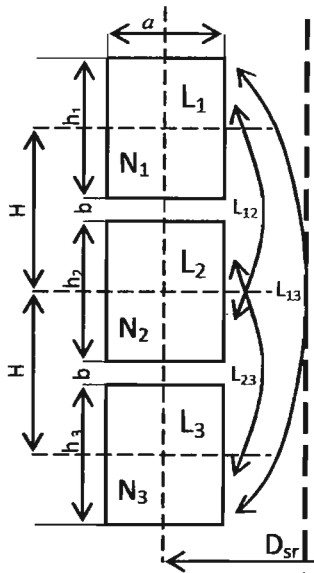


Slika 5.5 Trofazna prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja u vertikalnom i horizontalnom sklopu

Proračunom ekvivalentnih induktivnih otpornosti namotaja i ostalih karakterističnih parametara, završen je električni deo proračuna. Slede sistematizovani prikazi relacija za izračunavanje induktivnosti vertikalnog i horizontalnog sklopa, nakon kojih je izložen termički proračun.

5.9. Sistematizovan prikaz relacija za izračunavanje sopstvene induktivnosti i međusobnih induktivnosti za vertikalni sklop trofazne suve vazdušne prigušnice

1. Sopstvene induktivnosti namotaja



$$L_1 = N_1^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_1 \cdot 10^{-6} (mH)$$

$$\lambda_1 = f\left(\frac{a}{D_{SR}}, \frac{h_1}{D_{SR}}\right)$$

$$L_2 = N_2^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_2 \cdot 10^{-6} (mH)$$

$$\lambda_2 = f\left(\frac{a}{D_{SR}}, \frac{h_2}{D_{SR}}\right)$$

$$L_3 = N_3^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_3 \cdot 10^{-6} (mH)$$

$$\lambda_3 = f\left(\frac{a}{D_{SR}}, \frac{h_3}{D_{SR}}\right)$$

$$N_1 = N_3$$

$$h_1 = h_3$$

$$\lambda_1 = \lambda_3$$

$$L_1 = L_3$$

$$N_2 = N_1 - 1$$

$$D_{sr} (cm)$$

2. Međuinduktivnosti namotaja

$$L_{12} = L_{32} = N_1^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_{12} \cdot 10^{-6} (mH) \quad H = b + \frac{h_1 + h_2}{2}$$

$$\lambda_{12} = f\left(\frac{h_1}{D_{SR}}, \frac{H}{D_{SR}}\right)$$

$$L_{13} = N_2^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda_{13} \cdot 10^{-6} (mH)$$

$$\lambda_{13} = f\left(\frac{h_2}{D_{SR}}, \frac{2 \cdot H}{D_{SR}}\right)$$

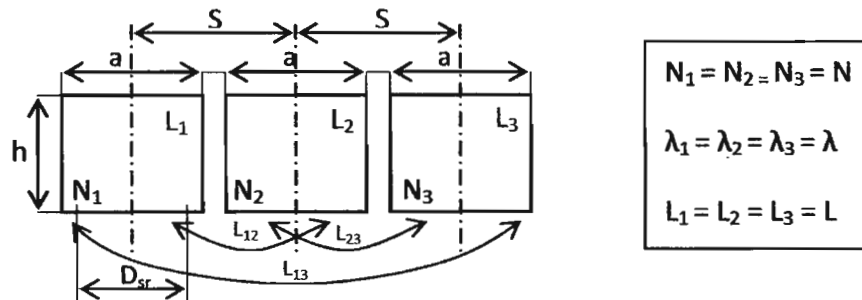
3. Ekvivalentne induktivne otpornosti namotaja

$$X_{1e} = X_{3e} = \omega \cdot \left[L_1 + \frac{L_{12} - L_{13}}{2} \right]$$

$$X_{2e} = \omega \cdot [L_2 + L_{12}]$$

5.10. Sistematizovan prikaz relacija za izračunavanje sopstvene induktivnosti i međusobne induktivnosti za horizontalni sklop trofazne suve vazdušne prigušnice

1. Sopstvene induktivnosti namotaja



$$L_1 = L_2 = L_3 = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} \text{ (mH)}$$

$$\lambda = \left(\frac{a}{D_{sr}}, \frac{h}{D_{sr}} \right)$$

2. Međuinduktivnosti namotaja

$$L_{12} = L_{23} = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_{12} \cdot 10^{-6} \text{ (mH)}$$

$$\lambda_{12} = \left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{S}{D_{sr}} \right)$$

$$L_{13} = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda_{13} \cdot 10^{-6} \text{ (mH)}$$

$$\lambda_{13} = \left(\frac{h}{D_{sr}}, \frac{2S}{D_{sr}} \right)$$

3. Ekvivalentne induktivne otpornosti namotaja

$$X_{1e} = X_{3e} = \omega \cdot \left[L_1 - \frac{L_{12} + L_{13}}{2} \right]$$

$$X_{2e} = \omega \cdot [L_2 + L_{12}]$$

5.11. Izračunavanje gubitaka snage prigušnice

Da bi se se izračunali gubici snage prethodno se mora izračunati masa namotaja prigušnice, koja se izračunava prema izrazu:

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} \text{ (kg)} \quad (5.28)$$

Gde je:

γ (kg/dm³) – specifična masa materijala provodnika

D_{sr} (mm) – srednji prečnik namotaja

N – broj navojaka

S (mm²) – površina preseka provodnika

Gubici snage u namotaju izrađenom u termičkoj klasi izolacije F se izračunavaju na referentnoj temperaturi od 120 °C prema izrazu:

$$P = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} \text{ (W)} \quad (5.29)$$

Gde je:

Δ – (A/mm²) gustina struje u provodniku

k_{120} – temperaturni koeficijent promene otpora sa temperaturom (tabela 5.1)




k_{F120} – Fildov sačinilac koji pokazuje porast omskog otpora pri naizmerničnoj struji u odnosu na otpor pri jednosmernoj struji (tabela 5.2)

Tabela 5.2 daje izraze za izračunavanje k_F za bakar, aluminijum i aldrej na referentnim temperaturama od 75 °C i 120 C i vrednosti za bezdimenzioni koeficijent λ .

Iz tabele 5.1 se vidi da su specifične otpornosti materijala različite za bakar, aluminijum i aldrej i da se povećavaju pri porastu temperature.

Izrazi pokazuju da k_F najviše zavisi od radijalne dimenzije provodnika, sa četvrtim stepenom, a obrnuto je srazmeran sa specifičnom otpornošću ρ pa Fildov sačinilav ima najveću vrednost za bakarni provodnik, a najmanju za provodnik izrađen od aldreja što predstavlja jedan od razloga za čestu upotrebu aldreja u praksi, umesto bakra.

Tabela 5.2 Fildov sačinilac

PARAMETRI		BAKAR	ALUMINIJUM	ALDREJ
$k_f = 1 + \lambda \cdot m^2 \cdot \left(\frac{n \cdot p}{h}\right)^2 \cdot q^4$			$\lambda = \left(\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}{\rho}\right)^2 \frac{1}{9}$	
$k_f = 1 + \lambda \cdot m^2 \cdot \left(\frac{n \cdot q}{h}\right)^2 \cdot p^4$			$\lambda = \left(\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}{\rho}\right)^2 \frac{1}{9}$	
75 °C	λ	0,092	0,0356	0,0224
120 °C		0,069	0,0260	0,0173
$k_f = 1 + \lambda' \cdot m^2 \cdot \left(\frac{n \cdot d}{h}\right)^2 \cdot d^4$			$\lambda' = \left(\frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot f}{\rho}\right)^2 \frac{1}{19,4}$	
75 °C	λ'	0,0427	0,0165	0,013
120 °C		0,0320	0,0122	0,010

Dimenzije p, q, d, h prikazane u tabeli 5.2 su date u (cm), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{H}{m}\right)$

n i m – broj aksijalnih i radijalnih provodnika

5.12. Termički proračun

U normalnim pogonskim uslovima kroz namotaj prigušnice protiče nominalna struja sistema u kome je redno uključena. Ona proizvodi omske gubitke snage, usled kojih se namotaji zagrevaju. Za termičku klasu izolacije F sa kojom se izrađuju suve vazdušne prigušnice, dozvoljeno srednje povišenje temperature namotaja (metoda merenja otpora) je 100 K, a maksimalna vrednost 115 K (direktnim merenjem). Da bi se zadovoljio ovaj termički uslov, potrebno je da snaga hlađenja namotaja bude veća od snage zagrevanja. Snagu zagrevanja čine omski gubici snage izračunati na referentnoj temperaturi od 120 °C (za termičku klasu izolacije F). Snagu hlađenja čine snaga odnošenja toplote strujanjem vazduha i snaga odnošenja toplote zračenjem.

Za nadtemperaturu namotaja se može napisati relacija :

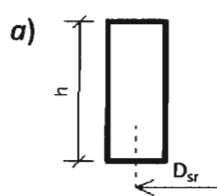
$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{\alpha_{STR} \cdot S_{STR} + \alpha_{ZR} \cdot S_{ZR}} (^\circ C) \quad (5.30)$$

$\alpha_{STR}, \alpha_{ZR}$ – koeficijenti strujanja i zračenja $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

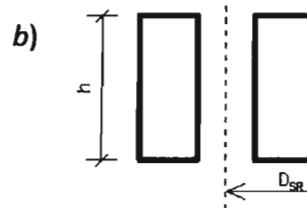
S_{STR}, S_{ZR} – površine strujanja i zračenja (m^2)

Ovde se mora naglasiti da je kod prigušnica u unutrašnjoj montaži dominantno odnošenje toplote strujanjem vazduha, dok se kod prigušnica u spoljašnjoj montaži odvođenje toplote vrši i strujanjem i zračenjem.

Za višeslojne namotaje bez kanala (slika 5.6 a) i sa kanalom (slika 5.6 b) za hlađenje, površina strujanja se računa prema izrazima:



$$S_{STR} = 2 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot h (m^2)$$



$$S_{STR} = 4 \cdot \pi \cdot D_{SR} \cdot h \cdot k_z (m^2) \quad (5.31)$$

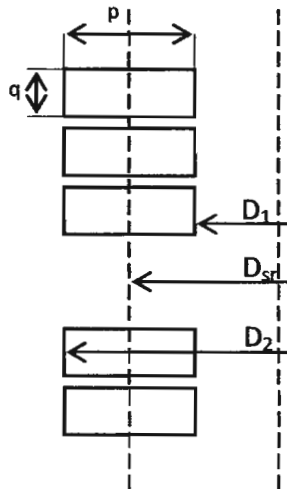
Slika 5.6 Višeslojni namotaj bez kanala (a) i sa kanalom (b) za hlađenje

Gde je k_z – koeficijent zaklonjenosti koji uzima u obzir smanjenje površine strujanja usled distantnih lajsni u rashladnom kanalu. (0,75 ÷ 0,85)

Nadtemperatura slojnih namotaja se izračunava prema izrazu:

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{\alpha_{str} \cdot S_{str}} (^\circ C) \quad (5.32)$$

Za namotaje, motane sa masivnim provodnikom spiralno po celoj visini namotaja i sa kanalima δ_r između provodnika (slika 5.7), površine strujanja i zračenja se izračunavaju prema izrazima:



$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{\alpha_{str} \cdot S_{str} + \alpha_{zr} \cdot S_{zr}} \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

$$S_{str} = 2 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot (q + 0,8 \cdot p)$$

$$S_{zr} = \pi \cdot D_2 \cdot h$$

(5.33)

Slika 5.7 Spiralni namotaj

Koeficijenti strujanja i zračenja vazduha su složene funkcije od temperature namotaja, brzine strujanja vazduha, uglačanosti površine i imaju različite vrednosti za bakarne ili aluminijumske površine namotaja. Za spoljašnju montažu se koriste vrednosti:

	Cu	Al
α_{STR}	11	13
α_{ZR}	6	7

Za unutrašnju montažu, za bakarni namotaj $\alpha_{str}=7,5$.

U režimu kratkog spoja prigušnica trpi kratkotrajno termičko preopterećenje usled dejstva trajne struje kratkog spoja I_{KT} , pa se mora proveriti termička izdržljivost u zadatom vremenu trajanja kratkog spoja (t_k). Pokazatelj termičke izdržljivosti prigušnice u kratkom spoju, koji se mora proveriti, jeste proizvod:

$$I_K \cdot \sqrt{t_k} \text{ (kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}\text{)} \tag{5.34}$$

Ovaj pokazatelj se izračunava, tako što se pođe od jednakosti razvijene toplote u vremenu dt i akumulirane toplote u namotaju prigušnice za isto vreme bez odavanja toplote. Tada se može napisati jednačina zagrevanja:

$$k_f \cdot \rho \cdot \frac{l}{p \cdot S_{pr}} \cdot I_k^2 \cdot dt = S_{pr} \cdot l \cdot \gamma \cdot c \cdot d\theta$$

$$I_k^2 \cdot dt = \frac{S_{pr} \cdot l \cdot \gamma \cdot c}{k_f \cdot \rho \cdot \frac{l}{p \cdot S_{pr}}} \cdot d\theta$$

$$I_k^2 \cdot dt = \frac{p \cdot S_{pr}^2 \cdot \gamma \cdot c}{k_f \cdot \rho} \cdot d\theta$$

Integraljenjem pa korenovanjem ove jednačine dobija se izraz:

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = S_{pr} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot c \cdot 10^{-9}}{\rho_0 \cdot k_f \cdot \beta_1} \ln \frac{1 + \beta_1 \cdot \theta_{max}}{1 + \beta_1 \cdot \theta_0}} \quad (kA \cdot s^{\frac{1}{2}}) \quad (5.35)$$

Veličine iz jednačine 5.37 date su u tabeli 5.1.

Ukoliko je izračunata vrednost (desna strana) veća od zahtevane vrednosti (leva strana izraza), prigušnica je dobro dimenzionisana.

Gde je:

S_{pr} (mm²) – površina preseka provodnika

θ_0 (°C) – temperatura namotaja pre kratkog spoja $\theta_0 = \Delta\theta + \theta_{amb}$.

Ako se izraz za $I_k \sqrt{t_k}$ napiše u obliku:

$$I_k \sqrt{t_k} = S \cdot \sqrt{A \cdot \ln B} \quad (5.36)$$

Gde je:

$$A = \frac{\gamma \cdot c \cdot 10^{-9}}{\rho_0 \cdot \beta_1 \cdot k_f} \quad B = \frac{1 + \beta_1 \cdot \theta_{max}}{1 + \beta_1 \cdot \theta} \quad (5.37)$$

I u izrazima za A i B zamene brojne vrednosti svih veličina datih u tabeli 5.1, tada A i B imaju vrednosti date u tabeli 5.3 koje omogućavaju lakše izračunavanje termičke izdržljivosti namotaja.

Tabela 5.3 Izrazi za izračunavanje A i B

	Bakar	Aluminijum	Aldrej
A	$\frac{512,2 \cdot 10^{-4}}{k_f}$	$\frac{2175,5 \cdot 10^{-5}}{k_f}$	$\frac{2246 \cdot 10^{-5}}{k_f}$
B	$\frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot \theta}$	$\frac{1,884}{1 + 0,00442 \cdot \theta}$	$\frac{1,7236}{1 + 0,00361 \cdot \theta}$

5.13. Dinamički proračun

Ovim proračunom se proverava da li prigušnica bez oštećenja može da podnese dinamička naprezanja, koja nastaju usled dejstva dinamičkih sila pri pojavi kratkog spoja u mreži u kojoj je uključena. Karakteristične veličine struje kratkog spoja u toku prelaznog procesa od trenutka nastanka kratkog spoja do trenutka postizanja stacionarne, tj. ustaljene struje kratkog spoja I_{kr} , prikazane su na slici 5.1.

Trajanje kratkog spoja računa se od momenta nastanka kratkog spoja do momenta prekidanja napajanja mesta kratkog spoja i zavisi od podešenosti vremena zaštitnih releja za isključenje. Maksimalna vrednost udarne aperiodične struje kratkog spoja je data relacijom 5.1.

Za određivanje elektrodinamičkih sila, koje deluju na provodnike namotaja, treba poći od poznate pojave iz teorije elektromagnetike da na provodnik kroz koji protiče naizmenična struja i koji se nalazi u sopstvenom magnetskom polju, jačine H (A/m), deluje elektromagnetska sila koja teži da promeni konfiguraciju provodnika kako bi magnetski fluks, obuhvaćen njegovom konturom bio najveći. Ova sila, pa i naprezanje koje ona izaziva deluje na svaki provodnik namotaja i ona je u normalnim pogonskim uslovima male vrednosti u odnosu na mehaničku čvrstoću namotaja i ne ugrožava njegovu stabilnost. Međutim, pri pojavi kratkog spoja usled nastanka prevelikih struja, koje su nekoliko desetina puta veće od nominalne, javljaju se naprezanja, koja su veća i nekoliko stotina puta i mogu da razore namotaj. Zato je potrebno da se dimenzionisana prigušnica, proveriti na ova naprezanja.

Zadatak određivanja dinamičke otpornosti namotaja se svodi na određivanje maksimalne udarne struje kratkog spoja, koju projektovana prigušnica može da podnese pri dinamičkom naprezanju na kidanje i savijanje, bez pojave deformacija i oštećenja provodnika i izolacije.

Za određivanje elektrodinamičkih sila koje deluju na provodnike namotaja, koriste se relacije za sile koje deluju na dva paralelna provodnika kroz koje teče struja istog smera, pa se provodnici privlače i namotaj teži da se skupi, odnosno da smanji svoju visinu. To je dejstvo aksijalne komponente dinamičke sile, koja je najveća na vrhu i dnu namotaja u težnji da ga „sabije“ i tako smanji visinu.

Međutim, dinamička sila ima i radijalnu komponentu koja teži da promeni konturu navojka i poveća magnetski fluks pa i induktivnost namotaja, istezanjem provodnika. Raspodela i pravci delovanja elektrodinamičkih sila prikazani su na slici 5.8.

Sopstvena induktivnost namotaja se povećava sa povećanjem prečnika namotaja i smanjenjem linijskih dimenzija namotaja. Naprezanja, dakle teže da rastegnu namotaj do kidanja u pravcu prečnika namotaja i sabiju namotaj po visini. Pri naizmjeničnoj struji elektrodinamičke sile su takođe promenljive, a u trenutku pojave kratkog spoja dostižu svoju maksimalnu aperiodičnu komponentu, koja može da izazove deformaciju i oštećenje namotaja.

Promenljivost dinamičkih sila pri kratkom spoju može da izazove vibracije provodnika i cele prigušnice, tako da postoji opasnost od pojave mehaničke rezonancije. Dinamička otpornost namotaja takođe zavisi od dužine trajanja kratkog spoja (t_k), zato je jako važno proračunom proveriti dinamičku otpornost prigušnice pri kratkom spoju.

Za izračunavanje dinamičkih sila, koristi se Lagranževa teorema, prema kojoj je sila jednaka izvodu energije u pravcu kordinate, koju ta sila teži da promeni.

Koristeći izraz za energiju:

$$W = L_k \cdot i^2$$

Dobija se izraz za dinamičku silu (po jedinici dužine):

$$F = \frac{dW}{dx} = I^2 \cdot \frac{dL_k}{dx} \left(\frac{W \text{ sec}}{cm} \right) = 10.2 \cdot I^2 \cdot \frac{dL_k}{dx} (kp)$$

Uvodeći izraz za induktivnost namotaja u kratkom spoju dobija se izraz za podužnu silu:

$$L_k = N^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda \cdot 10^{-9} (mH)$$

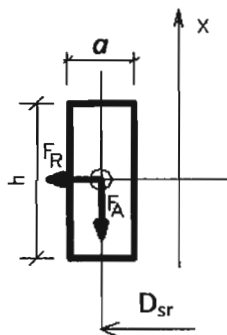
$$F = 10.2 \cdot I^2 \cdot \frac{d(N^2 \cdot D_{SR} \cdot \lambda \cdot 10^{-9})}{dx} = 10.2 \cdot I^2 \cdot N^2 \cdot \frac{d\lambda}{d\left(\frac{x}{D}\right)} \cdot 10^{-3} (kp)$$

Ako se uvede izraz za koeficijent sile Ψ :

$$\Psi = 10.2 \cdot \frac{d\lambda}{d\left(\frac{x}{D_{SR}}\right)} \cdot 10^{-3} \left(\frac{kp}{kA^2} \right)$$

Dobija se konačan izraz za silu:

$$F = I^2 \cdot N^2 \cdot \psi \tag{5.38}$$



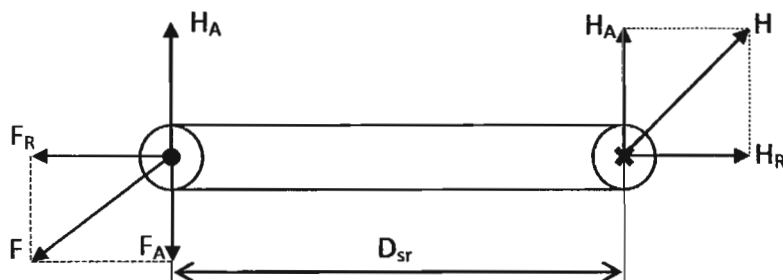
Slika 5.8 Elektrodinamičke sile F_R i F_A

Koeficijent Ψ se javlja kao funkcija geometrijskih dimenzija prigušnica i njihovog međusobnog odnosa. U opštem slučaju razlikuju se dva koeficijenta, jedan za radijalnu silu Ψ_R i drugi za aksijalnu silu Ψ_A .

Sile koje deluju na navojke prigušnice mogu da se odrede na nekoliko načina i uglavnom se izvođenje svodi na određivanje sila između navojaka unutar samog namotaja, pa su sile koja deluju u aksijalnom i radijalnom pravcu određene izrazima:

$$F_A = I^2 \cdot N^2 \cdot \Psi_A \qquad F_R = I^2 \cdot N^2 \cdot \Psi_R \qquad (5.39)$$

Dinamičke sile na navojke namotaja mogu se takođe odrediti koristeći Bio-Savarov zakon, posmatrajući kružni navojak sa strujom I , koji se nalazi u magnetskom polju jačine H , slika 5.9.



Slika 5.9 Dinamičke sile koje deluju na navojke

Odgovarajuće komponente jačine polja H u centru provodnika su H_A i H_R . Prema Bio-Savarovom zakonu, sila po jedinici dužine (podužna sila) je data izrazom:

$$F_A = \mu_0 \cdot I \cdot H_R \left(\frac{W \cdot \text{sec}}{\text{cm}} \right)$$

$$F_R = \mu_0 \cdot I \cdot H_A \left(\frac{W \cdot \text{sec}}{\text{cm}} \right)$$

Radijalna i aksijalna komponenta jačine magnetskog polja su date izrazima:

$$H_R = I \cdot N \cdot \frac{1}{h} \cdot v_R \left(\frac{A}{\text{cm}} \right)$$

$$H_A = I \cdot N \cdot \frac{1}{h} \cdot v_A \left(\frac{A}{\text{cm}} \right)$$

Gde su:

v_R i v_A nedimenzioni koeficijenti zavisni od odnosa dimenzija namotaja

$\frac{a}{D_{sr}}$ i $\frac{h}{D_{sr}}$ a I je struja u jednom provodniku u (kA)

$$1N = 0.102 \text{ kp}$$

$$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.102 \cdot 10^6 = 0.128$$

$$F_A = \mu_0 \cdot I \cdot H_R = 0.102 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \left(I \cdot N \cdot \frac{1}{h} \cdot v_R \right) = 0.128 \cdot \frac{N \cdot I^2}{h} \cdot v_R \left(\frac{\text{kp}}{\text{cm}} \right) \quad (5.40)$$

$$F_R = \mu_0 \cdot I \cdot H_A = 0.102 \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \left(I \cdot N \cdot \frac{1}{h} \cdot v_A \right) = 0.128 \cdot \frac{N \cdot I^2}{h} \cdot v_A \left(\frac{\text{kp}}{\text{cm}} \right) \quad (5.41)$$

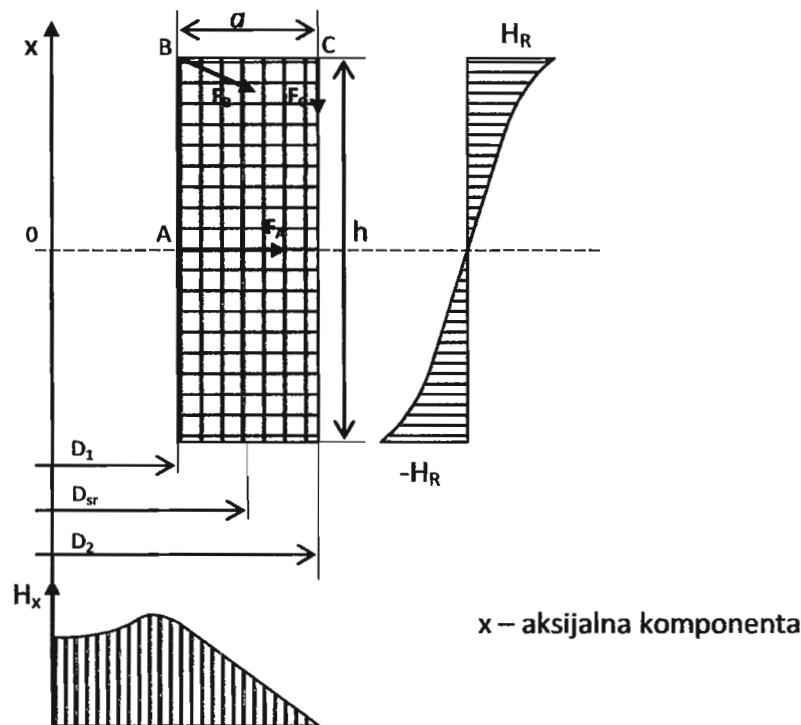
Aksijalna komponenta jačine magnetskog polja u osi prigušnice H_{x0} , slika 5.10 je data izrazom:

$$H_{x0} = \frac{I \cdot N}{h} \cdot \left[v \cdot \left(x' + \frac{\alpha}{2} \right) - v \cdot \left(x' - \frac{\alpha}{2} \right) \right]$$

$$\alpha = \frac{h}{D}, \quad x' = \frac{x}{D}$$

$$v \cdot \left(x' + \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{x' + \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{4 \cdot \left(x' + \frac{\alpha}{2} \right)^2 + 1}}$$

$$v \cdot \left(x' - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{x' - \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{4 \cdot \left(x' - \frac{\alpha}{2} \right)^2 + 1}}$$



Slika 5.10 Prikaz dejstva dinamičkih sila i jačine magnetskog polja na namotaj dimenzija a i h

Pošto se aksijalna komponenta magnetskog polja H_A računa u osi prigušnice, važe sledeći uslovi:

$$\alpha = \frac{h}{D} \quad x' = \frac{x}{D} \quad x = 0 \quad x' = 0 \quad D_2 - D = a$$

$$x' + \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{2 \cdot D} \quad x' - \frac{\alpha}{2} = -\frac{h}{2 \cdot D} \quad D_2 - D_1 = 2 \cdot a$$

$$H_x = \frac{I \cdot N}{h} \cdot \frac{D_2 - D}{D_2 - D_1} \cdot \left[\frac{\frac{h}{2 \cdot D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot D}\right)^2 + 1}} + \frac{\frac{h}{2 \cdot D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot D}\right)^2 + 1}} \right]$$

$$H_x = \frac{I \cdot N}{h} \cdot \frac{a}{2 \cdot a} \cdot \frac{2 \cdot \frac{h}{2 \cdot D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot D}\right)^2 + 1}} = \frac{I \cdot N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2 \cdot D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot D}\right)^2 + 1}} = H_A \quad (5.42)$$

Podužna vrednost radijalne dinamičke sile za struju od 1A koju izaziva aksijalna komponenta magnetskog polja je:

$$F_R = 0.128 \cdot I \cdot H_A = 0.128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2 \cdot D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{2 \cdot D}\right)^2 + 1}} \quad \left(\frac{kp}{cm}\right) \quad (5.43)$$

Maksimalna vrednost radijalne dinamičke sile je:

$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_{kmax}^2 \quad (5.44)$$

Radijalna komponenta magnetskog polja H_R se približno izračunava (u oblasti namotaja) prema relaciji:

$$H_R = 2.2 \cdot \left(\frac{x'}{\alpha}\right)^2 \cdot H_{x0} = 2.2 \cdot \left(\frac{x'}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{I \cdot N}{h} \cdot \left[\frac{x' + \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{4 \cdot \left(x' + \frac{\alpha}{2}\right)^2 + 1}} - \frac{x' - \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{4 \cdot \left(x' - \frac{\alpha}{2}\right)^2 + 1}} \right]$$

Pošto se ovo magnetsko polje računa u osi prigušnice, važe sledeći uslovi:

$$x' = \frac{x}{D} = \frac{\frac{h}{2}}{D} = \frac{h}{2 \cdot D} \quad \alpha = \frac{h}{D} \cdot \frac{x'}{\alpha} = \frac{\frac{h}{2 \cdot D}}{\frac{h}{D}} = 0.5$$

$$x' + \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{2 \cdot D} + \frac{h}{2 \cdot D} = \frac{h}{D} \quad x' - \frac{\alpha}{2} = \frac{h}{2 \cdot D} - \frac{h}{2 \cdot D} = 0$$

$$H_R = 2.2 \cdot 0.5^2 \cdot IN \cdot \left(\frac{\frac{h}{D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2 + 1}} - 0 \right) = 2.2 \cdot 0.25 \cdot \frac{IN}{h} \cdot \frac{\frac{h}{D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2 + 1}} \quad (5.45)$$

Podužna vrednost aksijalne dinamičke sile za struju od 1A konačno ima relaciju:

$$F_A = 0.128 \cdot I \cdot H_R = 0.128 \cdot 2.2 \cdot 0.25 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2 + 1}}$$

$$F_A = 0.0704 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{D}}{\sqrt{4 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^2 + 1}} \left(\frac{kp}{cm}\right) \quad (5.46)$$

Maksimalna vrednost radijalne dinamičke sile je:

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_{kmax}^2 \quad (5.47)$$

U prethodnim relacijama za radijalnu silu (F_R) i aksijalnu dinamičku silu (F_A), struja I predstavlja trajnu, ustaljenu struju kratkog spoja (I_k) koja deluje na jedan provodnik. Međutim, najveće dinamičke sile nastaju pri udarnoj struji kratkog spoja, koja je 2.54 puta veća od I_k i one izazivaju takva dinamička naprezanja koja mogu da oštete, pa i da razore namotaj. Zato je potrebno da se namotaj prigušnice proveri na naprezanja provodnika na istežanje do kidanja usled dejstva radijalne dinamičke sile koja je u slučaju višeslojnog bakarnog namotaja dominantna i naprezanje provodnika na savijanje usled dejstva aksijalne sile kod spiralnog namotaja od aldreja. To se izračunava prema izrazu:

$$\sigma_R = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot S} = \sigma_{kid} \left(\frac{kp}{cm^2}\right) \quad (5.48)$$

$$\sigma_A = \frac{F_{Amax} \cdot l^2}{2 \cdot pq^2} = \sigma_{sav} \quad (5.49)$$

S – poprečni presek jednog provodnika (cm^2)

Izračunata vrednost treba da je manja od dozvoljene vrednosti za upotrebljeni provodni materijal. Pod dejstvom aksijalne dinamičke sile nastaje naprezanje provodnika na pritisak i savijanje. Da ne bi došlo do deformacije provodnika i nagnečenja izolacionih podmetača između provodnika, moment savijanja u osloncima (podmetačima), uz koeficijent sigurnosti 1.2, mora biti uravnotežen sa otpornim momentnom, najčešće pravougaonog preseka, pa je:

$$M_{sav} = M_{otp}$$

$$\frac{F_A \cdot l^2}{12 \cdot \sigma_{sav}} = \frac{p \cdot q^2}{6}$$

$$l_{sav} = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot q^2 \cdot \sigma_{sav}}{F_{Amax}}} \quad \text{– osno rastojanje između radijalnih podmetača u (cm)} \quad (5.50)$$

$$l_{kid} = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot q^2 \cdot \sigma_{kid}}{F_{Rmax}}} \quad \text{– osno rastojanje između lajsni u kanalu u (cm)} \quad (5.51)$$

Pod uticajem aksijalne udarne dinamičke sile nastaje naprezanje podmetača na pritisak, koje takođe mora da se proverí. Ovo naprezanje se izračunava pomoću relacije:

$$\sigma_{podm} = \frac{F_{Amax} \cdot \pi \cdot D_{SR}}{n_p \cdot S_p} \quad (5.52)$$

Gde je:

n_p – broj podmetača po obimu

S_p – površina podmetača

Dozvoljeno naprezanje na izolacioni materijal (vitroplast G11 ili lexan) je:

$$\sigma_{pod} = 20 \cdot 10^7 Pa$$

$$\sigma_{pod} < \sigma_{dozv}$$

Dozvoljena naprezanja provodnika na pritisak do savijanja i na istezanje do kidanja za bakar i aldrej su data u tabeli 5.1.

Udarna struja kratkog spoja koju prigušnica može da podnese se izračunava prema izrazu:

$$I_{kmax} = \sqrt[4]{\frac{6 \cdot \sigma_{kid}^3}{E} \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot p}{N \cdot l \cdot \Psi'}}} = k_\sigma \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot p}{N \cdot l \cdot \Psi'}} (kA) \quad (5.53)$$

	Bakar	Aluminijum	Aldrej
k_σ	11,067	10,528	10,954

Gde je:

K_σ – koeficijent naprezanja

N – broj navojaka

p – broj paralelnih provodnika

h (cm) – visina namotaja

l (cm) – rastojanje između podmetača (oslonaca)

S (cm²) – površina preseka jednog provodnika

Ψ' – dimenzioni koeficijent

Izrazi za dimenzione koeficijente pod uticajem F_{amax} i F_{rmax} su:

$$\Psi'_R = 0,128 \frac{\frac{h}{2D}}{\sqrt{4\left(\frac{h}{2D}\right)^2 + 1}} \quad (5.54)$$

$$\Psi'_A = 0,1547 \frac{\frac{h}{D}}{\sqrt{4\left(\frac{h}{D}\right)^2 + 1}} \quad (5.55)$$

Ukoliko su izračunata naprezanja manja od dozvoljenih za upotrebljene provodne i izolacione materijale prigušnica je dobro dimenzionisana po kriterijumu dinamičkih naprezanja.

5.14. Ukupna masa prigušnice

Ukupna masa prigušnice se izračunava prema izrazu:

$$m_{pr} = k_m \cdot m \quad (5.56)$$

Gde je: $k_m = (1,25 \div 1,4)$

7. STANDARDNE DIMENZIJE PROVODNIKA

Tabela 7.1 Standardne dimenzije profilnih provodnika

$p \times q$	S_{Ca}	$p \times q$	S_{Ca}	$p \times q$	S_{Ca}
3.00 x 2.50	7.50	9.00 x 1.20	10.80	13.00 x 3.40	44.20
3.80 x 3.50	13.30	9.00 x 1.30	11.70	13.00 x 5.00	65.00
4.00 x 4.00	16.00	9.00 x 1.40	12.60	13.00 x 5.20	67.60
4.20 x 1.20	5.04	9.00 x 1.50	13.50	13.00 x 5.50	71.50
4.20 x 2.60	10.92	9.00 x 1.70	15.30	13.20 x 2.80	36.96
5.00 x 1.70	8.50	9.00 x 2.50	22.50	13.30 x 3.00	39.90
5.00 x 2.00	10.00	9.00 x 3.40	30.60	13.50 x 2.60	35.10
5.00 x 2.50	12.50	9.50 x 2.80	26.60	14.00 x 2.00	28.00
5.50 x 0.96	5.28	9.50 x 4.20	39.90	14.00 x 2.20	30.80
5.50 x 1.00	5.50	9.70 x 4.00	38.80	14.00 x 2.60	36.40
5.50 x 1.10	6.05	10.00 x 1.40	14.00	14.00 x 2.70	37.80
6.00 x 1.70	10.22	10.00 x 1.80	18.00	14.00 x 2.80	39.20
6.00 x 3.00	18.00	10.00 x 2.00	20.00	14.00 x 3.00	42.00
7.00 x 1.00	7.00	10.00 x 2.20	22.00	14.00 x 3.20	44.80
7.00 x 1.10	7.70	10.00 x 2.40	24.00	14.00 x 3.30	46.20
7.00 x 1.20	8.40	10.00 x 2.50	25.00	14.00 x 3.40	47.60
7.00 x 1.40	9.80	10.00 x 3.80	38.00	14.00 x 5.00	70.00
7.00 x 1.50	10.50	10.00 x 5.00	50.00	15.00 x 2.00	30.00
7.00 x 1.60	11.20	10.00 x 5.60	56.00	15.00 x 2.40	36.00
7.00 x 2.00	14.00	10.50 x 2.30	24.15	15.00 x 2.50	37.50
7.00 x 2.50	17.50	10.50 x 4.50	47.25	15.00 x 3.00	45.00
7.00 x 3.00	21.00	11.00 x 2.20	24.20	15.00 x 3.30	48.00
7.00 x 3.50	24.50	11.00 x 2.40	26.40	15.00 x 3.50	52.50
7.00 x 4.50	31.50	11.00 x 3.00	33.00	15.00 x 4.00	60.00
7.10 x 1.40	9.94	11.00 x 3.50	38.50	15.80 x 2.40	37.92
7.10 x 2.00	14.20	11.00 x 4.50	49.50	16.00 x 2.20	35.20
7.50 x 1.80	13.50	11.20 x 2.80	31.36	16.00 x 2.40	38.40
7.50 x 2.40	18.00	11.20 x 3.20	35.84	16.50 x 2.00	33.00
7.50 x 3.20	24.00	11.50 x 4.00	46.00	16.50 x 2.50	41.25
8.00 x 1.20	9.60	11.50 x 6.50	74.75	16.50 x 3.40	56.10
8.00 x 1.20	9.60	12.00 x 1.80	21.60	16.60 x 1.80	29.88
8.00 x 1.40	11.20	12.00 x 2.00	24.00	17.00 x 2.00	34.00
8.00 x 1.40	11.20	12.00 x 2.50	30.00	17.00 x 2.20	37.40
8.00 x 1.50	12.00	12.00 x 2.60	31.20	17.00 x 2.50	42.50
8.00 x 1.60	12.80	12.00 x 2.80	33.60	17.00 x 3.50	59.50
8.00 x 1.70	13.60	12.00 x 3.40	40.80	17.00 x 3.60	61.20
8.00 x 1.90	15.20	12.00 x 3.80	45.60	18.00 x 2.20	39.60
8.00 x 2.00	16.00	12.00 x 7.00	84.00	18.60 x 2.40	43.20
8.00 x 2.70	21.60	12.50 x 2.00	25.00	18.00 x 3.00	54.00
8.00 x 3.00	24.00	13.00 x 2.10	27.30	19.00 x 3.00	57.00
8.00 x 3.50	28.00	13.00 x 2.50	32.50	20.00 x 2.60	52.00
8.00 x 4.50	36.00	13.00 x 2.60	33.80	21.00 x 2.90	60.90
8.00 x 5.00	40.00	13.00 x 2.80	36.40	22.00 x 2.80	61.60
8.50 x 1.60	13.60	13.00 x 2.90	37.70		
8.50 x 2.00	17.00	13.00 x 3.00	39.00		

Tabela 7.2 Standardne dimenzije okruglih provodnika

d	d'	S_{Cu}
0,4	0,45	0,1257
0,42	0,48	0,1385
0,43	0,49	0,1452
0,45	0,51	0,1590
0,47	0,53	0,1735
0,48	0,54	0,1810
0,5	0,56	0,1964
0,55	0,62	0,2376
0,6	0,67	0,2827
0,65	0,72	0,3318
0,7	0,77	0,3849
0,75	0,835	0,4418
0,8	0,885	0,5027
0,85	0,935	0,5675
0,9	0,985	0,6362
0,95	1,035	0,7088
1	1,085	0,7854
1,05	1,150	0,8659
1,1	1,200	0,9503
1,15	1,250	1,039
1,2	1,300	1,131
1,25	1,350	1,227
1,3	1,400	1,327

d	d'	S_{Cu}
1,35	1,45	1,431
1,4	1,50	1,539
1,45	1,55	1,651
1,5	1,60	1,767
1,55	1,65	1,887
1,6	1,70	2,011
1,65	1,75	2,138
1,7	1,80	2,270
1,75	1,85	2,405
1,8	1,90	2,545
1,85	1,95	2,687
1,9	2,00	2,835
2	2,10	3,142
2,1	2,22	3,464
2,2	2,32	3,801
2,3	2,42	4,155
2,4	2,52	4,524
2,5	2,62	4,909
2,6	2,72	5,309
2,7	2,82	5,726
2,8	2,92	6,158
2,9	3,02	6,605
3	3,12	7,069

Tabela 7.3 Standardne dimenzije folijskih provodnika

Širina p	400-1000	u skokovima po 50
Debljina q	0,1-1	u skokovima po 0,05

Tabela 7.4 Specijalni profilni provodnici od aldreja

pxq	S_{ald}
30x10	300
30x12	360
30x15	450
30x20	600
30x22	660
30x25	750

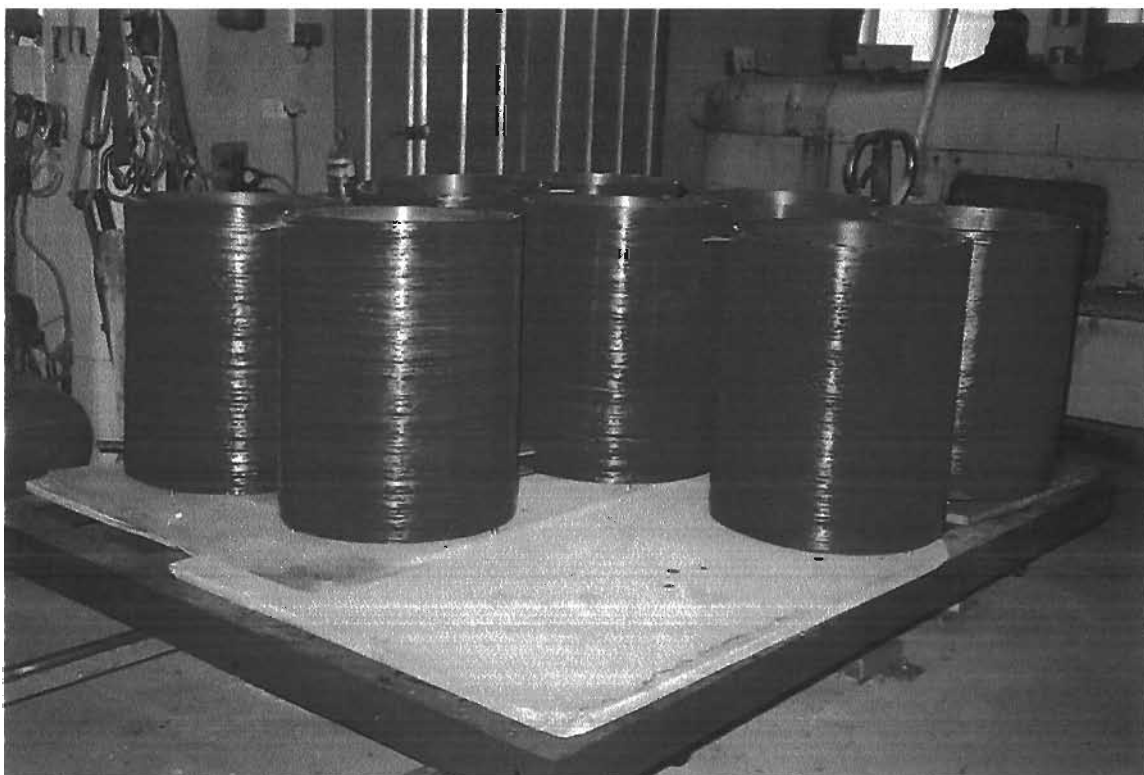
Tabela 1.8 Sistematizovane relacije potrebne za proračun monofazne prigušnice

NAZIV	RELACIJA	Jedinica
Induktivnost	$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a}$	mH
Induktivna otpornost	$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot L$	Ω
Ind. pad napona	$\Delta u = X \cdot I_n$	V
Masa namotaja	$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6}$	kg
Srednji prečnik	$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a + h)^{0,428}$	cm
Fildov sačinilac	$k_{F120cu} = 1 + 0,069 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{q}{h}\right)^2 \cdot p^4$ $k_{F120ald} = 1 + 0,0173 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{q}{h}\right)^2 \cdot p^4$	
Koeficijent snage	$k_{120cu} = 2,808$ $k_{120ald} = 16,53$	
Gubitak snage	$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120}$	W
Nadtemperatura (spiralnog) namotaja Površina strujanja Površina zračenja	$\Delta\theta_{ald} = \frac{P_{120ald}}{13 \cdot S_{str} + 7 \cdot S_{zr}}$ $S_{str} = 2\pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot (q + 0,8p)$ $S_{zr} = \pi \cdot D_2 \cdot h$	$^{\circ}\text{C}$ m^2 m^2
Nadtemperatura namotaja (slojnog)	$\Delta\theta_{cu} = \frac{P_{120cu}}{7,5 \cdot S_{str}}$ $S_{str} = 2\pi \cdot D_{sr} \cdot h \text{ (BEZ KANALA)}$ $S_{str} = 4\pi \cdot D_{sr} \cdot h \text{ (S KANALOM)}$	$^{\circ}\text{C}$ m^2 m^2

Termička izdržljivost namotaja	$I_k \cdot \sqrt{t_k} = S_{cu} \sqrt{\frac{0,0512}{k_{Fcu}} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot \theta}}$ $I_k \cdot \sqrt{t_k} = S_{ald} \sqrt{\frac{0,02246}{k_{Fald}} \cdot \ln \frac{1,7236}{1 + 0,00361 \cdot \theta}}$	$kA \cdot s^{\frac{1}{2}}$ $kA \cdot s^{\frac{1}{2}}$
Maksimalna struja kratkog spoja	$I_{kmax} = 2,54 \cdot I_k$	kA
Maksimalna aksijalna dinamička sila	$F_{Amax} = F_A \cdot I_{kmax}^2$ $F_A = 0,0705 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} \frac{kp}{kA^2 \cdot cm}$	$\frac{kp}{cm}$ $\frac{kp}{kA^2 \cdot cm}$
Maksimalna radijalna dinamička sila	$F_{Rmax} = F_R \cdot I_{kmax}^2$ $F_R = 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} \frac{kp}{kA^2 \cdot cm}$	$\frac{kp}{cm}$ $\frac{kp}{kA^2 \cdot cm}$
Naprezanje provodnika na kidanje	$\sigma_{kid} = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot S_{cu}} = \sigma_R \quad \sigma'_R = 800 - \sigma_{kid}$	$\frac{kp}{cm^2}$
Rastojanje između podmetača/lajсни	$l_{pod} = \sqrt{\frac{2pq^2 \cdot \sigma_{sav dozv}}{F_{Amax}}} \quad l_{laj} = \sqrt{\frac{2pq^2 \cdot \sigma'_R}{F_{Rmax}}}$	cm
Broj podmetača/lajсни po obimu	$n_{pod} = \frac{\pi \cdot D_{sr}}{l_{pod}} \quad n_{laj} = \frac{\pi \cdot D_{sr}}{l_{laj}}$	kom
Pritisak podmetača na sabijanje	$\sigma_p = \frac{F_{Amax} \cdot \pi \cdot D_{sr}}{S_p}$	$\frac{kp}{cm^2}$
Maksimalna struja kratkog spoja	$I_{kmax ald} = 11 \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot n}{N \cdot l \cdot \psi'_A}} \quad \psi'_A = 0,1547 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1}}$ $I_{kmax cu} = 11 \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot n}{N \cdot l \cdot \psi'_R}} \quad \psi'_R = 0,128 \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}}$	kA kA
Ukupna masa prigušnice	$m_{PR} = k \cdot m$ $k = 1,25 + 1,4$	kg

1.11 IZRADA NAMOTAJA TEHNOLOGIJOM LAMINIRANJA

Cilindrični višeslojni namotaji suvih vazdušnih prigušnica izrađeni sa bakarnim provodnicima se danas najčešće izrađuju u suvoj tehnologiji laminiranja, tako što se specijalni stakleni "rowing" impregnisan sa dvokomponentnom epoksi smolom mota po celoj visini namotaja, obrazujući na taj način laminatni cilindar debljine 1 do 2 mm i to sa unutrašnje i spoljašnje strane namotaja. Na vrhu i na kraju namotaja se takođe obrazuje laminat debljine 20 do 50 mm. Takođe se i međuslojna nomex izolacija premazuje slojem epoksi smole. Posle motanja, pristupa se termičkoj obradi namotaja u peći, a u zavisnosti od aralditne recepture određuje se vreme i temperatura očvršćivanja. Čista epoksi smola umrežena staklenim vlaknima („rowing 217“) predstavlja materijal velike mehaničke čvrstoće. Staklena vlakna koja u ukupnom sadržaju laminata učestvuju sa oko 60% unakrsno se motaju u slojevima i impregnišu se sa epoksi smolom. Tako se dobijaju kruti cilindri koji formiraju unutrašnju i spoljašnju površinu namotaja. Ovako laminirani namotaji spadaju u grupu zalivenih namotaja, kod kojih je zanemarljiv problem parcijalnih pražnjenja, jer se radi o niskim naponima, a dinamički su otporniji, posebno folijski namotaj, na aksijalne dinamičke sile. Za napone do 35 kV problem zaostalog vazduha, koji se prilikom motanja namotaja zadržava između slojeva, pa i pojava parcijalnih pražnjenja obično ne predstavlja veći tehnički problem, jer se uz obučeno i iskusno osoblje može minimalizirati. Na sledećoj slici su prikazani namotaji prigušnice izrađeni u laminiranoj tehnologiji.



11. Prigušnica za ograničenje struje kratkog spoja

VPR – 1000/0,7 17/2

ZADATI TEHNIČKI PARAMETRI			
NOMINALNU NAPON	U_n	V	6300
NOMINALNA STRUJA	I_n	A	1000
BROJ FAZA			3
UČESTANOST	f	Hz	50
INDUKTIVNOST	L	mH	0,7+20%
STRUJA KR. SPOJA / VREME	I_k/t_k	kA/s	17/2
STEPEN IZOLACIJE	S_i	kV	7,2
MONTAŽA		spoljšanja	
STANDARD		IEC 60076-6	

USVOJENI TEHNIČKI PARAMETRI			
MATERIJAL PROVODNIKA		aldrer	
DIMENZIJE PROVODNIKA		mm	30x22
GUSTINA STRUJE	Δ	A/mm ²	1,515
TERMIČKA KLASA IZOLACIJE		F(155°)	
VRSTA NAMOTAJA		cilindrični, spiralni	
BROJ NAVOJAKA	N	navojaka	29,5
SREDNJI PREČNIK	D_{sr}	mm	1035

a. MONOFAZNA PRIGUŠNICA

1. ELEKTRIČNI PRORAČUN → **BOLD**

$$h = (N + 0,5) \cdot q + (N - 0,5) \cdot \delta_r = 30 \cdot 22 + 29 \cdot 5 = 805 \rightarrow 810 - 30 = 780 \text{ mm}$$

$$a = p = 30$$

$$\alpha = \frac{a}{D_{sr}} = \frac{30}{1035} = 0,0289$$

$$\lambda = 7,9 \text{ (dijagram slika 5.2)}$$

$$\beta = \frac{h}{D_{sr}} = \frac{780}{1035} = 0,753$$

$$L = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 29,5^2 \cdot 103,5 \cdot 7,9 \cdot 10^{-6} = 0,711 \text{ mH}$$

$$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a} = \frac{7,875 \cdot 29,5^2 \cdot 1,035^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1,035 + 9 \cdot 0,78 + 10 \cdot 0,03} = 0,70 \text{ mH}$$

$$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a + h)^{0,428} = 950 \cdot \left(\frac{0,711}{29,5^2}\right)^{0,571} \cdot (3 + 78)^{0,428} = 1075 \text{ mm}$$

$$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot 0,711 = 0,223 \Omega$$

$$\Delta u = X \cdot I_n = 0,223 \cdot 1000 = 223 \text{ V}$$

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} = 2,7 \cdot \pi \cdot 1035 \cdot 29,5 \cdot 660 \cdot 10^{-6} = 171 \text{ kg}$$

$$k_{F120} = 1 + 0,0173 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{q}{h}\right)^2 \cdot p^4 = 1 + 0,0173 \cdot \left(\frac{29,5 \cdot 22}{780}\right)^2 \cdot 3^4 = 1,97$$

$$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} = 16,53 \cdot 171 \cdot 1,515^2 \cdot 1,97 = 12780 \text{ W}$$

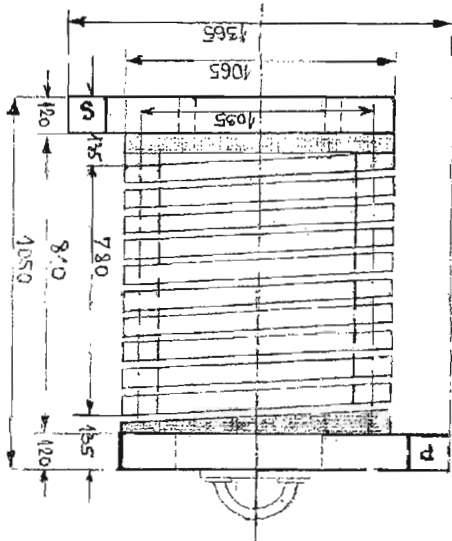
2. TERMIČKI PRORAČUN → **BOLD**

$$S_{str} = 2\pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot (q + 0,8p) = 2\pi \cdot 1,035 \cdot 29,5 \cdot (0,022 + 0,8 \cdot 0,03) = 8,824 \text{ m}^2$$

$$S_{zr} = \pi \cdot D_2 \cdot h = \pi \cdot 1,065 \cdot 0,78 = 2,61 \text{ m}^2$$

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{13 \cdot S_{str} + 7 \cdot S_{zr}} = \frac{12780}{13 \cdot 8,824 + 7 \cdot 2,61} = 96 \text{ }^\circ\text{C} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Slika monofazne prigušnice



$$m_{PR} = 1,4 \cdot m = 1,4 \cdot 171 = 240 \text{ kg}$$

$$I_{kmax} = k_{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot r}{N \cdot l \cdot \psi'_A}} = 11 \cdot \sqrt{\frac{6,6 \cdot 78 \cdot 1}{29,5 \cdot 13,548 \cdot 0,064}} = 49,3 \text{ kA} > 43,18 \text{ kA}$$

$$\psi'_A = 0,1547 \cdot \frac{\frac{D_{sr}}{h} \sqrt{4 \left(\frac{D_{sr}}{h}\right)^2 + 1}}{0,753} = 0,1547 \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot 0,753^2 + 1}}{0,753} = 0,064$$

$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_{kmax}^2 = 0,0145 \cdot 43,18^2 = 27 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$F_{Rmax} \cdot D_{sr} = \frac{2 \cdot S}{27 \cdot 103,5} = \frac{2 \cdot 6,6}{27 \cdot 103,5} = 212 < 800 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$\theta = \Delta\theta + \theta_{amb} = 96 + 40 = 136^\circ\text{C}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 17 \cdot \sqrt{2} = 24 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 5 \sqrt{\frac{2246 \cdot 10^{-5}}{1,7236} \cdot \ln \frac{k_F}{1 + 0,0036 \cdot \theta}} \quad (\text{tabela 5.3})$$

$$= 660 \sqrt{\frac{2246 \cdot 10^{-5}}{1,7236} \cdot \ln \frac{1,97}{1 + 0,0036 \cdot 136}} = 26,92 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} > 24$$

3. DINAMIČKI PRORAČUN

$$I_{kmax} = 2,54 \cdot I_{kt} = 2,54 \cdot 17 = 43,18 \text{ kA}$$

$$F_A = 0,282 \cdot \frac{N}{h} \cdot 0,25 \cdot \frac{D_{sr}}{h} \sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1} = 0,282 \cdot \frac{78}{29,5} \cdot 0,25 \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot 0,753^2 + 1}}{0,753}$$

$$= 0,011 \frac{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}}{\text{kp}}$$

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_{kmax}^2 = 0,011 \cdot 43,18^2 = 20,51 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$l = \sqrt{\frac{F_{Amax}}{2pq^2 \cdot \sigma_{savdozv}}} = \sqrt{\frac{20,51}{2 \cdot 3 \cdot 2,2^2 \cdot 200}} = 16,82 \text{ cm}$$

NAPOMENA: Zbog savijanja prigušnice naprezanje na savijanje se uzima manje od vrednosti date u tabeli 5.1, tj. umesto (300 do 500) uzima se 200 kp/cm²
 $n_p = \frac{l}{\pi \cdot D_{sr}} = \frac{16,82}{\pi \cdot 103,5} = 19,33 \rightarrow$ usvojeno $n_p = 24$ podmetača

ZADATI TEHNIČKI PARAMETRI			
NONIMALNI NAPON	U_n	V	
NOMINALNA STRUJA	I_n	A	1250
BROJ FAZA			1
UČESTANOST	f	Hz	50
INDUKTIVNOST	L	mH	0,5+20%
STRUJA KR. SPOJA / VREME	I_k/t_k	kA/s	31,5/1
STEPEN IZOLACIJE	S_i	kV	
MONTAŽA		spoljašnja	
STANDARD		IEC 60353	

USVOJENI TEHNIČKI PARAMETRI			
MATERIJAL PROVODNIKA		aldrej	
DIMENZIJE PROVODNIKA		mm	2x(30x15)
GUSTINA STRUJE	Δ	A/mm ²	1,388
TERMIČKA KLASA IZOLACIJE		F(155°)	
VRSTA NAMOTAJA		cilindrični, spiralni	
BROJ NAVOJAKA	N	navojaka	29,5
SREDNJI PREČNIK	D_{sr}	mm	1015

ELEKTRIČNI PRORAČUN

$$h = 30 \cdot 2 \cdot 15 + 59 \cdot 7 = 1313 \div 1317 - 37 = 1280 \text{ mm}$$

$$a = 30$$

$$\alpha = \frac{a}{D_{sr}} = \frac{30}{1015} = 0,0295 \quad \lambda = 5,65 \text{ (dijagram, slika 5.2)}$$

$$\beta = \frac{h}{D_{sr}} = \frac{1280}{1015} = 1,26$$

$$L = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 29,5^2 \cdot 101,5 \cdot 5,65 \cdot 10^{-6} = 0,5 \text{ mH}$$

$$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a} = \frac{7,875 \cdot 29,5^2 \cdot 1,015^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 1,015 + 9 \cdot 1,28 + 10 \cdot 0,03} = 0,475 \text{ mH}$$

$$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a+h)^{0,428} = 950 \cdot \left(\frac{0,5}{29,5^2}\right)^{0,571} \cdot (3+128)^{0,428} \\ = 108,017 \text{ mm}$$

$$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot 0,5 = 0,157 \Omega$$

$$\Delta u = X \cdot I_n = 0,157 \cdot 1250 = 196,25 \text{ V}$$

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} = 2,7 \cdot \pi \cdot 1015 \cdot 29,5 \cdot 900 \cdot 10^{-6} = 229 \text{ kg}$$

$$k_{F120} = 1 + 0,0173 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{q}{h}\right)^2 \cdot p^4 = 1 + 0,0173 \cdot \left(\frac{2 \cdot 15 \cdot 29,5}{1280}\right)^2 \cdot 3^4 = 1,67$$

$$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} = 16,53 \cdot 229 \cdot 1,388^2 \cdot 1,67 = 12178 \text{ W} \rightarrow 12200$$

TERMIČKI PRORAČUN

$$S_{str} = 2 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot (q + 0,8p) = 2\pi \cdot 1,015 \cdot 29,5 \cdot 2 \cdot (0,015 + 0,8 \cdot 0,03) \\ = 14,67 \text{ m}^2$$

$$S_{zr} = \pi \cdot D_2 \cdot h = \pi \cdot 1,045 \cdot 1,28 = 4,2 \text{ m}^2$$

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{13 \cdot S_{str} + 7 \cdot S_{zr}} = \frac{12200}{13 \cdot 14,67 + 7 \cdot 4,2} = 55,42 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 56 \text{ }^\circ\text{C} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = \Delta\theta + \theta_{amb} = 56 + 40 = 96 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 31,5 \cdot \sqrt{1} = 31,5 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} I_k \cdot \sqrt{t_k} &= S_{ald} \sqrt{\frac{2246 \cdot 10^{-5}}{k_F} \cdot \ln \frac{1,7236}{1 + 0,0036 \cdot \theta}} = \\ &= 900 \sqrt{\frac{2246 \cdot 10^{-5}}{1,67} \cdot \ln \frac{1,7236}{1 + 0,0036 \cdot 96}} = 51,34 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} > 31,5 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

DINAMIČKI PRORAČUN

$$I_{kmax} = 2,54 \cdot I_{kT} = 2,54 \cdot 31,5 = 80 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} F_A &= 0,282 \cdot \frac{N}{h} \cdot 0,25 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,282 \cdot \frac{29,5}{128} \cdot 0,25 \cdot \frac{1,26}{\sqrt{4 \cdot 1,26^2 + 1}} \\ &= 0,00753 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}} \end{aligned}$$

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_{kmax}^2 = 0,00753 \cdot \left(\frac{80}{2}\right)^2 = 12,048 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$l = \sqrt{\frac{2pq^2 \cdot \sigma_{savdozv}}{F_{Amax}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 1,5^2 \cdot 200}{12,048}} = 14,97 \text{ cm} \rightarrow 15 \text{ cm}$$

NAPOMENA: Da bi se dobila veća otpornost provodnika na savijanje i veći broj podmetača naprezanje na savijanje se uzima manje od vrednosti date u tabeli 5.1, tj. umesto (300 do 350) uzima se 200 kp/cm^2

$$n_p = \frac{\pi \cdot D_{sr}}{l} = \frac{\pi \cdot 101,5}{15} = 21,25 \rightarrow \text{usvojeno } n_p = 24 \text{ podmetača (lexan)}$$

$$l_{stv} = \frac{\pi \cdot 101,5}{24} = 13,28 \text{ cm}$$

$$\sigma_{savstv} = \frac{F_{Amax} \cdot l_{sav}^2}{2 \cdot p \cdot q^2} = \frac{12,048 \cdot 13,28^2}{2 \cdot 3 \cdot 1,5^2} = 158 < (300 \div 350) \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_p = \frac{F_{Amax} \cdot \pi \cdot D_{sr}}{S_p} = \frac{12,048 \cdot \pi \cdot 101,5}{3 \cdot 2,5} = 512,23 < 2000 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \text{ (vitroplast)}$$

$$F_R = 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2 \cdot D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2 \cdot D_{sr}} \right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{29,5}{128} \cdot \frac{0,63}{\sqrt{4 \cdot 0,63^2 + 1}} =$$

$$= 0,0115 \frac{kp}{kA^2 \cdot cm}$$

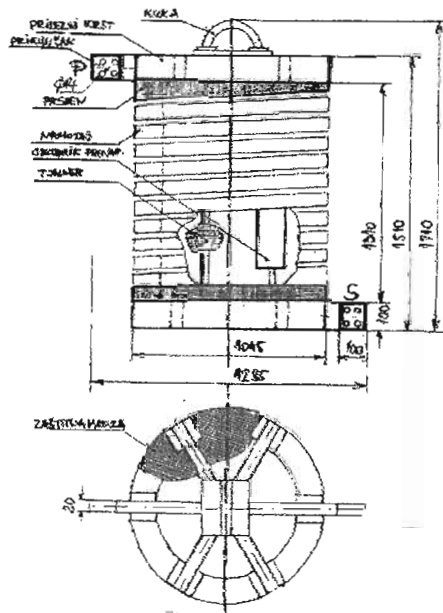
$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_{kmax}^2 = 0,0115 \cdot 40^2 = 18,4 \frac{kp}{cm^2}$$

$$\sigma_{kid} = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot \frac{S}{2}} = \frac{18,4 \cdot 101,5}{2 \cdot 4,5} = 205 < 800 \frac{kp}{cm^2}$$

$$\Psi'_A = 0,1547 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}} \right)^2 + 1}} = 0,1547 \cdot \frac{1,26}{\sqrt{4 \cdot 1,26^2 + 1}} = 0,07182$$

$$I_{kmax} = k_\sigma \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot r}{N \cdot l \cdot \Psi'_A}} = 11 \cdot \sqrt{\frac{4,5 \cdot 128 \cdot 2}{29,5 \cdot 13,28 \cdot 0,07182}} = 70,38 \text{ kA}$$

$$m_{PR} = 1,4 \cdot 229 = 320,6 \div 330 \text{ kg}$$

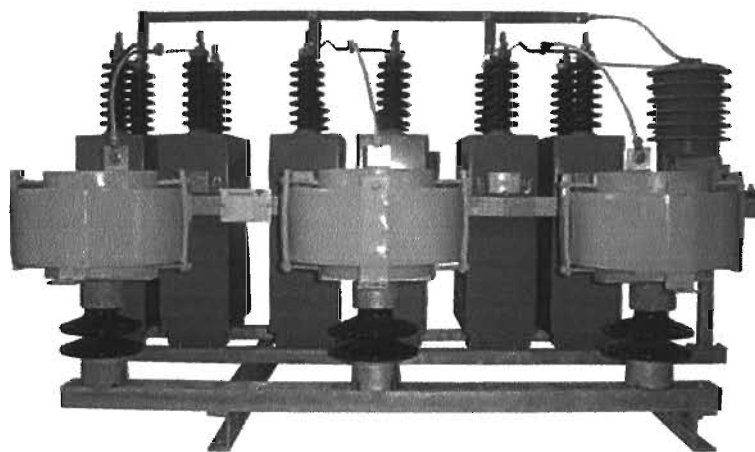


Zaključak:

1. Ispitivanje prigušnice u skladu sa standardom IEC60353 je potvrdilo računsku vrednost induktivnog otpora a ogled zagrevanja je potvrdio računsku vrednost nadtemperature namotaja.
2. Dielektrična ispitivanja prigušnice stranim naponom 50 Hz i atmosferskim udarnim naponom su pokazala zadovoljavajuću dielektričnu otpornost izolacije.
3. Dinamička izdržljivost prigušnice pri kratkom spoju je proverena u laboratoriji snage u Krajovi, Rumunija i rezultati su bili pozitivni i ako računaska vrednost za I_{kmax} to nije pokazala.
4. Prigušnicu VF-1250/0,5 je instalisana za VF vezu TS Požega (220/110) – TS Bajina Bašta (220/35)
5. Slična prigušnica VF– 1250/0,3 je instalisana za vezu TS Bajina Bašta – TS Valjevo 3 kao i u TS Zlatibor

(UPUTSTVO)

1. VAZDUŠNE MONOFAZNE PRIGUŠNICE ZA OGRANIČENJE UKLOPNE STRUJE KONDENZATORA

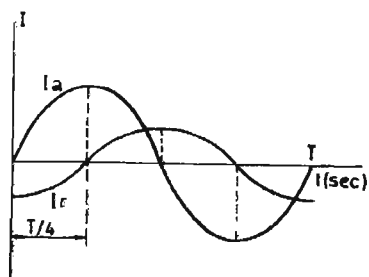


1.1 Osnovna funkcija kondenzatora u energetske sistemima

U svim električnim instalacijama koje se napajaju naizmeničnom strujom i koje sadrže prijemnike kao što su na primer: transformatori, motori, pumpna postrojenja, elektromotorni pogoni i slično, apsorbirana električna energija se sastoji iz dve vrste energija:

- aktivne energije (kWh) koja se direktno pretvara u mehaničku ili neku drugu vrstu korisne energije, dakle direktno se upotrebljiva.
- reaktivna energije (kVarh) koja isključivo služi za stvaranje naizmeničnog magnetskog polja kod prijemnih aparata, dakle nije direktno upotrebljiva, jer ostaje u mreži.

Ovim dvema energijama odgovaraju aktivna (I_a) i reaktivna (I_r) komponenta struje i obe se izražavaju u amperima (A). Ove dve struje su naizmeničnog karaktera i istih perioda ali je svaka od njih nula za vreme dok je druga u maksimumu, slika 1.1 što znači da su fazno pomerene za $T/4$ u vektorskom obliku, slika 1.2. Fazni pomeraj struja I_r i I_a pretstavljen je u obliku ugaonog kašnjenja struje I_r za 90° u odnosu na struju I_a , koja je u fazi sa naponom.



Slika 1.1

Prividna struja I , sa kojom izvor električne energije snabdeva potrošače i koju mere instrumenti je geometrijski zbir ove dve struje:

$$I = I_a + I_r$$

Ova relacija se primenjuje i na snagu, slika 1.2 pa je :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

ili još dalje, ako je U linijski napon mreže

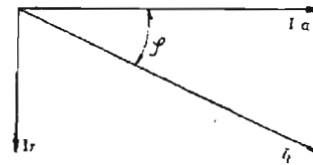
$$(k \cdot U \cdot I)^2 = (k \cdot U \cdot I_a)^2 + (k \cdot U \cdot I_r)^2$$

gde je :

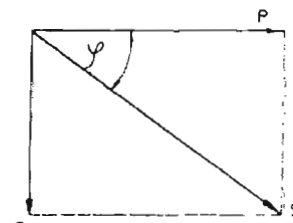
$k=1$ za monofaznu mrežu

$k=\sqrt{2}$ za dvofaznu mrežu

$k=\sqrt{3}$ za trofaznu mrežu



Slika 1.2



Slika 1.3

Praktično, prema vektorskom dijagramu snaga prikazanom na slici 1.3 proizilazi da će aktivna snaga P koju uzimaju potrošači odnosno prijemnici, pri stalnoj prividnoj snazi S biti utoliko veća, ukoliko je reaktivna snaga i ugao φ budu manji, a $\cos \varphi$ veći jer je :

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad Q = S \cdot \sin \varphi$$

Ovo su izrazi pomoću kojih se definiše sačinioac snage, $\cos \varphi$.

Značaj pojma sačinioaca snage jasno proizilazi iz izraza za linijsku struju pri simetričnom trofaznom sistemu napona:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad \rightarrow \quad I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

Iz ovog izraza se vidi da je pri stalnoj snazi P i stalnom naponu U, struja I, odnosno prividna snaga S obrnuto proporcionalna sa $\cos \varphi$ i da smanjenje $\cos \varphi$ dovodi do povećanja potrebne prividne snage, što se jasno vidi iz sledeće tabele:

$\cos \varphi$	1	0.8	0.6	0.4
P(kW)	100			
S(kVA)	100	125	167	250

Suprotno od navedenog može se zaključiti da će pri svakoj prividnoj snazi S i naponu sistema U aktivna snaga prijemnika biti veća ako je $\cos \varphi$ veći.

Poboljšanje faktora snage se često u praksi naziva "kompenzacija reaktivne energije", što u praksi donosi mnoga poboljšanja kao što su:

- smanjenje pada napona i gubitaka na zagrevanju
- povećanje polaznog momenta kod asinhronih motora
- povećanje opterećenja bez izmene postojeće instalacije

Kao idealno sredstvo za rešavanje kompenzacije reaktivne energije jeste kondenzator snage, paralelno uključen sa prijemnikom. Poznata je činjenica iz teorije naizmjeničnih struja i električnih kola da u električnom kolu koje sadrži čist induktivitet L , struja koja u njemu teče kasni za naponom za 90° , a u električnom kolu koje sadrži čist kapacitet, struja koja u njemu teče prednjači naponu za 90° .

Dakle, kondenzator uključen na naizmjenični napon poseduje svojstvo da daje struju koja prednjači tom naponu za 90° i praktično funkcioniše kao generator reaktivne energije.

Struja I koja teče od izvora do mesta paralelne veze navedenih elemenata R, L i C predstavlja geometrijski zbir struja I_L i I_C . Ako se vrednost kapaciteta pravilno izabere, može se postići da struja I bude manja od struje I_L i tada je sačinilac snage $\cos \varphi$ u nerazgraničenom delu kola veći od $\cos \varphi_1$ u grani koja sadrži induktivitet s obzirom da je ugao φ_1 veći od ugla φ_2 .

Znači da vezivanjem određene vrednosti kapaciteta C paralelno sa induktivitetom L , može se smanjiti struja I od izvora do mesta paralelne veze i povećati $\cos \varphi$ u tom delu mreže. Posle vezivanja kondenzatora, prijemnik uzima potrebnu mu reaktivnu energiju od kondenzatora a ne od generatora, kako je do tada bio slučaj. Sada generator napaja datu tačku samo aktivnom snagom a reaktivna snaga cirkuliše između kondenzatora i potrošača. Iz svega izloženog, jasno je da postoji veliki interes i proizvođača i potrošača za što većim $\cos \varphi$, što se postiže kompenzacijom pomoću kondenzatora. Od načina izbora snage kondenzatora zavisi da li se planira potpuna ili delimična kompenzacija. Određivanje reaktivne snage kondenzatora se najčešće vrši iz dva razloga: tehnički razlozi, kada je cilj smanjenje pada napona ili rasterećenje transformatora ili voda i ekonomski razlozi kada je cilj smanjenje troškova za reaktivnu energiju itd.

Dakle, generalno rečeno zadatak kondenzatora paralelno uključenim sa opterećenjem, koje može biti pojedinačni motor ili neko industrijsko postrojenje, je da proizvodi reaktivnu energiju potrebnu tom potrošaču ili drugim rečima da u toj tački sistem poboljša $\cos \varphi$.

Slično kao i paralelno vezan kondenzator, u prenosnim i distributivnim mrežama se koristi redno vezani kondenzator. Redni kondenzator u kolu naizmjenične struje uvodi negativnu odnosno kapacitivnu reaktansu. Struja kroz tu kapacitivnu reaktansu proizvodi pad napona koji prednjači naponu za 90° . Taj pad napona je suprotan padu napona u induktivnoj reaktansi pa se može reći da on pri nominalnoj učestanosti potpuno ili delimično kompenzuje pad napona kroz induktivnu reaktansu napojnog voda. Rezultat je smanjenje pada napona u napojnim vodovima i treperenje osvetljenja, a sa druge strane povećanje prenosnih sposobnosti spojnih prenosnih vodova i poboljšanje stabilnosti sistema.

Prethodno izlaganje o opštoj primeni energetske kondenzatora, redno ili paralelno uključenih u energetske postrojenjima pokazuje da su energetske kondenzatori danas univerzalno usvojeni kao praktično, pouzdano i ekonomično rešenje kod mnogih problema gde se postavlja pitanje nivoa napona, popravka faktora snage, opterećenja prijemnika itd.

- Kao što svaki energetski uređaj (transformator, generator, motor, prekidač itd) mora imati određeni element zaštite od mogućih strujnih ili naponskih kvarova, tzv. udara, tako i energetske kondenzatori moraju imati zaštitu.

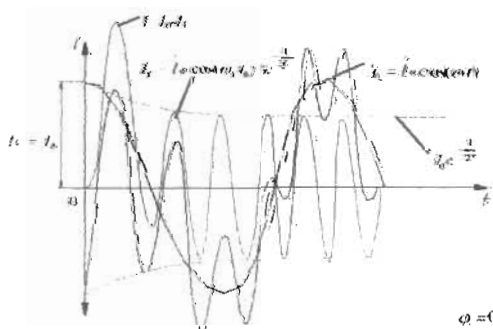
Kao uobičajena zaštita kondenzatora najčešće se koriste:

- osigurači
- strujni i naponski transformatori
- prekidači sa zaštitom od preopterećenja i odgovarajućom snagom prekidanja
- prenaponska zaštita
- relejna zaštita
- prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora

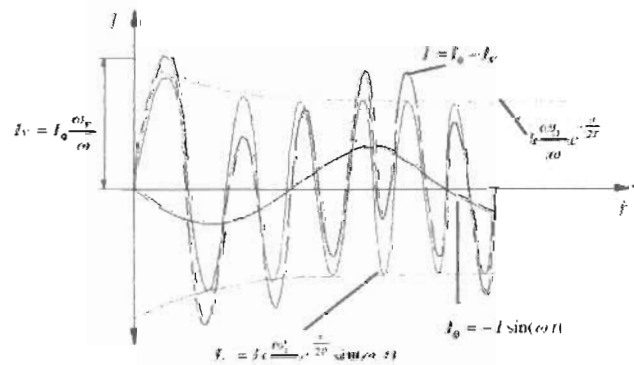
Kada se uključi prvi stepen kondenzatorske baterije, moguće je da trenutno poteče preterano velika struja iz sistema, tzv. uklopna struja kondenzatora. U praksi se preduzimaju mere za ograničenje uklopne struje kondenzatora uključivanjem otpora ili induktivne reaktanse u strujno kolo. Pri tome je reaktansa mnogo efikasnija.

1.2. Pojave pri uključanju kondenzatora u energetski sistem

Stavljanje kondenzatorske baterije pod napon, uklapanjem sklopnog aparata uzrokuje uklopnu struju, koja je funkcija napona priključenja, kapaciteta i otpora strujnog kruga, vrednosti i mesta induktiviteta u mreži, napona baterije u trenutku kada se zatvori kolo. Ta struja dostiže vrlo visoku amplitudu (reda veličine struje kratkog spoja), veliku strminu porasta, vrlo veliku frekvenciju, što sve izaziva velika naprezanja i kondenzatora i prekidača i pojavu prenapona u namotajima strujnih transformatora i sekundarnim krugovima zaštite. Termičko delovanje ovih uklopnih struja na uređaje nije naročito opasno, jer se struje vrlo brzo prigušuju zbog relativno male vremenske konstante. Ove velike struje predstavljale su u prvo vreme konstruktivne probleme, pa se nametnula potreba za njihovom ograničenju, koje se danas sistematski obavlja pomoću otpora ili induktivne reaktanse. Drugo rešenje se u praksi pokazalo kao efikasnije: na slikama 1.4 i 1.5 su prikazane struje uklapanja kondenzatora u zavisnosti od faznog ugla φ .



Slika 1.4 Struja uklapanja kondenzatora za $\varphi_u = 0^\circ$



Slika 1.5 Struja uklapanja kondenzatora za $\varphi_u = 90^\circ$

Prilikom uključanja kondenzatorske baterije kroz strujni krug protiče struja koja se sastoji od dve komponente od kojih prva osciluje sa frekvencijom mreže ($\omega=2\pi f$), a druga sa vlastitom frekvencijom kola (ω_1). Od praktičnog značaja je druga komponenta, trako da je amplituda ukupne struje I_{\max} data izrazom:

$$I_{max} = \sqrt{2} \cdot I_c \cdot \sqrt{\frac{P_k}{Q_c}}$$

Gde je :

I_c – efektivna vrednost stacionarne struje kondenzatorske baterije

P_k – snaga kratkog spoja na mestu kondenzatorske baterije

Q_c – snaga kondenzatorske baterije

Ovaj izraz pokazuje da amplituda ukupne struje najčešće znatno premašuje amplitudu stacionarne struje.

Maksimalna struja naprezanja kondenzatorskih baterija propisana je standardom IEC za kondenzatore, koji preporučuje da trenutna maksimalna vrednost uklopne struje baterije ne bude veća od 100 - struke efektivne vrednosti nominalne struje baterije, kako ne bi došlo do prevelikih naprezanja baterije zbog brzog porasta napona. U većini realnih mreža s obzirom na vrednosti snage kratkog spoja i snage baterije, ispunjen je uslov: $I_{max} < 100 I_c$ tako da je zadovoljen ovaj kriterijum bez dodatnih mera. Ukoliko ipak struja uklapanja premašuje dozvoljenu vrednost neophodno je u seriju sa kondenzatorom postaviti prigušnicu koja će je ograničiti na manje opasnu vrednost. Sve veća potrošnja električne energije i povećani troškovi prenosa i distribucije energije uslovljavaju značajnu primenu kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage, a samim tim i primenu vazdušnih prigušnica za ograničenje uklopne struje.

1.3 Karakteristične veličine prigušnice za ograničenje uklopne struje kondenzatora (In rush current limiting reactors)

Ove prigušnice su vazdušne, monofazne, ređe trofazne sa vazdušnim jezgrom. Osnovna karakteristika ove prigušnice je konstantna vrednost induktivnog otpora, odnosno induktivnosti kako u normalnom pogonu tako i pri pojavi nekog kratkog spoja ili pri uključivanju u mrežu. Uključuju se u liniju redno sa kondenzatorom koga štite pa se često u praksi nazivaju, linearne prigušnice. Za vreme normalnog radnog režima, kroz namotaj prigušnice protiče trajna nominalna struja tj. struja kondenzatora. Ako dakle dođe do kratkog spoja ili do velike struje uključanja kondenzatora usled čega se ukupni otpor kola smanji na neznatnu vrednost, još uvek u kolu postoji induktivni otpor koji prigušuje struju na manje opasnu vrednost, pa se zato ovi uređaju zovu prigušnice.

U zavisnosti od tehničkih karakteristika mreže i mogućih pojava kratkih spojeva ili druge vrste kvara, induktivnost se bira tako da se postigne željeno smanjenje struje.

- Karakteristične veličine, neophodne za projektovanje prigušnica su :
 - Nominalna trajna struja $I_n(A)$ pri nominalnom naponu $U_n(V)$ i nominalnoj učestanosti $f(Hz)$, koja se odabira tako da $U_n(V)$ bude najmanje jednako najvećoj dopuštenoj struji pripadajuće kondenzatorske baterije

- Nominalna uklopna struja $I_{1n}(kA)$ koja predstavlja temenu vrednost najveće uklopne struje kondenzatora. Ova struje se odabira tako da pokrije sve poznate slučajeve uključenja kondenzatorskih baterija ili sekcije baterija. Prigušnica mora biti otporna na dinamička naprezanja izazvana uklopnom strujom. Termičko naprezanje prigušnice je beznačajno malo, jer se radi o veoma kratkom vremenu trajanja uklopne struje
- Nominalni induktivitet $L_n(mH)$ koji predstavlja vrednost induktivnosti pri frekvenciji mreže
- Vreme trajanja uklopne struje $t_k(s)$
- Stepen izolacije, koji mora odgovarati najvišem naponu mreže u kojoj će prigušnica biti ugrađena
- Standard za proizvodnju i ispitivanje
- Montaža...unutrašnja ili spoljašnja, na potpornim izolatorima (iako je napon između priključaka mali, jer je reaktansa mala ali je zato ceo namotaj na potencalu U_n u odnosu na zemlju).

1.4 Kriterijum za izbor parametara prigušnice

Kriterijumi za izbor parametara prigušnice su parametri postrojenja u kojima je uključena, da bi ograničila uklopnu struju kondenzatora, i to:

parametri postrojenja	kriterijum	Parametri prigušnice
U_n postr.	$U_n \geq U_n$ postr.	U_n
I_{max} radna	$I_n \geq I_{max}$ radna	I_n
$I_{k max}$ postr.	$I_{kmax} \geq I_{k max}$ postr.	$I_{k max}$
$I_{k/1s}$ postr.	$I_{k/1s} \geq I_{k/1s}$ postr.	$I_{k/1s}$
	L	zahtevana vrednost

1.5 Projektovanje prigušnice za ograničenje uklopne struje kondenzatora

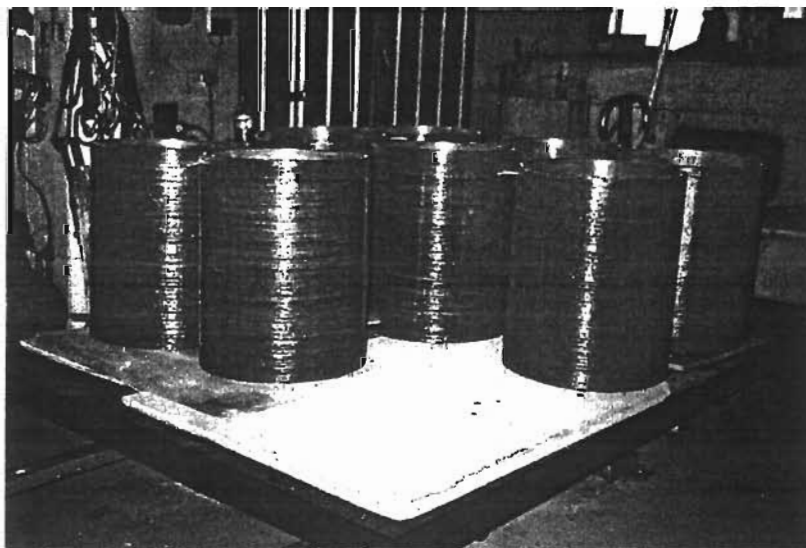
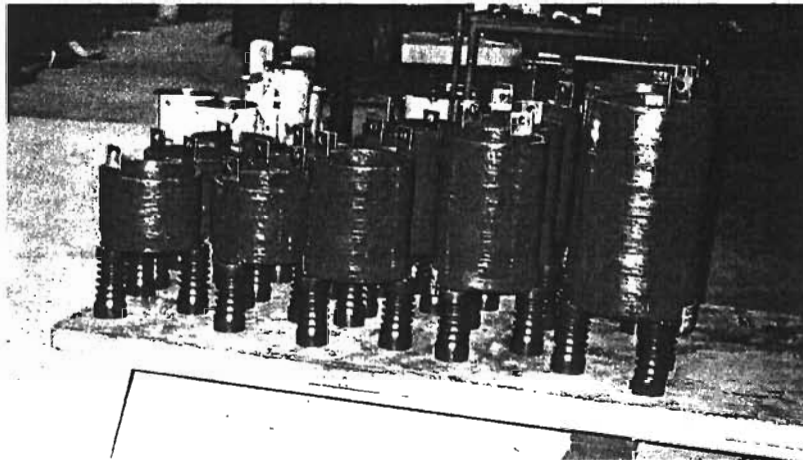
Osnovni zahtev koji prigušnica treba da ispuni, osim ispunjenja svih zadatih tehničkih uslova, je pouzdanost u pogonu. Pošto je prigušnica za ograničenje uklopne struje najčešće predviđena za unutrašnju montažu i pošto ona u postrojenju predstavlja "strano telo", njeno prisustvo treba da je što "neprimetnije" pa dimenzijama i težinom mora da se prilagodi mestu ugradnje.

Na osnovu zadatih tehničkih uslova treba projektovati prigušnicu, što podrazumeva izradu proračuna i konstrukcije tako da se postigne zadata induktivnost, njena osnovna karakteristika, a takođe i zadovoljavajuća termička i dinamička otpornost.

Proračun se sastoji iz tri dela: električni, termički i dinamički.

Metodologija ovog proračuna je ista kao za proračun prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja

Slike prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora domaće proizvodnje:



Prigušnica za ograničenje uklopne struje
kondenzatora

ZADATI TEHNIČKI PARAMETRI			
NONIMALNU NAPON	Un	V	5000
NOMINALNA STRUJA	In	A	50
BROJ FAZA			1
UČESTANOST	f	Hz	50
INDUKTIVNOST	L	mH	0,35
STRUJA KR. SPOJA / VREME	I _k /t _k	kA/s	2,15/1
STEPEN IZOLACIJE	SI	kV	7.2
MONTAŽA			nestrasnja
STANDARD			IEC 60076-6

USVOJENI TEHNIČKI PARAMETRI			
MATERIJAL PROVODNIKA			BAKAR
DIMENZIJE PROVODNIKA		mm	3 x ϕ 2,5/3
GUSTINA STRUJE	Δ	A/mm ²	2,523
TERMIČKA KLASA IZOLACIJE			F(155°)
VRSTA NAMOTAJA			VIŠESLOJNI BEZ KANALA
BROJ NAVOJAKA	N	navojaka	58,5
SREDNJI PREČNIK	D _{sr}	mm	180

25

ELEKTRIČNI PRORAČUN

Namotaj ima 3 sloja, BEZ KANALA [21, 19, 185]

$$h = 22 \cdot 3 \cdot 3 = 198 \div 200 \text{ mm}$$

$$a = 3 \cdot 3 + 2 \cdot 0,5 = 10 + 2 \cdot 0,5 = 13$$

$$\alpha = \frac{a}{D_{sr}} = \frac{10}{180} = 0,055$$

$$\beta = \frac{h}{D_{sr}} = \frac{200}{180} = 1,11$$

→

$$\lambda = 6,05 \text{ (dijagram slika 1.6)}$$

$$L = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 585^2 \cdot 18 \cdot 6,05 \cdot 10^{-6} = 0,3726 \text{ mH}$$

$$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a} = \frac{7,875 \cdot 585^2 \cdot 0,18^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,18 + 9 \cdot 0,20 + 10 \cdot 0,01} = 0,3578 \text{ mH}$$

$$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a+h)^{0,428} = 950 \cdot \left(\frac{0,3578}{585^2}\right)^{0,571} \cdot (1+20)^{0,428}$$

= mm

$$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot 0,3578 = 0,112 \Omega$$

$$\Delta u = X \cdot I_n = 0,112 \cdot 50 = 5,61 \text{ V}$$

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot \pi \cdot 180 \cdot 585 \cdot 1981 \cdot 10^{-6} = 5,832 \div 6 \text{ kg}$$

$$k_{F120} = 1$$

$$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} = 2,808 \cdot 6 \cdot 2523 \cdot 1 = 405 \text{ W}$$

TERMIČKI PRORAČUN

$$S_{str} = 2 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot h = 2\pi \cdot 0,18 \cdot 0,2 = 0,226 \text{ m}^2$$

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{7,5 \cdot S_{str}} = \frac{733}{7,5 \cdot 0,226} = 61,91 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 63 \text{ }^\circ\text{C} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = \Delta\theta + \theta_{amb} = 63 + 40 = 103 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 215 \cdot \sqrt{1} = 215 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = S_{cu} \sqrt{\frac{0,05122}{k_F} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot \theta}}$$

$$= 1981 \sqrt{\frac{0,05122}{1} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot 103}} = 217 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} > 215 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

DINAMIČKI PRORAČUN

$$F_A = 0,282 \cdot \frac{N}{h} \cdot 0,25 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,282 \cdot \frac{585}{20} \cdot 0,25 \cdot \frac{1,11}{\sqrt{4 \cdot 1,11^2 + 1}}$$

$$= 0,094 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}}$$

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_k^2 = 0,094 \cdot \left(\frac{50}{3}\right)^2 = 26,1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$F_R = 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{585}{20} \cdot \frac{0,555}{\sqrt{4 \cdot 0,555^2 + 1}}$$

$$= 0,139 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}}$$

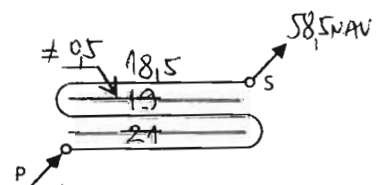
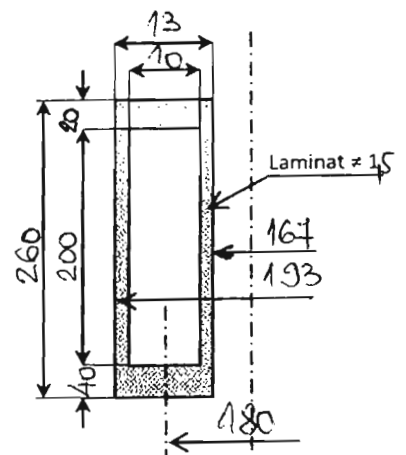
$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_k^2 = 0,139 \cdot \left(\frac{50}{3}\right)^2 = 38,61 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{kid} = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot \frac{S}{3}} = \frac{38,61 \cdot 18}{2 \cdot \frac{1981}{3}} = 52,62 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} < 800 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$M_{pr} = 1,25 \text{ m} = 1,25 \cdot 6 = 7,5 \text{ m}$$

DIMENZIJE:

$$\Phi 167/193 \times 260$$



Prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora

ZADATI TEHNIČKI PARAMETRI			
NOMINALNU NAPON	U_n	V	6000
NOMINALNA STRUJA	I_n	A	450
BROJ FAZA			1
UČESTANOST	f	Hz	50
INDUKTIVNOST	L	mH	0,1+20%
STRUJA KR. SPOJA / VREME	I_k/t_k	kA/s	20/1
STEPEN IZOLACIJE	Si	kV	7,2
MONTAŽA		Unutrašnja	
STANDARD		IEC 60076-6	

USVOJENI TEHNIČKI PARAMETRI			
MATERIJAL PROVODNIKA		BAKAR	
DIMENZIJE PROVODNIKA		mm	3x(16x3,5)
GUSTINA STRUJE	Δ	A/mm ²	2,678
TERMIČKA KLASA IZOLACIJE		F(155°)	
VRSTA NAMOTAJA		cilindrični, višeslojni	
BROJ NAVOJAKA	N	navojaka	20,5
SREDNJI PREČNIK	D_{sr}	mm	370

ELEKTRIČNI PRORAČUN

Namotaj ima četiri sloja sa kanalom 10mm u sredini (6; 5; 5; 4,5) nav

$$h = 7 \cdot 3 \cdot 16,34 = 343,14 \div 348 \text{ mm}$$

$$a = 2 \cdot 3,84 + 0,5 = 8,18 \div 9 + 2 = 11 + 10 + 11 = 32 - 3 = 29$$

$$\alpha = \frac{a}{D_{sr}} = \frac{29}{370} = 0,078$$

$$\lambda = 6,62 \text{ (dijagram slika 5.2)}$$

$$\beta = \frac{h}{D_{sr}} = \frac{348}{370} = 0,94$$

$$L = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 20,5^2 \cdot 37 \cdot 6,62 \cdot 10^{-6} = 0,1029 \text{ mH}$$

$$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a} = \frac{7,875 \cdot 20,5^2 \cdot 0,37^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,37 + 9 \cdot 0,348 + 10 \cdot 0,029} = 0,1 \text{ mH}$$

$$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a + h)^{0,428} = 950 \cdot \left(\frac{0,1029}{20,5^2}\right)^{0,571} \cdot (2,9 + 34,8)^{0,428} \\ = 35,17 \text{ mm}$$

$$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot 0,1029 = 0,0323 \Omega$$

$$\Delta u = X \cdot I_n = 0,0323 \cdot 450 = 14,53 \text{ V}$$

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot \pi \cdot 370 \cdot 20,5 \cdot 168 \cdot 10^{-6} = 35,63 \div 36 \text{ kg}$$

$$k_{F120} = 1 + 0,069 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{p}{h}\right)^2 \cdot q^4 = 1 + 0,069 \cdot 4^2 \cdot \left(\frac{6 \cdot 3 \cdot 16}{348}\right)^2 \cdot 0,35^4 = 1,011$$

$$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} = 2,808 \cdot 36 \cdot 2,678^2 \cdot 1,011 = 733 \text{ W}$$

TERMIČKI PRORAČUN

$$S_{str} = 4 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot h \cdot 0,75 = 4\pi \cdot 0,37 \cdot 0,348 \cdot 0,75 = 1,213 \text{ m}^2$$

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{7,5 \cdot S_{str}} = \frac{733}{7,5 \cdot 1,213} = 80,57 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 82 \text{ }^\circ\text{C} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = \Delta\theta + \theta_{amb} = 82 + 40 = 122 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 20 \cdot \sqrt{1} = 20 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = S_{cu} \sqrt{\frac{0,05122}{k_F} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot \theta}} \quad (\text{tabela 5.3})$$

$$= 168 \sqrt{\frac{0,05122}{1,011} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot 122}} = 22,23 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} > 20 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

DINAMIČKI PRORAČUN

$$F_A = 0,282 \cdot \frac{N}{h} \cdot 0,25 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,282 \cdot \frac{20,5}{34,8} \cdot 0,25 \cdot \frac{0,94}{\sqrt{4 \cdot 0,94^2 + 1}}$$

$$= 0,0183 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}}$$

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_k^2 = 0,0183 \cdot \left(\frac{20}{3}\right)^2 = 0,81 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$F_R = 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{20,5}{34,8} \cdot \frac{0,47}{\sqrt{4 \cdot 0,47^2 + 1}} =$$

$$= 0,0258 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}}$$

$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_k^2 = 0,0258 \cdot \left(\frac{20}{3}\right)^2 = 1,146 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{kid} = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot \frac{S}{3}} = \frac{1,146 \cdot 37}{2 \cdot \frac{1,68}{3}} = 37,858 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \rightarrow 38$$

Da bi se dobila veća otpornost provodnika na kidanje i veći broj lajsni, naprezanje na kidanje se uzima manje od vrednosti date u tabeli 1.1 tj. umesto (1100÷1500). Uzima se 800 kp/m².

$$\sigma_{kid} = 800 - 38 = 762 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$l = \sqrt{\frac{2pq^2 \cdot \sigma_{kid}}{F_{Rmax}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 0,35^2 \cdot 762}{1,146}} = 16,14 \text{ cm}$$

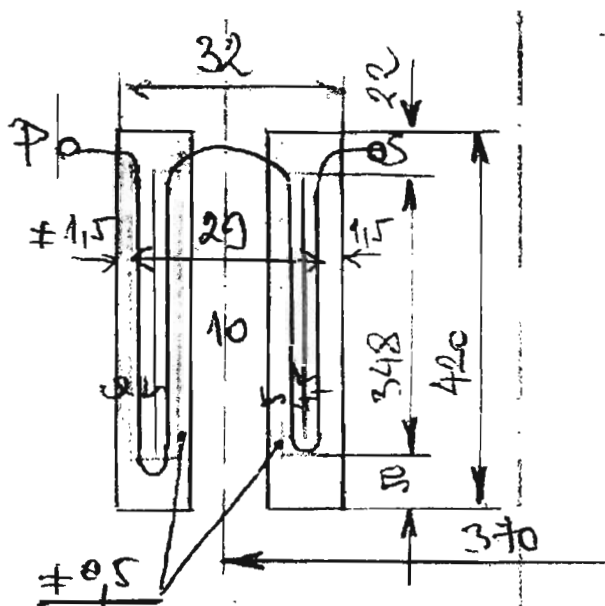
$$n_{lajsnj} = \frac{\pi \cdot D_{sr}}{l} = \frac{\pi \cdot 37}{16,14} = 7,2 \rightarrow 8$$

$$l_{stv} = \frac{\pi \cdot 37}{8} = 14,53 \text{ cm}$$

$$\psi'_R = 0,128 \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{0,47}{\sqrt{4 \cdot 0,47^2 + 1}} = 0,0438$$

$$I_{kmax} = k_\sigma \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot r}{N \cdot l \cdot \psi'_R}} = 11 \cdot \sqrt{\frac{1,68/3 \cdot 34,8 \cdot 3}{20,5 \cdot 14,53 \cdot 0,0438}} = 23,28 \text{ kA} > 21 \text{ kA}$$

$$m_{PR} = 1,25 \cdot 36 = 45 \text{ kg}$$



Dimenziona skica namotaja

Prigušnica za ograničenje uklopne struje kondenzatora

ZADATI TEHNIČKI PARAMETRI			
NOMINALNU NAPON	Un	V	5250
NOMINALNA STRUJA	In	A	950
BROJ FAZA			1
UČESTANOST	f	Hz	50
INDUKTIVNOST	L	mH	0.05+20%
STRUJA KR. SPOJA / VREME	I_k/t_k	kA/s	21/0,5
STEPEN IZOLACIJE	SI	kV	12
MONTAŽA	Unutrašnja		
STANDARD	IEC 60076-6		

USVOJENI TEHNIČKI PARAMETRI			
MATERIJAL PROVODNIKA	BAKAR		
DIMENZIJE PROVODNIKA	mm	500x0,6	
GUSTINA STRUJE	Δ	A/mm²	3,166
TERMIČKA KLASA IZOLACIJE	F(155°)		
VRSTA NAMOTAJA	cilindrični, folijski		
BROJ NAVOJAKA	N	navojaka	14,5
SREDNJI PREČNIK	D_{sr}	mm	440

ELEKTRIČNI PRORAČUN

$$h = 500 \text{ mm}$$

$$a = 7 \cdot 0,6 + 6 \cdot 0,36 = 6,36 + 2,16 = 8,52 \approx 8,5 + 10 + 8,5 = 27 - 3 = 24$$

$$\alpha = \frac{a}{D_{sr}} = \frac{24}{440} = 0,0545$$

$$\lambda = 5,98 \text{ (dijagram, slika 5.2)}$$

$$\beta = \frac{h}{D_{sr}} = \frac{500}{440} = 1,136$$

$$L = N^2 \cdot D_{sr} \cdot \lambda \cdot 10^{-6} = 14,5^2 \cdot 44 \cdot 5,98 \cdot 10^{-6} = 0,05532 \text{ mH}$$

$$L = \frac{7,875 \cdot N^2 \cdot D_{sr}^2 \cdot 10^{-3}}{3D_{sr} + 9h + 10a} = \frac{7,875 \cdot 14,5^2 \cdot 0,44^2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,44 + 9 \cdot 0,5 + 10 \cdot 0,024} = 0,0528 \text{ mH}$$

(na dvanaest izrađenih prigušnica izmerene su vrednosti od 0,05 do 0,055 mH)

$$D_{sr} \approx 950 \cdot \left(\frac{L}{N^2}\right)^{0,571} \cdot (a+h)^{0,428} = 950 \cdot \left(\frac{0,0553}{14,5^2}\right)^{0,571} \cdot (2,4+50)^{0,428} \\ = 46,7 \text{ cm}$$

$$X = 2\pi f \cdot L = 0,314 \cdot 0,05532 = 0,01737 \Omega$$

$$\Delta u = X \cdot I_n = 0,01737 \cdot 950 = 16,5 \text{ V}$$

$$m = \gamma \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot N \cdot S \cdot 10^{-6} = 8,9 \cdot \pi \cdot 440 \cdot 14,5 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 53,51 \rightarrow 54 \text{ kg}$$

$$k_{F120} = 1 + 0,069 \cdot m^2 \cdot \left(n \cdot \frac{p}{h}\right)^2 \cdot q^4 = 1 + 0,069 \cdot 14^2 \cdot \left(\frac{500}{500}\right)^2 \cdot 0,06^4 = 1,000175 \\ \approx 1$$

$$P_{120} = k_{120} \cdot m \cdot \Delta^2 \cdot k_{F120} = 2,808 \cdot 54 \cdot 3,166^2 \cdot 1 = 1520 \text{ W}$$

TERMIČKI PRORAČUN

$$S_{str} = 4 \cdot \pi \cdot D_{sr} \cdot h \cdot 0,85 = 4\pi \cdot 0,44 \cdot 0,5 \cdot 0,85 = 2,35 \text{ m}^2$$

$$\Delta\theta = \frac{P_{120}}{7,5 \cdot S_{str}} = \frac{1520}{7,5 \cdot 2,35} = 86,24 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 90 \text{ }^\circ\text{C} < 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\theta = \Delta\theta + \theta_{amb} = 90 + 40 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$I_k \cdot \sqrt{t_k} = 21 \cdot \sqrt{0,5} = 14,85 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} I_k \cdot \sqrt{t_k} &= S_{cu} \sqrt{\frac{512,2 \cdot 10^{-4}}{k_F} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot \theta}} = \\ &= 300 \sqrt{\frac{0,05122}{1} \cdot \ln \frac{2,0667}{1 + 0,00426 \cdot 130}} = 34 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} > 14,85 \text{ kA} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

DINAMIČKI PRORAČUN

Folijski namotaj je našao veliku primenu u konstrukciji transformatora zbog svojih tehničkih prednosti u odnosu na slojni ili spiralni namotaj, a to su: jednostavnija konstrukcija, kraće vreme motanja, zanemarljiv skin efekat, minimalne aksijalne dinamičke sile i efikasnije hlađenje.

Zato je za ovu prigušnicu primenjen folijski namotaj u cilju povećanja dinamičke otpornosti u slučaju ako se u postrojenju pojavi iznenadni kratak spoj sa strujom većom od uklopne.

$$\begin{aligned} F_A &= 0,282 \cdot \frac{N}{h} \cdot 0,25 \cdot \frac{\frac{h}{D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,282 \cdot \frac{14,5}{50} \cdot 0,25 \cdot \frac{1,136}{\sqrt{4 \cdot 1,136^2 + 1}} \\ &= 0,00935 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}} \end{aligned}$$

$$F_{Amax} = F_A \cdot I_k^2 = 0,00935 \cdot 21^2 = 4,12 \frac{\text{kp}}{\text{cm}}$$

$$\begin{aligned} F_R &= 0,128 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{\frac{h}{2 \cdot D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2 \cdot D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{14,5}{50} \cdot \frac{0,568}{\sqrt{4 \cdot 0,568^2 + 1}} = \\ &= 0,01393 \frac{\text{kp}}{\text{kA}^2 \cdot \text{cm}} \end{aligned}$$

$$F_{Rmax} = F_R \cdot I_k^2 = 0,01393 \cdot 21^2 = 6,14 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{kid} = \frac{F_{Rmax} \cdot D_{sr}}{2 \cdot S_{cu}} = \frac{6,14 \cdot 44}{2 \cdot 3} = 45 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2}$$

Da bi se dobila veća otpornost provodnika na kidanje i veći broj lajsni, naprezanje na kidanje se uzima manje od vrednosti date u tabeli 5.1 tj. umesto (1100÷1500). Uzima se 800 kp/m².

$$\sigma_{kid} = 800 - 45 = 755 \frac{kp}{cm^2}$$

$$l = \sqrt{\frac{2pq^2 \cdot \sigma_{kid}}{F_{Rmax}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50 \cdot 0,06^2 \cdot 755}{6,14}} = 6,65 \text{ cm}$$

$$n_{lajsnj} = \frac{\pi \cdot D_{sr}}{l} = \frac{\pi \cdot 44}{6,65} = 20,78 \rightarrow \text{usvojeno 18 lajsni}$$

$$l_{stv} = \frac{\pi \cdot 44}{18} = 7,68 \text{ cm}$$

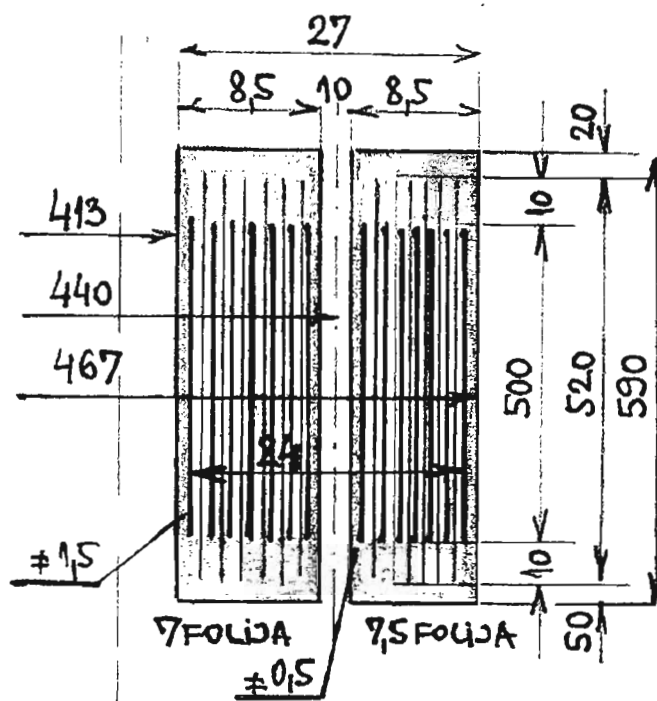
$$\Psi'_R = 0,128 \cdot \frac{\frac{h}{2D_{sr}}}{\sqrt{4 \left(\frac{h}{2D_{sr}}\right)^2 + 1}} = 0,128 \cdot \frac{0,568}{\sqrt{4 \cdot 0,568^2 + 1}} = 0,048$$

$$I_{kmax} = k_{\sigma} \cdot \sqrt{\frac{S \cdot h \cdot r}{N \cdot l \cdot \Psi'_R}} = 11 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 50 \cdot 1}{14,5 \cdot 7,68 \cdot 0,048}} = 58,27 \text{ kA} > 21 \text{ kA}$$

Ukupna masa prigušnice sa tri izolatora Si - 12:

[ukupnu masu prigušnice čine mase: bakra, laminata, nomex, šina, lajsni i izolatora]

$$m_{PR} = 1,28 \cdot m_{cu} = 1,28 \cdot 54 = 69,12 \rightarrow 70 \text{ kg}$$



Dimenziona skica folijskog namotaja