

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

EDGARS DREIMANIS

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**ELEKTRISKO INDUKTORSPOLU STARPVIJUMU
IZOLĀCIJAS AUGSTFREKVENCES DIAGNOSTIKAS
METOŽU UN IEKĀRTU IZPĒTE UN IZVEIDE**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr.habil.sc.ing.
I.RAŅĶIS

Rīga 2011

UDK 621.314.21(043)
Dr 288 e

Dreimanis E. Elektrisko induktorspoļu starpvijumu izolācijas augstfrekvences diagnostikas metožu un iekārtu izpēte un izveide. Promocijas darba kopsavilkums.- R:RTU, 2011.-31 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2011.gada 28.jūnija lēmumu, protokols Nr.57

ISBN 978-9934-10-171-7

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.gada 28.jūnijā plkst. 14:00 Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē Kronvalda bulvārī 1, 117.auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, akadēmiķis Dr.habil.sc.ing. Leonīds Ribickis
Rīgas Tehniskā universitāte

Asoc.profesors, Dr.sc.ing. Leonards Latkovskis
Latvijas Zinātņu akadēmijas Fizikāli enerģētiskais institūts

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andris Šnīders
Latvijas Lauksaimniecības universitāte TF Enerģētikas institūts

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Edgars Dreimanis.....(Paraksts)

Datums.....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, pielikumu, 104 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 131 lappuses.
Literatūras sarakstā ir 114 nosaukumu.

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

TĒMAS AKTUALITĀTE

Elektroapgādes drošums ieņem nozīmīgu vietu enerģētikā. Ik gadus pieaug gan elektroenerģijas lietotāju skaits, gan izlietotās elektroenerģijas daudzums. Līdz ar to pieaug zaudējumi, kuri rodas gan lietotājam, gan piegādātājam gadījumā, ja tiek pārtraukta elektroenerģijas piegāde. Elektroapgādes drošums lielā mērā ir atkarīgs no iekārtu drošuma, kuras ir iekļautas elektroapgādes ķēdē no ģeneratora līdz elektroenerģijas patērētājam. Iekārtu drošumu galvenokārt nosaka elektroiekārtu izolācijas stāvoklis.

Jāpiemin, ka vieni no svarīgākajiem elektrotehniskās sistēmas elementiem ir elektriskās mašīnas ar vijumiem. Turklāt svarīgākie no tām ir transformatori. Transformatoru drošai darbībai jānodrošina to tinumu normāli parametri - izolācijas kvalitāte, darbībā iesaistīto tinumu skaits, tinumu jaudas zudumi uzdotajos režīmos. Šo noteikumu izpildes pārbaudei izmanto periodisku tinumu kvalitātes pārbaudi, kas balstīta uz dažādu metožu pielietošanu.

Tātad izolācija ir svarīga elektroiekārtas sastāvdaļa. Tā lielā mērā nosaka gan elektroiekārtas kalpošanas resursu, gan elektroapgādes ekonomiskos aspektus un elektroapgādes kvalitāti. Tādēļ ir svarīgi novērtēt elektroiekārtu izolācijas stāvokli. Izolācijas rūpīgai, kvalitatīvi labākai novērtēšanai jāiegūst droša informācija par izolācijas stāvokli. Šādas informācijas iegūšanai nepieciešams lietot tikpat drošas un kvalitatīvas diagnostikas metodes un iekārtas.

Drošu, uzticamu informāciju var saņemt no tādas diagnostikas metodes, kas sniedz plašus datus par izolāciju. Jo vairāk izolāciju raksturojošu parametru iegūst diagnostikas veicējs, jo drošāks būs slēdziens par izolācijas stāvokli. Šai informācijai jāietver dati par galvenajiem dielektriskajiem procesiem izolācijā.

Tradicionāli lietoto diagnostikas metožu trūkumi radījuši nepieciešamību pēc jaunām diagnostikas metodēm. Tradicionālo metožu analīze ļauj noteikt ne tikai to trūkumus, bet arī pozitīvās iezīmes, kuras jāpārņem jaunām perspektīvām metodēm. Jaunu metožu attīstība mūsdienās nav iedomājama bez teorētiskās, kā arī tehniskās bāzes.

Elektroiekārtu izolācijas stāvokļa pārbaudi un novērtējumu vai diagnostiku vairumā gadījumu jāveic, atslēdzot spriegumu no iekārtas strāvu vadošajām daļām. Šā iemesla dēļ augstsprieguma, kā arī vidēja sprieguma iekārtu izolācijas stāvokļa pārbaudes ir iespējams veikt daudz retāk nekā zemsprieguma iekārtu pārbaudes. Izolācijas stāvokļa novērtēšana, balstoties uz vienu vai diviem parametriem, ir saistīta ar paaugstinātu iespēju kļūdities galīgā slēdziena pieņemšanā. Kļūdas mērījumu laikā un mērījumu rezultātu apstrādes laikā, kā arī mērāmo parametru atkarība no vairākiem faktoriem norāda uz trūkumiem, ko sniedz diagnostika ar mazu informatīvo apjomu. Tas nozīmē, ka veicot augstsprieguma vai vidēja sprieguma izolācijas diagnostiku, ir jāiegūst iespējami daudz informācijas par izolācijas stāvokli. Šīs informācijas apjomam ir jāvelta īpaša vērība, jo tam ir liela nozīme sistēmas tehnisko un ekonomisko aspektu vērtējumā. Formāla attieksme pret izolācijas diagnostiku netieši samazina elektroapgādes drošumu, bet zemāks elektroapgādes sistēmas drošums ir saistīts ar lielākiem zaudējumiem elektroapgādes uzņēmumiem.

Turklāt elektroiekārtu diagnostika ir sava veida prece, kura tiek piedāvāta elektroapgādes uzņēmumiem, lai noteiktu to rīcībā esošo elektroiekārtu izolācijas stāvokli. Ekonomiskā situācija uzņēmumus spiedusi ne tikai pagarināt iekārtu kalpošanas ilgumu, bet arī palielināt to noslodzi un samazināt izmaksas. Latvijas elektroapgādes sistēmās palielinās iekārtu vispārējā novecošanās. Liela daļa iekārtu būvētas sešdesmitajos un septiņdesmitajos gados. Tās tiek ekspluatētas jau 25-35 gadus, kas gan ir normāls elektroiekārtu kalpošanas

laiks.

Jāsaka gan, ka elektroiekārtu patiesais kalpošanas ilgums ir atkarīgs no slodzes, dzesēšanas sistēmas, aizsardzības utt. Tas nozīmē, ka vienāda vecuma elektroiekārtām, kas ekspluatētas atšķirīgos apstākļos, atlikušais kalpošanas laiks var būt dažāds visai plašās robežās. To apliecina gan sešdesmito gadu sākumā ražoto elektroiekārtu sekmīga darbība, gan arī eksplozijas jaunākās apakšstacijās Latvijā, Zviedrijā un citās valstīs .

Šī pieredze piedāvā divas iespējas:

1. uzticēties elektroiekārtu bezatteikuma darbībai visā tam paredzētajā kalpošanas laikā un neveikt diagnostiku;
2. veikt diagnostiku, iegūstot informāciju par iekārtas stāvokli gan pirms, gan pēc kalpošanas laika beigām, gan arī pirms elektroiekārtas ekspluatācijas sākšanas.

Pirmajā variantā jānodrošina elektroiekārtu nomaiņa, beidzoties to kalpošanas laikam. Pretējā gadījumā tiek radīta nepamatoti augsta riska situācija, apzināti gaidot šo iekārtu atteikumu.

Tāpat izvēlēties pirmo iespēju var tikai tad, ja elektroiekārtu ekspluatācijas līmenis ir augsts, kas, šķiet, Latvijas spiedīgajos apstākļos grūti realizējams. Pat ja atsevišķos gadījumos tiek akceptēta šī izvēle, jāņem vērā, ka iekārtu atlikušais kalpošanas ilgums svārstās plašās robežās, ko var lietderīgi izmantot. Turklāt šajā gadījuma jāparedz pēkšņs iekārtu atteikums.

Elektroietaišu atteikumi rada lielus zaudējumus ne tikai elektroapgādes uzņēmumiem, bet arī elektroenerģijas lietotājiem, kuri ir ieinteresēti augstā elektroapgādes sistēmas drošumā un pieprasa nepārtrauktu elektroenerģijas piegādi. Atsevišķu elektroiekārtu bojājumi var izraisīt vides piesārņojumu, aizdegšanos vai eksploziju, apdraudot apkalpojošo personālu un nodarot lielus materiālos zaudējumus elektrosistēmai.

DARBA MĒRĶIS

Izstrādāt un izpētīt jaunu zemfrekvences spoļu izolācijas pārbaudes metodi, kas balstīta uz augstfrekvences augstsprieguma pielietošanu pārbaudē

DARBA ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Zinātniskā novitāte ir:

- pamatojumā, ka zemfrekvences spoļu starpslāņu un starpvijumu izolācijas pārbaudei var pielietot pētīšanu augstfrekvences sprieguma rezonanses ķēdē, kas ieslēgta rezonanses invertora ķēdē. Šādā veidā tiek panākts augsts spriegums, kas pievienots spolei ar mazu strāvu spolē, kas nodrošina sistēmas darbību no zemsprieguma mazjaudīga līdzsprieguma barošanas avota.
- pamatojumā, ka spoles sprieguma amplitūdas vērtību rezonanses režīmā pustilta invertora shēmā var ar ļoti augstu precizitāti noteikt pēc rezonanses ķēdes sprieguma pamatharmoniskās amplitūdas ietekmi uz spoles rezistanci, kas nosaka ķēdes strāvas amplitūdu, bet tā, savukārt, reizināta ar leņķisko frekvenci un induktivitāti – sprieguma amplitūdu.
- pamatojumā, ka, ja paralēli pētāmajai zemfrekvences spolei ieslēdz etalonspoli ar praktiski no frekvences nemainīgu rezistanci, tad iespējams daļēji ierobežot spoles strāvas strauju samazināšanos pie frekvences pieauguma, un panākt augstākus spriegumus uz spoles pie vienām un tām pašām frekvencēm.
- pamatojumā, ka spoles izolācijas caursites gadījumā eksperimenta laikā strauji

samazinās spriegums uz spoles, jo nebojātās spoles daļas rezistances īsslēgtā kontūra iedarbes iespaidā ir strauji palielinājusies, bet induktivitāte – samazinājusies, nodrošinot ķēdes izeju no rezonanses režīma.

DARBA PRAKTISKĀ VĒRTĪBA

Izstrādātā metode var tikt izmantota praktiskai pielietošanai elektrisko spoļu (elektrisko mašīnu un transformatoru, u.c.) kapitālremontā, kad spole tiek noņemta no magnētveda.

Metode var tikt izmantota arī jaunu elektrisko mašīnu un transformatoru izgatavošanas procesā, pirms uzlikšanas uz magnētveda, starpvijumu un starpslāņu izolācijas pārbaudē.

Iegūtas analītiskas metodes, kas novestas līdz inženieru izteiksmju formai un tas ļauj tās izmantot iekārtas aprēķinam.

Izstrādāta metodika elementu noteikšanai pie dažādām pārbaudāmajām spolēm.

AIZSTĀVĒŠANAI TIEK IZVIRZĪTS

1. Metode starpvijumu un starpslāņu izolācijas pārbaude ar augstfrekvences augstspriegumu.
2. Metodika elementu vērtību noteikšanai atkarībā no pētāmās spoles parametriem.

DARBA SASTĀVS UN APJOMS

Promocijas darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 131 lappuses, 104 attēli, 1 tabula un literatūras saraksts, kas satur 114 nosaukumus.

DARBA APROBĀCIJAS UN PUBLIKĀCIJAS

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti starptautiskajās konferencēs:

1. Rīgā, RTU, 49.starptautiskajā zinātniskajā konferencē 2008.gadā „Spoļu starpvijumu izolācijas pārbaude ar augstfrekvences sprieguma signāliem”.
2. Kuresāre, Igaunija, 5.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2008.gadā un nopublicēts ziņojums Development of the Impulse Method for Testing High-Voltage Coil Interturn Insulation// 5.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2008. 17-19p.
3. Kuresāre, Igaunija, 6.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2009.gadā un nopublicēts ziņojums Determination of High-Voltage Windings Monitoring Voltage in Scheme with Resonant Inverter// 6.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2009. 22-25p.
4. Pērnavā, Igaunija, 8.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2010.gadā un nopublicēts ziņojums Resonant Inverter Operation with Over-frequency of Load Circuit// 8.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2010. 221-224p.
5. Pērnavā, Igaunija, 9.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2010.gadā un nopublicēts ziņojums Calculation of voltage resonance circuit with coreless electrical coil// 9.International Symposium. Topical Problems

in The Field of Electrical and Power Engineering 2010. 190-192p.

6. Pērnavā, Igaunijā, 10. International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2011. gadā un npublicēts ziņojums Operation of Electrical Coil with damaged windings insulation// 10. International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2011. 13-16p.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 9 publikācijās.

DARBA SATURS

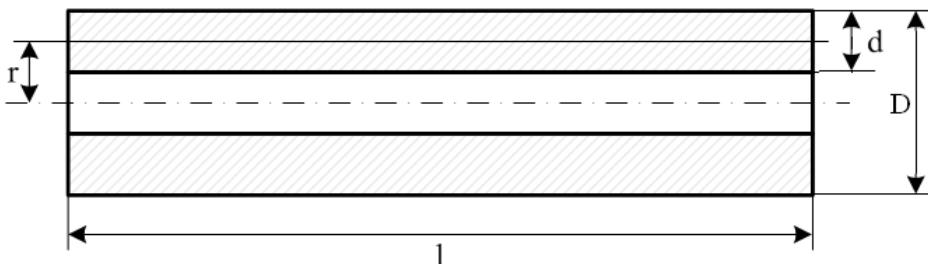
1. ELEKTRISKĀS SPOLES KĀ IZPĒTES OBJEKTS

Pirmajā nodaļā apskatīta elektriskā spole ar tās galvenajiem elektriskajiem parametriem.

Kā zināms, elektriskās spoles induktivitāti var noteikt pēc izteiksmes:

$$L = \frac{0.32r^2w^2}{(6r + 9l + 10d)10^4} \text{ H}, \quad (1)$$

kur r - spoles vidējais rādiuss (1. att.), l - tās garums, d - tinuma biezums, w - vijumu skaits.



1.att. Spoles ģeometriskie parametri

Viens no svarīgākajiem parametriem ir spoles rezistānce, kura ir atkarīga no spoles efektīvās strāvas, kā arī ģeometriskajiem parametriem.

Līdzstrāvas gadījumā:

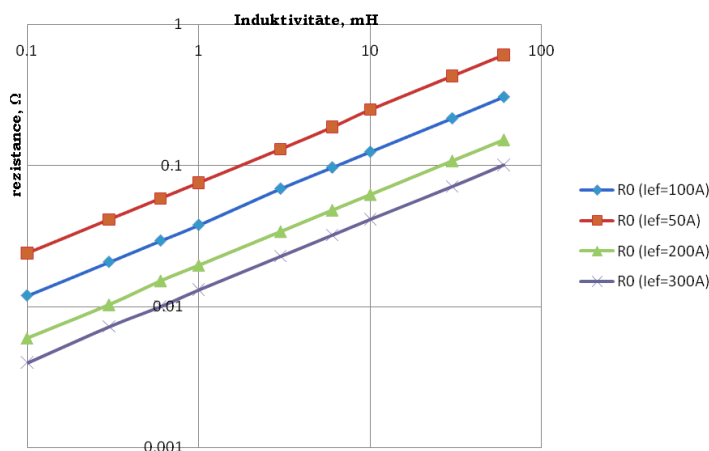
$$R_0 = \rho \cdot w \cdot \frac{l_{vid}}{S_v}, \quad (2)$$

kur $\rho = 0.02 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ ir īpatnējā pretestība vara vadam, $l_{vid} = 2\pi \cdot r$ ir vijuma vidējais garums,

Strāvas blīvumam jābūt tādām, lai spole nepārkarstu pie aprēķina strāvas I_{efa} , kā arī, lai nebūtu pie tās nenoslogota. Ja spoles ārējās virsmas noslodzes indikators $q > 1200 \text{ W/m}^2$, tad strāvas blīvums spoles aprēķinos ir jāsamazina, jo spole pārkarst; ja $q < 1100 \text{ W/m}^2$, tad blīvums j ir jāpalielina, jo spole nav noslogota.

Ir iespējama liela parametru r , d , l variāciju daudzveidība, kas pie dotā L un I_{efa} nodrošina nepieciešamos kritērijus. Taču konkrētajam pētījumam, atbilstoši transformatoru konstrukcijām, var pieņemt $d=r$ un $l=12r$, t.i., šāda spole ir 4 reizes garāka par tās ārējo

diametru. Tad spoles galvenie parametri, izmantojot dotās izteiksmes, var tikt aprēķināti un tie ir attēloti 2.att. Šeit dota sakarība $R_0=f(L)$ pie dažādām efektīvām strāvām.



2. att. Sakarības $R_0=f(L)$ pie dažādām I_{efa} vērtībām; L dots mH, R_0 – omos, $l/d=4$

Kā var redzēt, rezistence, pieaugot spoles induktivitātei, arī pieaug, turklāt mazākām I_{efa} vērtībām ir lielākas rezistances R_0 . Pēc aprēķinu datiem, spolēm ar pieņemto konfigurāciju (4:1) rezistanci R_0 aproksimēti var aprēķināt kā (turpmāk tekstā $ld=l/D$)

$$R_0 = \frac{86 \cdot \sqrt[4]{ld} \sqrt{L}}{I_{efa}} \quad (3)$$

Spoles vidējais rādiuss

$$r = \frac{0.045 \cdot \sqrt[4]{L} \sqrt{I_{efa}}}{\sqrt[4]{ld}} \quad (4)$$

Strāvas blīvums

$$j = \frac{1.6 \cdot 10^{610} \sqrt[4]{ld}}{\sqrt[6]{L} \cdot \sqrt[5]{I_{efa}}} \quad (5)$$

Pieaugot strāvas frekvencei, sāk izpausties virsmas efekts, kura ietekmi raksturo elektrtomagnētiskā viļņa iespiešanās dziļums:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (6)$$

kur $\omega = 2\pi f$ - strāvas izmaiņu leņķiskā frekvence, μ - magnētiskā caurlaidība, kura nemagnētiskajiem materiāliem vienāda ar $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

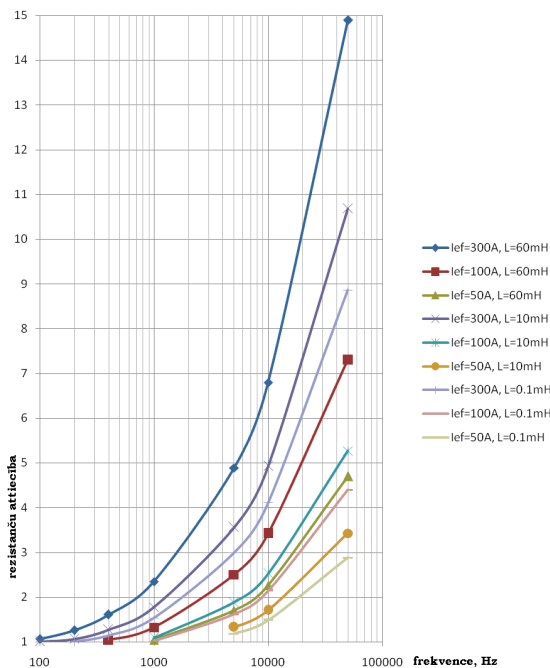
Tādēļ līdz ar frekvences palielināšanos krasi pieaug vadītāja pretestība. Ja $\delta < r_v$, kur r_v ir vadītāja rādiuss ($r_v = \sqrt{I_{efa} / (\pi \cdot j)}$), tad vadītāja pretestība pie paaugstinātas frekvences

$$R_\delta = R_0 \cdot \frac{r_v^2}{2 \cdot r_v \delta - \delta^2} \quad (7)$$

un attiecība starp vada pretestību darbā ar augstu frekvenci R_δ un pretestību R_0 var tikt

rakstīta kā

$$\frac{R_\delta}{R_0} = \frac{r_v^2}{2r_v\delta - \delta^2} = \frac{1}{\sqrt{\frac{0,32 \cdot 10^6 \cdot \sqrt[6]{ld}}{\pi \cdot f \cdot I_{ef} \sqrt[6]{L^5 I_{ef}}} - \frac{0,08 \cdot 10^6 \cdot \sqrt[6]{ld}}{\pi \cdot f \cdot I_{ef} \sqrt[6]{L^5 I_{ef}}}}}; \quad (8)$$

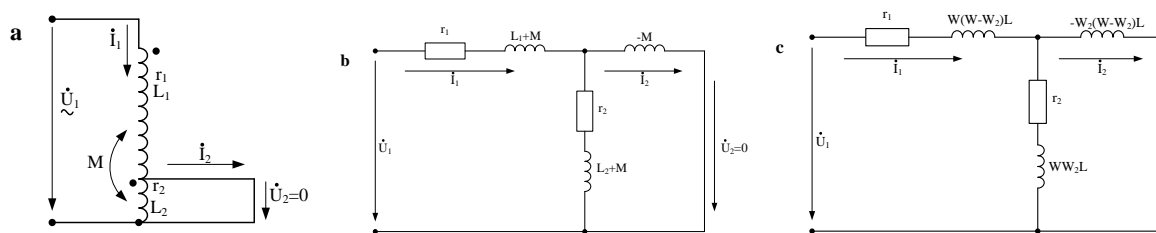


Tā kā δ līdz ar frekvences palielināšanos samazinās, tad attiecība R_δ/R_0 pieaug, kas redzams 3.att.

Kā redzams no 3.att, pie vienādas efektīvās strāvas rezistances pieaugums ir lielāks, ja spoles induktivitāte ir lielāka. Savukārt, ja induktivitātes ir vienādas, tad pieaugums lielāks pie lielākas strāvas. Turklāt posmā no 100Hz līdz 1kHz palielinājumi nav lieli, bet pieaugot frekvencei tie ir daudz lielāki.

3. att. R_δ/R_0 atkarība no I_{ef} un L vērtībām pie dažādām frekvencēm; $l/d=4$

Lai simulētu spoles darbību iekšējā īsslēguma gadījumā, tad darba shēma pilnībā atbilst autotransformatora aizvietošanas shēmai (4. att.), kurā slodzes ķēdes spriegums ir nulle.



4.att. Īsslēgtas spoles a-shēma, b, c- aizvietošanas shēmas

Atbilstoši shēmai (4.a) kontūru vienādojumus var aprakstīt kā

$$\dot{U}_1 = [r_1 + j\omega(L_1 + M)]\dot{I}_1 + [r_2 + j\omega(L_2 + M)](\dot{I}_1 - \dot{I}_2), \quad (9)$$

$$0 = \dot{I}_2 j\omega M + (\dot{I}_1 - \dot{I}_2)[r_2 + j\omega(L_2 + M)] \quad (10)$$

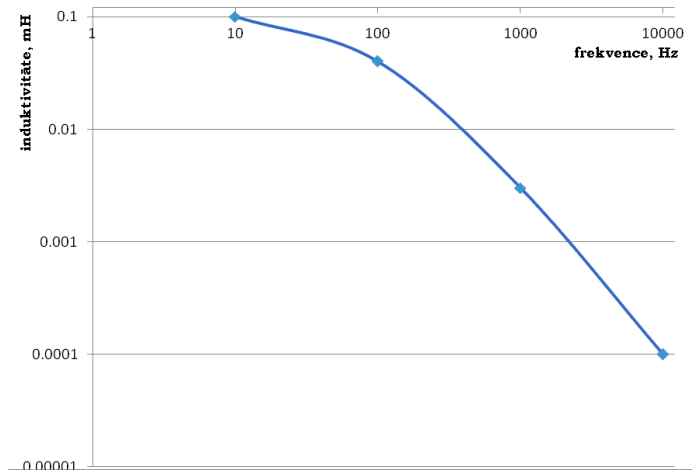
Šī vienādojuma impedances reālā daļa:

$$\text{Re} = \frac{r_1 r_2^2 + r_1 \omega^2 L_2^2 + r_2 \omega^2 M^2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (11)$$

Imaginārā daļa:

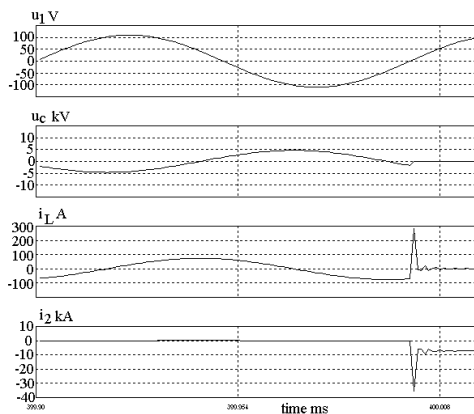
$$\text{Im} = \frac{\omega L_1 r_2^2 + \omega^3 L_1 L_2 - \omega^3 M^2 L_2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2} \quad (12)$$

Kā redzams no nenoīsinātās daļas spoles induktivitātes izteiksmes, pieaugot frekvencei šī induktivitāte strauji samazinās. Ja, piemēram, pieņem $w_1 = 100$, $L = 10 \mu\text{H}$, $r = 1 \text{m}\Omega$, tad īsslēgtās spoles induktivitātes atkarība no sprieguma leņķiskās frekvences ω ir tāda, kā parādīts 5.att.



5. att. Īsslēgtās spoles nenoīsinātās daļas induktivitātes atkarība no sprieguma leņķiskās frekvences

Lai pārbaudītu spoles starpvijumu izolāciju, to slēdz rezonanses ķēdē virknē ar kondensatoru, kura kapacitāte ir $C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_{sp}}$. (13)



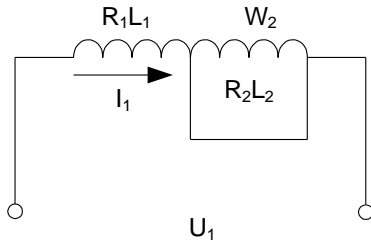
Īsslēguma brīdī rezonanses svārstību režīms pārtrūkst un ķēdes strāva ir tuva nullei. 6.att. parādītas īsslēguma brīža spriegumu un strāvu diagrammas, kas iegūtas datormodelī ar $L_{sp} = 1 \text{mH}$, $R_{sp} = 5 \text{m}\Omega$, $w_1 = 100$, $C = 0,2536 \mu\text{F}$ pie barojošā sprieguma frekvences 10 kHz. Kā redzams, ķēdes strāva un kondensatora spriegums samazinās pēc īsslēguma līdz ļoti mazām vērtībām.

6.att. Rezonanses ķēdē īsslēgtas spoles vijuma īsslēguma strāvu un spriegumu diagrammas

Vispārīgā gadījumā elektriskai spolei var būt izolācijas caursite gan starp slāņiem, gan starp blakus vijumiem, ietverot īsslēgtajā kontūrā dažādu daļu no spoles kopējā vijumu skaita W .

Ja apzīmē īsslēgtā kontūra vijumu skaitu ar W_2 , tad var ieviest parametru- relatīvais īsslēgto vijumu skaits pret kopējo spoles vijumu skaitu:

$$K = \frac{W_2}{W} \quad (14)$$



Mērķis ir izpētīt spoles vaļējās daļas (neīsslēgtās) elektriskos parametrus pie dažādiem K.

7. att. Spoles aizvietošanas shēma nenoīsinātās daļas izpētei

Attēlotajai shēmai attēlā 7. var rakstīt, ka

$$U_1 = I_1 \frac{R_1 R_2 + R_1 j\omega L_2 + j\omega L_1 R_2 - \omega^2 L_1 L_2 + \omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2} \quad (15)$$

Kompleksās pretestības reālā daļa - neīsslēgtās daļas rezistence - var tikt noteikta kā

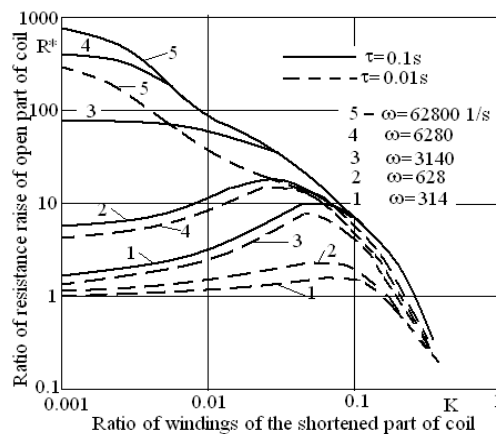
$$Re = \frac{R_{kop}(1-k) + R_{kop}k(1-k)\omega^2 \tau_{kop}^2}{1 + \omega^2 \tau_{kop}^2 k^2}, \quad (16)$$

kur ω ir sprieguma leņķiskā frekvence, τ_{kop} ir laika konstante:

Spoles darbību raksturo vaļējās daļas induktīvās pretestības un rezistances attiecība pret spoles kopējo induktīvo pretestību un rezistanci normālā situācijā:

$$X^* = \frac{X_{val}}{X_{kop}} = \frac{Im}{\omega L_{kop}} = \frac{(1-k)^2}{1 + \omega^2 k^2 \tau_{kop}^2}; \quad (17)$$

$$R^* = \frac{R_{val}}{R_{kop}} = \frac{Re}{R_{kop}} = \frac{(1-k)(1 + k\omega^2 \tau_{kop}^2)}{1 + \omega^2 \tau_{kop}^2 k^2}. \quad (18)$$



8. att. Aprēķinātās vērtības $R^* = f(K)$ pie $\omega = 314, 628, 3140, 6280, 62800$ 1/s un divām spoles laika konstantēm 0.1 un 0.01 s

8.att. dotas līknes $R^* = f(k)$ pie dažādiem ω un divām spoles laika konstantēm 0.1s un 0.01s. Pirmā laika konstante atbilst lielākas jaudas spolēm, otra - mazākas. Kā redzams, ja spoles darbība notiek ar kilohercu ω , tad pie maziem k (<0.1) vaļējās daļas rezistence ļoti stipri pieaug, sasniedzot pie k=0.001 100 un tūkstoškārtīgu palielinājumu attiecībā pret spoles kopējo R_{kop} , kas mērīta ar līdzstrāvu.

Turklāt, palielinoties k , attiecība R^* kļūst arvien mazāka, līdz pie $k=0.1$ (10% no spoles vijumiem ieslēgti īsslēguma kontūrā) samazinās līdz 10 un turpina samazināties līdz mazākām par 1 pie k tuva 1. Turklāt R^* palielinājums pie maziem k daudz lielāks ir spolei ar lielāku laika konstanti τ_{kop} .

Savukārt, ja lielākās laika konstantes spole darbojas īsslēguma režīmā ar relatīvi zemākas frekvences spriegumu (mazāku par kHz), kā arī spolēm ar mazāku laika konstanti pat pie ļoti augstas sprieguma frekvences, R^* palielinājums sasniedz tikai 20-30 un pie tam maksimums ir pie $k=0.01\dots 0.05$. Pie ļoti maziem k vaļējās daļas rezistances pieaugums nerasniedz pat 10.

Ja spole darbojas rezonanses shēmā virknē ar kondensatoru, tad strāvu rezonanses gadījumā nosaka spoles rezistances:

$$I_{1res} = \frac{U_1}{R_{kop}} \quad (19)$$

un šī strāva nodrošina nepieciešamo spriegumu pētāmajai spolei

$$U_{Lres} = I_{1res} \omega L_{kop} = U_1 \omega \tau_{kop} \text{ vai } U_{Lres}^* = \omega \tau_{kop} \cdot \quad (20)$$

Gadījumā, kad tiek noīsināta spoles vijumu daļa, tiek iespaidota atvērtās daļas R_1 (pie $K < 0.8$ tā palielinās pret spoles kopējo pretestību R_{kop}), kā arī induktivitāte L_1 (pazeminās visos gadījumos). Rezultātā atvērtās daļas strāva samazinās, jo ķēdes rezistances ($1/\omega C - \omega L^* L_{kop}$) palielinās un $L_1 C$ ķēdes kopējā pretestība izsakās kā

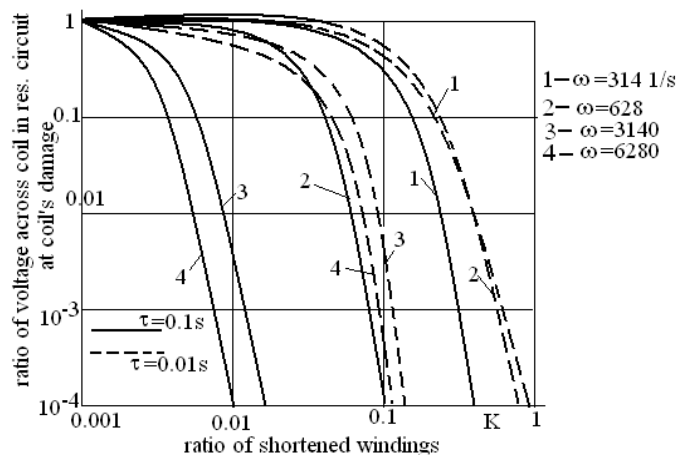
$$Z_k = \sqrt{(R^* R_{kop})^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L^* L_{kop}\right)^2} \cdot \quad (21)$$

Šī ir iespējami vienkāršotā izteiksme noīsinātās spoles sprieguma noteikšanai:

$$U_{Lk} \approx \frac{U_1 (1-k)^2}{\sqrt{\omega^4 \tau_{kop}^4 k^4 - \omega^2 \tau_{kop}^2 k^2 (1-k)^2 + (1-k)^4}} \cdot \quad (22)$$

Lietojot šo izteiksmi, tika veikti aprēķini pie dažādām ω vērtībām un $\tau=0.1$ s un 0.01 s un pie nosacījuma, ka K ir robežās no 0.001 līdz 1 (9. att.). 9.att. dotas līknes

$$U_{LK}^* = \frac{U_{LK}}{U_1} = f(k).$$

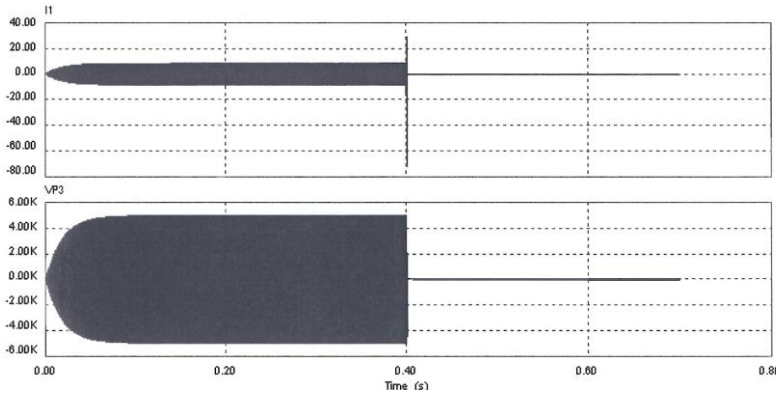


9. att. Spoles sprieguma relatīvās attiecības pret barojošo spriegumu atkarība no noīsināto vijumu skaita

Gadījumā, kad laika konstante ir ļoti maza, sprieguma vērtība pie rezonanses būs maza

un sekojoši pie mazas noīsināto vijumu attiecības, abas vērtības būs ļoti tuvas. Kā piemērs, ja $\omega=314$ 1/s un $\tau=0.01$ s, tad $U_{L_{res}}^*=3.14$, bet pie noīsinātas ar $k=0.1$ attiecība U_{Lk}^* būs 1.38, t.i., ļoti tuva rezonanses gadījumam, un tad ir grūti konstatēt spoles vijumu vai slāņu īsslēgumu.

Apskatot sprieguma uz spoles un caurplūstošās strāvas izmaiņas pie spoles daļas



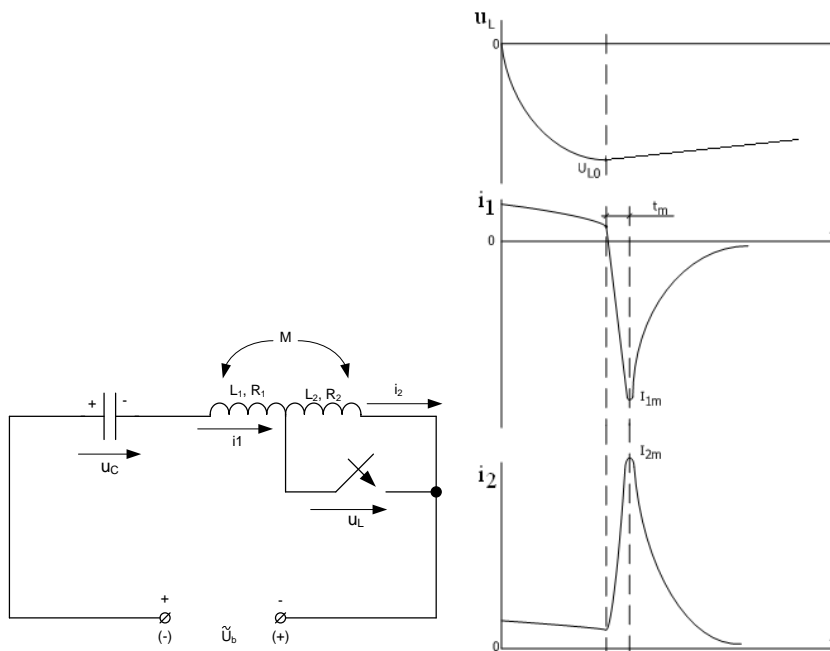
īsslēguma atkarībā no frekvences izmaiņām (att.10.), tika veikta spoles ar parametriem $L_1=35$ mH, $L_2=1,66$ mH, $M=7,6$ mH, $R_1=4,5$ omi un $R_2=1$ oms datormodelēšana. Šeit $k=0,1818$.

Att.10. jau redzams, ka sprieguma amplitūda sasniedz ~ 5 kV pie frekvences 2211Hz un $C=0.1\mu F$.

10. att. Sprieguma uz spoles un caurplūstošās strāvas attēli pie $f=2211$ Hz, $C=0.1\mu F$, $L=51.86$ mH, $K=0.1818$, $R_1=4.5\Omega$, $R_2=1\Omega$, $L_1=35$ mH, $L_2=1.66$ mH, $M=7.6$ mH.

Taču, ja aplūko īsslēgšanu, tad, jo augstāka frekvence, jo relatīvi mazākas strāvas un spriegumi, kas pievienoti spolei. Taču jāievēro, ka īsslēguma brīdī ir izteikts ļoti īslaicīgs strāvas pieaugums līdz samērā lielām vērtībām, kas palielinās praktiski lineāri ar frekvences pieaugumu. Tas jāievēro, veidojot rezonanses invertora ķēdes.

Brīdī, kad notiek spoles caursīte rezonanses ķēdē, veidojas būtisks strāvu momentāno vērtību lēcieni (11.att.). Tas ļoti spilgti redzams arī attēlā 10.



11. att. Pārejas procesa aizvietošanas shēma un caursītes procesa attēlojums strāvu un spriegumu līknēs

Šis lēcieni var būtiski ietekmēt rezonanses invertora darbību, it sevišķi, tranzistoru noslodzi. Tāpēc ir būtiski šo lēcieni novērtēt.

Modelēšanas programmā tika veikts eksperimentālais pētījums un pieņemtajiem

izejas datiem iegūti $I_{1m}=-22A$, $I_{2m}=129A$, $U_{Lm}=-694V$, $t_m=19\mu s$. Ņemot vērā lielos tuvinājumus aprēķinos, rezultātus var uzskatīt par pieņemamiem.

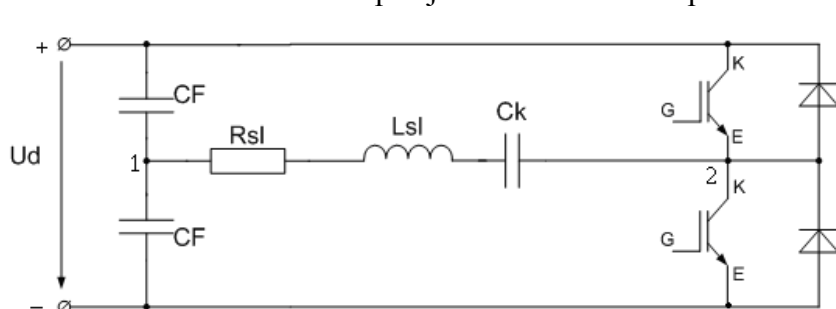
2. REZONANSES INVERTORA IZVĒLE UN DARBĪBAS IZPĒTE

Lai varētu realizēt dažādus spoles izmēģinājuma režīmus, rezonanses invertoram jānodrošina:

1. droša shēmas darbība ar dažādām frekvencēm, kas nerasniedz vai pārsniedz spoles ķēdes rezonanses frekvenci f_r , $\omega_r = 2\pi f_r$;
2. nelielu spriegumu uz slēdžiem visā to darbības intervālā, turklāt sprieguma kritumam uz ieslēgta slēdža jābūt tuvu nullei;
3. minimāla no barošanas avota patērētā jauda, to panākot ar barojošā sprieguma regulēšanas iespēju, stabilizējot maksimālo spoles strāvu dažādos režīmos;
4. barošana no sprieguma avota ar divvirziena strāvas iespējamību;
5. spoles ķēdes strāvas bezkontakta mērīšanu ar elektronisku iekārtu;
6. dažu milisekunžu pārstrāvas spoles caursītes gadījumā kopā ar elektronisku pārstrāvas aizsardzību.

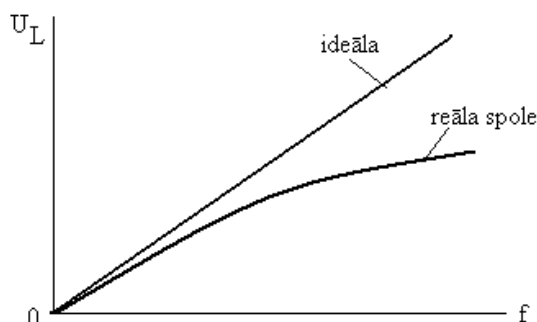
Izejot no tā, ka tiristori ir daudz drošāki pusvadītāju elementi kā tranzistori, priekšroka būtu dodama tiristoru rezonanses invertoriem. Viens no efektīvākajiem varētu būt paralēlais rezonanses invertors, kurā slodzes ķēde slēgta paralēli kondensatoram, kas vienlaikus kalpo gan slodzes rezonanses procesa noteikšanai, gan tiristoru drošai piespiedu komutācijai.

Ņemot vērā tiristoru shēmu īpatnības, kas saistītas ar drošas aizvēršanas nodrošināšanu un praktiski grūti realizējamu sinusoidālas strāvas režīmu pie pārslēgšanas frekvences vienādas ar rezonanses, tiristoru shēmas būtu jāizslēdz no apskates un praktiska pielietojuma. Vienīgi moderno tranzistoru pielietojums ļauj nodrošināt kvalitatīvu rezonanses režīmu gan ar minimālu barošanas avota jaudu, gan ierobežotiem spriegumiem uz pusvadītāju slēdžiem. Par visvairāk pieejamo var uzskatīt pustilta shēmu ar nesadalīto komutācijas



kapacitāti (12.att.), jo pietiekoši augsto izejas spriegumu te var iegūt bez paaugstinošā transformatora, kas sarežģītu konstrukciju un procesus shēmā un veidotu papildus zudumus.

12. att. Virknes rezonanses invertors pustilta shēmā ar nesadalīto komutācijas kapacitāti

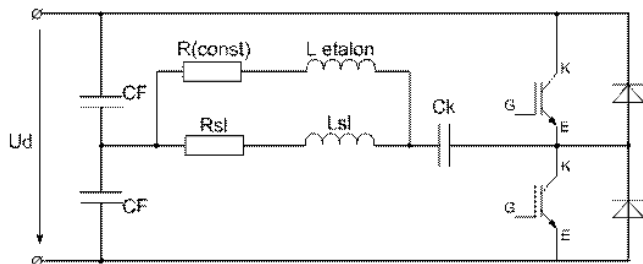


13.att. Spriegums uz pētāmās spoles atkarībā no frekvences

Kā parādīts 1. nodaļā, parastā virknes rezonanses invertorā, palielinot frekvenci,

samazinās caurplūstošā strāva, kam par iemeslu ir pētāmās spoles aktīvās pretestības palielinājums virsmas un tuvuma efektu iespaidā. Ja spole pie dažādām frekvencēm būtu ar nemainīgu rezistanci, tad spriegums uz spoles augtu lineāri ar frekvences pieaugumu (36.att.). Patiesībā, frekvencei augot pieaug rezistence, strāvas amplitūda pie rezonanses samazinās un spoles spriegums - arī samazinās.

Izvērtējot iepriekšminēto problēmu, nolēmu saviem pētījumiem izmantot uzlabotu rezonanses invertoru ar IGBT tranzistoriem (14.att.). Šajā shēmā rezonanses ķēdē paralēli ieslēgtas divas spoles – viena reālā ar masīvu vadu, kā tas paredzēts 50 Hz frekvences spolēm; otra – izgatavota no augstfrekvences daudzdzīslu vada („licendrāte”), un tās rezistence nav



atkarīga no frekvences. Tā kā viena spole ir ar nemainīgu pretestību no frekvences, kopēji spoļu mezglam pie attiecīgas parametru izvēles ir samazināta rezistances atkarība no frekvences, un tātad stabilizēta darbība un rezonanses parametri.

14. att. Rezonanses invertora shēma ar samazinātu rezistances atkarību no frekvences

Rezonanses invertora darbība var norisināties normāli tikai tad, ja ķēdes parametri nodrošina svārstību procesu, t.i., jābūt

$$\frac{1}{LC} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \delta^2, \quad (23)$$

kur δ - rimšanas koeficients.

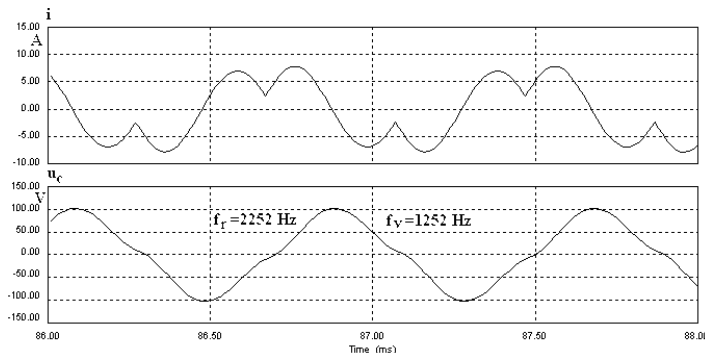
Ķēdes pašsvārstību frekvence

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}. \quad (24)$$

Precīzs rezonanses invertora aprēķins ir ļoti sarežģīts uzdevums, jo tas attīstās no viena pārslēgšanās cikla uz nākamo un spriegums uz kondensatora sasniedz stipri augstāku amplitūdas līmeni nekā DC avota amplitūda.

Visumā rezonanses invertoram iedala trīs darbības režīmus. Pirmais režīms $\omega_v = \omega_r$, kad vadības leņķiskā frekvence $\omega_v = 2\pi/T$ ir vienāda ar ķēdes pašsvārstību

frekvenci $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$. Šajā gadījumā iegūst robežgadījumu, kad strāva ir nepārtraukta un praktiski sinusoidāla. Šis ir arī vēlamais darbības režīms.

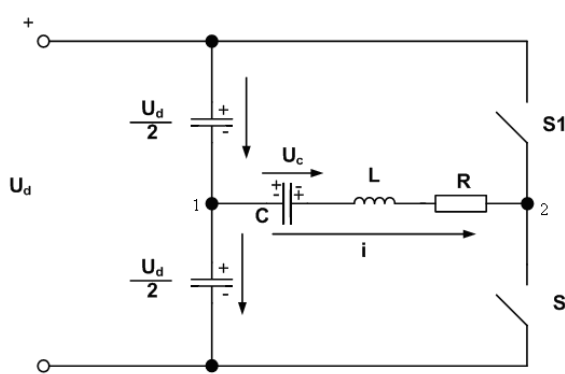


15.att. Strāvas un kapacitatīvā sprieguma līknes ja $\omega_v < \omega_r$ ($R=0.5\Omega$, $C=10\mu F$, $L=0.5mH$)

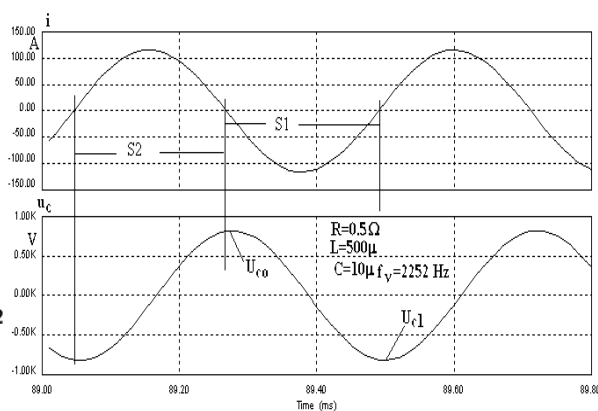
Otrais gadījums ir kad vadības leņķiskā frekvence ω_v ir mazāka par ω_r , tad iegūst nesinusoidālu slodzes strāvu). Šajā gadījumā strāva, kas plūst caur ķēdi, ir ar nelielu amplitūdu un tas rezultējoši ietekmē arī spriegumu U_C , kas redzams 15. attēlā.

Trešais gadījums ir kad $\omega_v > \omega_r$, tad slodzes sprieguma efektīvā vērtība tāpat samazinās attiecībā pret aprēķināto rezonanses režīmam. Šajā shēmā nav iespējams darboties ar $\omega_v > \omega$, ja tranzistors nav šuntēts ar diodi, jo tad tranzistora ieslēgšanās brīdī slodzes ķēdes strāvas momentānā vērtība vienmēr būs ar tranzistora vadāmībai pretēju virzienu, kas neatbilst shēmas pārslēgšanās principiem. Lai nodrošinātu shēmas darbību šai vadīšanas režīmā, katrs tranzistors jāšuntē ar reversa virziena diodi un barošanas avota ķēdei jābūt ar divvirziena vadāmības īpašībām.

Rezonanses ķēdes elementu sprieguma stacionārā režīmā aprēķini tiek realizēti pie robežgadījuma, kad $\omega_v = \omega_r$. Aprēķinu shēma attēlota 16.att.



16.att. Aprēķinu shēma



17. att. Rezonanses ķēdes strāvas un kondensatora sprieguma līknes rezonanses režīmā

Slēdži S1 un S2 tiek pārslēgti periodiski un vadības signāli uz to ieslēgšanu ilgst pusperiodu. Savukārt barošanas avota spriegums tiek dalīts dinamiskā režīmā ar ieejas kondensatoru ķēdi un rezonanses ķēdei periodiski tiek pievadīts vienas un otras polaritātes avota pusspriegums.

Pirmajā pusperiodā tiek ieslēgts slēdzis S1. Slēdzis S2 ir atslēgts. Sprieguma un strāvas līknes abos režīmos ir attēlotas att.17.

Sākumā $t=0$, $i=0$, bet $u_C = U_{C0}$, kas izriet no noteikuma, ka ķēdē ir rezonanse un tādēļ strāvas līkne sakrīt fāzē ar pārslēdzamo spriegumu u_{12} . Tādējādi strāvas momentāno vērtību izmaiņas apraksta vienādojums:

$$i = e^{-\delta t} (A \sin \omega t + B \cos \omega t), \quad (25)$$

kas ievērojot sākuma noteikumus, transformējas veidā

$$i = -e^{-\delta t} \frac{0,5U_d + U_{C0}}{\omega_r L} \sin \omega_r t, \quad (26)$$

kur $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (pašsvārstību leņķiskā frekvence, kurai atbilstošais periods ir $T = 2\pi\sqrt{LC}$, praktiski rezonanses frekvence).

Savukārt droseles spriegums

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -e^{-\delta t} (0,5U_d + U_{c0}) \left(\cos \omega_r t - \frac{\delta}{\omega_r} \sin \omega_r t \right). \quad (27)$$

Kad $\omega_r t = \pi$, tad

$$u_{L(\pi)} = e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_r}} (0,5U_d + U_{c0}), \quad (28)$$

savukārt kapacitātes sprieguma maksimālā vērtība pie ieslēgta slēdža S1 ir

$$U_{c1} = -0,5U_d - e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_r}} (0,5U_d + U_{c0}), \quad (29)$$

kam noteikti ir negatīva vērtība.

Otrajā pusperiodā tiek ieslēgts slēdzis S2. S1 atslēgts. Arī šajā pusperioda sākumā $i = 0$

Tā kā kondensatora strāvas, t.i., strāvas i vidējā vērtība ir nulle, tad integrējot abas strāvas izteiksmes un ievērojot U_{c1} izteiksmi, var iegūt, ka:

$$U_{c0} = \frac{0,5U_d + U_d e^{-\delta \frac{\pi}{\omega_r}} + 0,5U_d e^{-2\delta \frac{\pi}{\omega_r}}}{1 - e^{-2\delta \frac{\pi}{\omega_r}}}. \quad (30)$$

Minētās izteiksmes (29) un (30) ļauj aprēķināt nepieciešamos parametrus rezonanses režīmā, t.i., sprieguma amplitūdu uz kondensatora un spoles. Bet ir iespējams arī cits risinājums, kurš balstīts uz pārslēgšanas sprieguma u_{12} pamatharmonikas ietekmes aprēķinu uz rezonanses ķēdes elementu spriegumu. Pamatharmonikas sprieguma amplitūdas vērtība ir vienāda ar:

$$U_{LD(f)m} = \frac{2U_d}{\pi}. \quad (31)$$

Tad slodzes strāvas amplitūda rezonanses režīmā ir $U_{LD(f)m} / R$ un kondensatora sprieguma amplitūda ir

$$U_{C0} = \frac{2U_d}{\pi R \omega_r C}. \quad (32)$$

No iegūtajām izteiksmēm var aprēķināt avota strāvas I_d vidējo vērtību. Pieņemot, ka pusvadītāju elementos un kondensatorā nav aktīvās jaudas zudumu, var rakstīt, ka

$$I_d = \frac{I_{m0}^2 \cdot R}{2U_d}, \quad (33)$$

kur I_{m0} ir rezonanses ķēdes strāvas amplitūda. Tuvināti to var noteikt kā

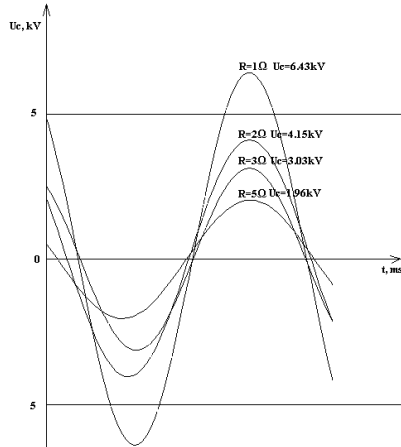
$$I_d = \frac{2U_d}{\pi^2 R}. \quad (34)$$

Kā jau bija minēts, pieaugot frekvencei, spoles rezistence jūtami pieaug, kā rezultātā samazinās rezonanses ķēdes strāva, bet tas izraisa ķēdes elementu spriegumu samazinājumu pie rezonanses (18.att.). Rezultātā gaidītais sprieguma pieaugums netiek sasniegts (19.att.).

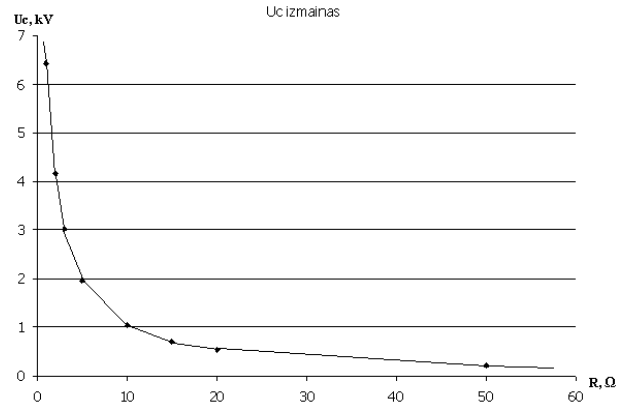
Lai mīkstinātu šo efektu, tika likta priekšā shēma 20. att., kurā pētāmajai spolei ar masīvu vadu (kuras rezistence jūtami mainīsies no frekvences) paralēli pieslēgta etalonspole ar daudzdzīslu vadiem, kuru rezistence no frekvences ir maz atkarīga. Kopējo rezonanses

režīmu pie augstas frekvences noteiks etalonspole, uz kuras būs rezonanses režīmam atbilstošs spriegums, bet tas vienlaikus tiks pielikts arī pētāmajai spolei, tā nodrošinot pietiekamu izpētes spriegumu.

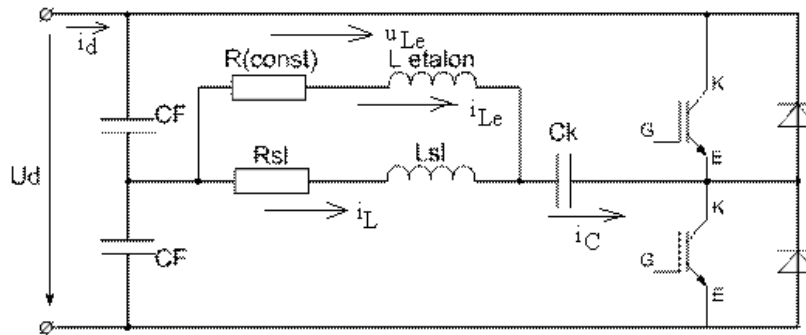
Lai veiktu pētījumus, tika izveidota aprēķinu shēma (att.20).



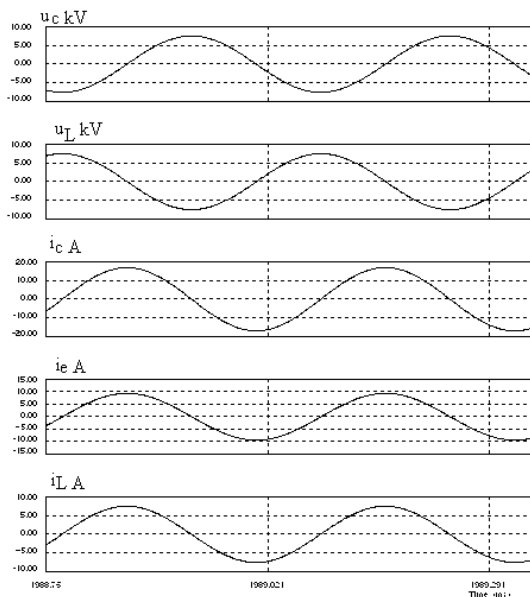
18.att. Kondensatora sprieguma līknes pie nemainīgas vadības frekvences un dažādām spoles rezistancēm



19.att. Kondensatora sprieguma amplitūdas izmaiņas no spoles rezistances rezonanses ķēdē



20.att. Shēma uzlabotajam variantam

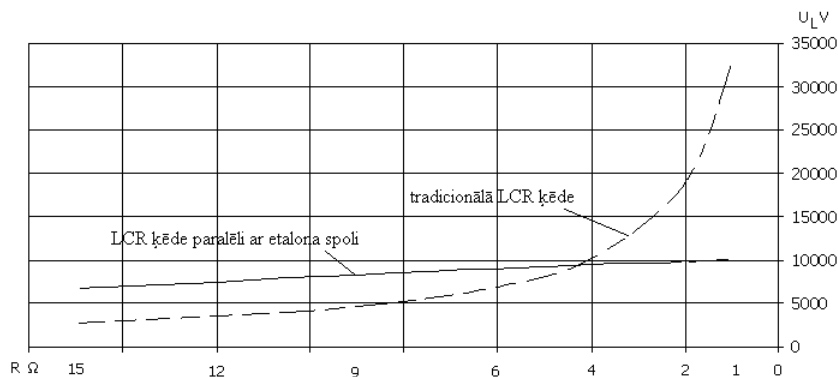


21.att. Spoļu un kondensatora spriegumu, kā arī katras spoles un kondensatora strāvu diagrammas

Procesu ilustrācijai 21. att. parādītas kondensatora, spoļu sprieguma diagrammas, kā arī strāvu līknes abās spolēs un kondensatorā. Diagrammas uzņemtas datormodelī ar $L=50\text{mH}$, $L_e=40\text{mH}$, $C=0,1125\mu\text{F}$, $f=3173\text{Hz}$, $U_d=100\text{V}$, $R=12\Omega$, $R_e=0.1\Omega$. Kā redzams, visas trīs strāvas patiešām labi sakrīt fāzē, bet spriegumi u_c un u_L ir pretfāzē.

Lai pārbaudītu ieteiktās shēmas efektivitāti, ar iepriekš minētajiem parametriem datormodelī tika uzņemtas līknes $U_{Lm}=f(R)$, kā arī šāds eksperiments tika veikts tradicionālajā

shēmā. Rezultāti atspoguļotu 22.att. Kā redzams, spoles rezistancei izmainoties no 1 līdz 15 omiem, tradicionālajā LCR rezonanses shēmā spoles sprieguma amplitūda izmainījās vairāk nekā 10 reizes, bet uzlabotajā shēmā ar etalona spoli izmaiņa ir tikai 1,5 reizes, kas parāda, ka ieteiktā shēma ir efektīva spoles izpētei pie dažādām rezonanses frekvencēm, kad spoles rezistance strauji aug līdz ar frekvences pieaugumu.



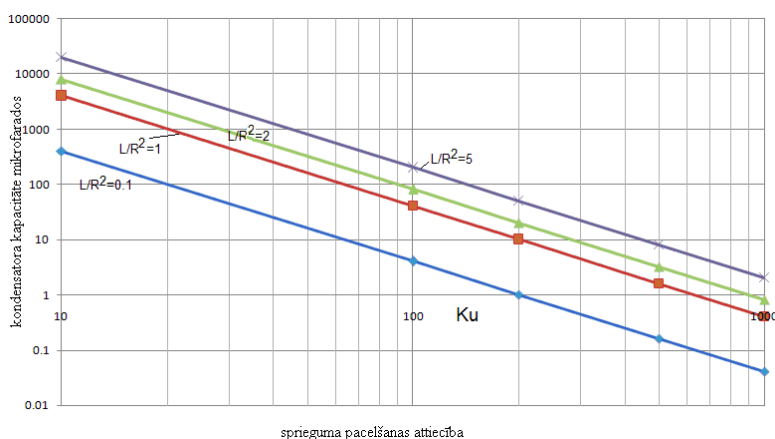
22.att. Spriegumi uz spoles rezonanses procesā tradicionālajā LCR spolē (---) un shēmā ar paralēlo etalona spoli

3. SPOLES IZPĒTES REZONANSES SISTĒMAS PARAMETRU IZVĒLE

Rezonanses sistēmas parametru aprēķiniem pie konstantas pētāmās spoles rezistances var izmantot vienkāršoto izteiksmi (32). Pieņemot, ka ķēdes labums ir augsts, šo

rezonanses frekvenci var aprēķināt tuvināti kā $\omega_r = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

Barošanas avota un rezonanses ķēdes aktīvās jaudas ir vienādas, jo zudumus



23. att. Aprēķina raksturlienes kondensatora kapacitātes izvēlei atkarībā no sprieguma paaugstināšanas faktora

Kā redzams no attēla, jo lielāks sprieguma pacēluma koeficients, jo pie viena un tā paša L/R^2 indikatora kondensatora kapacitāte vajadzīga mazāka, pie tam logaritmiskajā mērogā attiecību līknes ir lineāras. Pieaugot attiecībai L/R^2 , proporcionāli pieaug arī kapacitāte.

Piemēram, ja $L=10\text{mH}$ un $R=0,1$ oms, pie sprieguma pacēlšanas faktora 100 ķēdē nepieciešams ieslēgt kondensatoru ar kapacitāti $40,57 \mu\text{F}$. Pārbaude PSIM datorprogrammā apstiprina iegūtā rezultāta pareizību, pie tam rezonanses frekvence tika uzstādīta $1569,86 \text{ 1/s}$.

Ja iegūtas nepieciešamās kondensatoru kapacitātes vērtības, tad var aprēķināt

nepieciešamo invertora tranzistoru vadības frekvenci. Izmantojot C aprēķina tuvināto izteiksmi $C = \frac{4L}{k_u^2 \pi^2 R^2}$, frekvence var tikt aprēķināta kā

$$f = \frac{k_u R}{4L} . \quad (35)$$

Pieaugot sprieguma paaugstinājuma indikatoram, frekvence logaritmiskajā mērogā lineāri pieaug. Pie tam, jo attiecība L/R mazāka, jo frekvence nepieciešama proporcionāli lielāka.

Svarīgi ir noteikt līdzstrāvas barošanas avota jaudu. Ja neņem vērā zudumus slēdžos un reaktīvajos elementos, tad jauda aprēķināma kā

$$P = I_{ef}^2 \cdot R ,$$

kur I_{ef} ir rezonanses kontūra efektīvā strāva, R – spoles rezistence.

Ķēdes efektīvo strāvu var noteikt izmantojot noteikumu, ka pie rezonanses induktivitātes un kapacitātes spriegumi ir vienādi un viss maiņspriegums tās pamatharmoniskās efektīvās vērtības veidā pielikts rezistencei:

$$I_{ef} = \frac{U_{(1)ef}}{R} , \quad (36)$$

kur $U_{(1)ef}$ aprēķināms kā

$$U_{(1)ef} = \frac{U_d 4}{2\sqrt{2}\pi} . \quad (37)$$

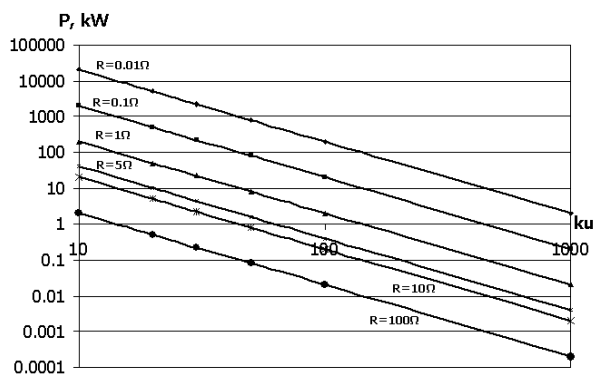
Tātad

$$P = \frac{U_d^2 2}{\pi^2 R} . \quad (38)$$

Savukārt avota strāva

$$I_d = \frac{P}{U_d} = \frac{2U_d}{\pi^2 R} . \quad (39)$$

Kā redzams, ne jauda, ne strāva barošanas avotam nav atkarīgas no rezonanses ķēdes reaktīvajiem parametriem un frekvences, bet tikai no avota sprieguma un rezistances. 24.att.



parādītas sakarība starp barošanas avota jaudu un sprieguma pacelšanas attiecību $k_u = U_{cm}/U_d$ pie konstanta $U_{cm} = 10$ kV. Kā redzams, pieaugot k_u indikatoram, avota jauda strauji samazinās. Tā ir lielāka pie mazām spoles rezistancēm, kas raksturīgs lieljaudas spolēm ar liela šķērsriezuma vadiem.

24. att. Rezonanses invertora barošanas avota jaudas līknes kā funkcija $P=f(k_u)$ pie dažādām nosacītām spoles R , Ω un spoles sprieguma amplitūdas 10kV

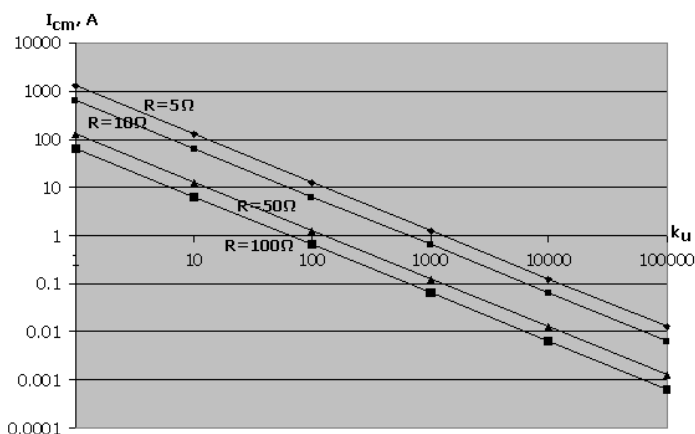
Dotais grafiks ļauj izvēlēties nepieciešamo k_u (tātad barošanas avota spriegumu) pie

barošanas avota jaudas ierobežojuma. Ja, piemēram, avota maksimālā jauda ir 2 kW, tad pie $R=0,01$ oms un kondensatora vai spoles maksimālā sprieguma 10 kV (amplitūda) nepieciešams izvēlēties $k_u=1000$, t.i., barošanas avota spriegumam jābūt 10 V.

Avota jauda ir atkarīga otrajā pakāpē no nepieciešamās spoles sprieguma amplitūdas. Ja, piemēram, amplitūda ir 20kV, tad jauda būs 4 reizes lielāka pret attēlā 24. parādīto.

Visos iepriekš attēlotajos grafikos varam redzēt, ka rezonanses invertoram jāstrādā ar maksimāli lielu k_u , ja vēlamies maksimāli efektīgi izmantot šo sistēmu gan ekonomiskā, gan tehniskā ziņā. Varam secināt, ka šajā shēmā jāstrādā ar maksimālo k_u , jo tad arī rezonanses frekvence ir liela un kondensatora kapacitāte attiecīgi ir maza. No tā izriet, ka shēmā reāli būs mazāki jaudas zudumi. Pozitīvi tas ir arī slēdžiem, jo pie palielināta sprieguma ir palielināta rezonanses ķēdei caurplūstošā strāva, kas, slēdžiem pārslēdzoties jākomutē un jāvada, t.i., samazināsies jaudas zudumi tranzistoros. Tā, piemēram, ja avota spriegums ir 10 V un spoles rezistence 0,01 oms, tad rezonanses ķēdes strāvas amplitūda ir

$$I_{cm} = \frac{U_d \cdot 4}{2\pi R} = 637 A .$$



Tā, bez šaubām ir liela strāva, taču tā būtu vēl lielāka, ja k_u būtu mazāks un attiecīgi U_d lielāks. 25. att. parādītas sakarības starp I_{cm} , k_u un spoles R , ja kondensatora un spoles sprieguma amplitūda pie rezonanses ir 10 kV. Kā redzams, jo lielāks k_u , jo pie viena un tā paša R strāva caur invertora slēdžiem būs mazāka. Tāpat tā samazināsies līdz ar rezistances pieaugumu.

25.att. Sakarība starp invertora slēdžu strāvas amplitūdu un k_u un spoles rezistanci R

Lai shēma darbotos stabili, kondensatoru CF (att.20) vērtībām aizvietošanas shēmā būtu jābūt bezgalīgi lielām. Tas, protams, būtu ideāls gadījums. Ja šīs vērtības būtu bezgalīgi lielas, tad U_d būtu konstants un neveidotos pulsācijas šī barošanas sprieguma ķēdē. Otrs vēlamais gadījums, būtu, ja barošanas avota ķēdē būtu ideāls līdzspriegums, tādējādi neveidotos pulsācijas.

Tāpēc pieņemts, ka $CF \gg C$, lai U_d būtu konstants. Turklāt, abiem CF jābūt vienādiem, citādi atšķirsies pulsācijas līmeņi pusperiodos un attiecīgi izejas dati katram pusperiodam būs dažādi. Nepieciešamā katra CF vērtību var aprēķināt pieņemot strāvu un frekvenci kā konstantus lielumus un nosakot minimālo pulsācijas līmeni, kāds būtu pieņemams darba režīmā. Tā kā no katra kondensatora pusperioda laikā tiek ņemta

sinusoidāla pusviļņa strāva ar amplitūdu $I_{cm} = \frac{4U_d}{2\pi R}$, kuru var aizvietot ar taisnstūrformas

signālu ar amplitūdu $0,9I_{cm}/\sqrt{2}$, tad šo kondensatoru sprieguma kritums pusperioda laikā ir

$$\Delta U_{CF} = \frac{0,9I_{cm}}{\sqrt{2} \cdot 2f \cdot C_F} = \frac{0,9U_d}{\sqrt{2} \cdot \pi f R C_F} . \quad (40)$$

Pieņemot sprieguma krituma attiecību pret U_d pietiekami mazu (ap 0,05), var noteikt kondensatora CF nepieciešamo kapacitāti. Piemēram, ja attiecība ir 0,05, bet $R=0,1$ oms,

frekvence 3kHz, tad kondensatora kapacitāte ir 13456 μF.

Bezserdes spoles rezonanses spriegumu var aprēķināt, zinot, ka rezonanses ķēdē ar spoli bez serdes rezistence ir atkarīga no frekvences. Šajā apakšnodaļā doti parametru aprēķini reālam gadījumam, kad jāiegūst maksimālais spriegums uz spoles rezonanses ķēdē pie dažādām rezonanses frekvencēm. Ja spoles rezistence atkarībā no frekvences būtu nemainīga, šādi aprēķini varētu tikt veikti kā skaidrots iepriekš. Bet reāli rezistence ir atkarīga no frekvences - tā pieaug frekvencei pieaugot, un tādējādi šie aprēķini kļūst stipri sarežģītāki.

Iepriekšējos aprēķinos ir parādīts, ka rezonanses invertora spriegumu attiecība pustilta shēmā ar labiem rezonanses parametriem un DC avota spriegumu U_d var tikt aprēķināta kā

$$k_u = \frac{U_{cm}}{U_d} = \frac{4Lf}{R}, \quad (41)$$

kur L ir spoles induktivitāte, R - rezistence, f - invertora pārslēgšanās frekvence. Reāli ir $R = \beta \cdot R_0$, kur R_0 - spoles rezistence pie DC, β - rezistances pieauguma no frekvences faktors.

Rezultātu pārbaudīšanai nepieciešams noteikt R_0 vērtības atkarībā no spoles induktivitātes, tās strāvas I_{ef} un attiecības starp spoles vijuma garumu un tās ārējo diametru ld . Pamatojoties uz veiktajām datorsimulācijām, pie spoles ar vara vijumiem, pie noteiktiem zudumiem iekšējo virsmu dzesēšanā 1100-1200W/m², R_0 sakarība var tikt aprakstīta ar pirmajā nodaļā iegūto izteiksmi

$$R_0 = 86 \sqrt[4]{ld} \frac{\sqrt{L}}{I_{ef}}.$$

Ievietojot šo izteiksmi, sprieguma pieauguma vērtība var tikt aprakstīta kā

$$k_u = \frac{4\sqrt{L}fI_{ef}}{86\beta\sqrt[4]{ld}}. \quad (42)$$

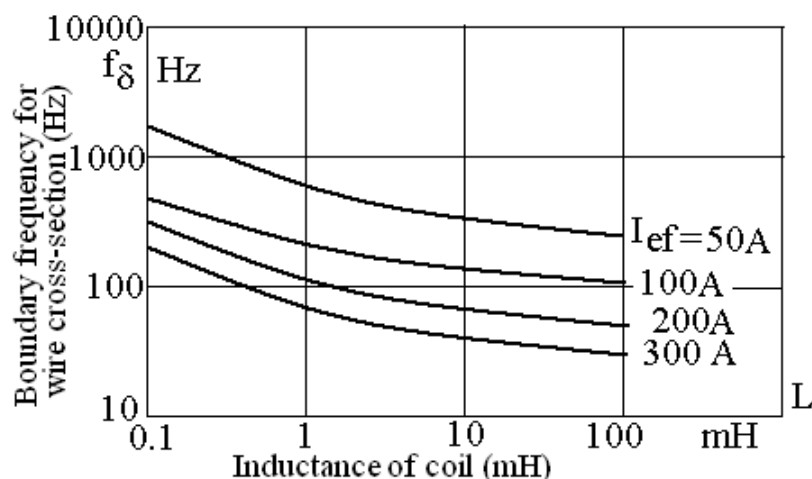
Bet ir nepieciešams noskaidrot sakarības starp β un f , L , I_{ef} , ld . Zināms, ka spoles vijuma rezistence, pieaugot frekvencei, arī pieaug, jo spēkā ir virsmas efekts jeb elektromagnētiskā lauka ietekme. Datorsimulācijās un attēlos darbā parādīts, ka frekvenci pie kuras elektromagnētiskā lauka iespiešanās dziļums vadā ir vienāds ar vada rādiusu, var aprēķināt kā

$$f_\delta = \frac{8 \cdot 10^4}{\pi I_{ef} \sqrt[6]{L} \cdot \sqrt[5]{I_{ef}}} \quad (43)$$

un tā būtiski neietekmējas no attiecības ld . Rezultātā tātad

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{\frac{f_\delta}{f}} \left(2 - \sqrt{\frac{f_\delta}{f}}\right)}. \quad (44)$$

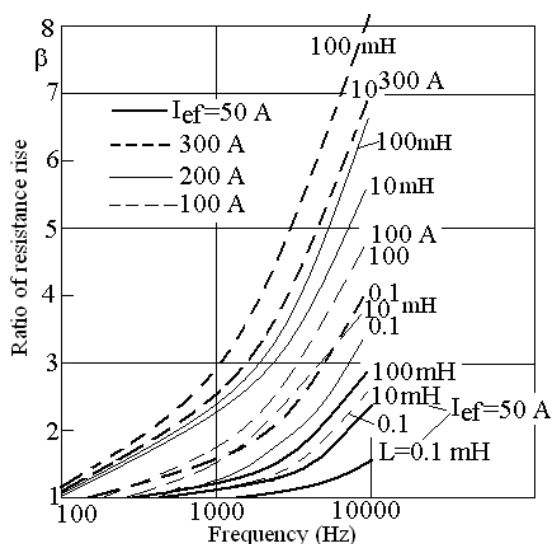
Izteiksme ir spēkā tikai ja $f > f_\delta$. 26. attēlā parādītas līknes $f_\delta = \varphi(L, I_{ef})$.



26.att. Robežfrekvences atkarība no I_{ef} un spoles induktivitātes

Kā redzams attēlā, pie mazākām induktivitātēm un strāvu vērtībām, robežfrekvences f_δ vērtības ir lielākas. Ja ir noteiktas f_δ vērtības, tad var iegūt rezistances pieauguma faktora β vērtības atkarībā no spoles induktivitātes un strāvas vērtības. Šādas līknes attēlotas 27. attēlā.

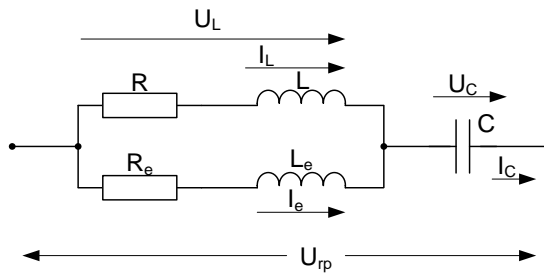
Kā redzams, ātrāks β pieaugums ir pie lielākām induktivitātes vērtībām un lielākām spoles strāvām.



27.att. Rezistances pieauguma faktora β atkarība no frekvences dažādām spolēm ar induktivitāti L un strāvas vērtību

Kā redzams no attēla, spolēm ar mazu induktivitāti ir stipri sarežģītāk iegūt lielu sprieguma pieauguma faktoru. Tas izskaidrojams ar mazu induktivitāšu spoļu tinumu kvalitātes jeb attiecības starp viļņa pretestību un rezistanci samazinājumu.

Kā jau tika teikts 2. nodaļas beigu daļā, daudz kvalitatīvāku rezonanses režīmu varētu nodrošināt, ja paralēli pētāmajai zemfrekvences masīva vada spolei, kuras rezistence ir stipri atkarīga no frekvences, ieslēgtu spoli ar augstfrekvences vadu (Litz vadu), kas nodrošina etalonspoles nemainīgu rezistanci pie dažādām frekvencēm (28 att.). Attēlā L_e ir etalonspole ar rezistanci R_e un induktivitāti L_e , bet pētāmā spole aizvietota ar rezistanci R un induktivitāti L .



28.att. Rezonances ķēde ar paralēlām spolēm

28.attēlā attēloti rezonances ķēdes strāvu un spriegumu aprēķinu pozitīvie virzieni. Ķēdei pievienots spriegums ar pamatharmoniskās efektīvo vērtību

$$U_{rp} = \frac{U_d \cdot 4}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi}. \quad (45)$$

Šis spriegums rada strāvu efektīvo strāvu I_c , kas sadalās I_L un I_e . Tā kā $R \ll \omega L$ un $R_e \ll \omega L_e$, tad var pieņemt un patiesībā tā arī ir, ka I_L un I_e abas sakrīt fāzē; no tā savukārt izriet, ka

$$I_c = I_L + I_e, \quad I_L = \frac{U_L}{\omega L}, \quad I_e = \frac{U_L}{\omega L_e}, \quad \text{tad } \frac{I_L}{I_e} = \frac{L_e}{L} \text{ un } I_L = I_c \frac{L_e}{L + L_e}.$$

No iepriekšējām nodaļām un datorsimulācijām zināms, ka spriegumi U_L un U_c pie rezonances ir vienādi. Tātad pie rezonances

$$I_c = \frac{\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi \cdot R_v} = U_L \omega C, \quad (46)$$

kur R_v - virtuālā visas sistēmas rezistence rezonances gadījumā, U_L - spoles sprieguma efektīvā vērtība pie rezonances, $P = I_c^2 \cdot R_v$ - jaudas zudumi rezonances ķēdē.

$$\text{Jaudas zudumi ķēdē ir vienādi ar } P = \frac{U_L^2}{\omega^2} \left(\frac{R}{L^2} + \frac{R_e}{L_e^2} \right), \text{ un } \omega^2 = \frac{L_e + L}{L_e LC}$$

Tātad jaudas zudumi

$$P = \frac{U_L^2 L_e LC}{L_e + L} \cdot \frac{RL_e^2 + RL^2}{L^2 L_e^2}. \quad (47)$$

Ja pieņem $k_u = \frac{U_{Lm}}{U_d} = \frac{\sqrt{2} U_L}{U_d}$, tad

$$P = \frac{k_u^2 U_d^2 C (RL_e^2 + R_e L^2)}{2(L_e + L) L L_e}. \quad (48)$$

Ievietojot I_c^2 , iegūst, ka virtuālā rezistence aprēķināma kā

$$R_v = \frac{P}{I_c^2} = \frac{k_u^2 U_d^2 C (RL_e^2 + R_e L^2) 2}{2(L_e + L) L L_e U_L^2 \omega^2 C^2}. \quad (49)$$

Izmantojot šo R_v , var iegūt citu izteiksmi nepieciešamās leņķiskās frekvences ω aprēķinam

$$U_L \omega C = \frac{k_u U_d}{\sqrt{2}} \omega C = \frac{\sqrt{2} U_d (L_e + L) L L_e \omega^2 C}{\pi (RL_e^2 + R_e L^2)}.$$

No šejienes

$$\omega = \frac{k_u \pi (RL_e^2 + R_e L^2)}{2(L_e + L)LL_e} \quad (50)$$

Šis ω atkarīgs tikai no parametriem R , L_e , R_e , L un k_u . Salīdzinot abus ω , var dabūt nepieciešamo kapacitāti

$$C = \frac{4(L_e + L)^3 LL_e}{k_u^2 \pi^2 (RL_e^2 + R_e L^2)^2}$$

Aprēķinu piemēri:

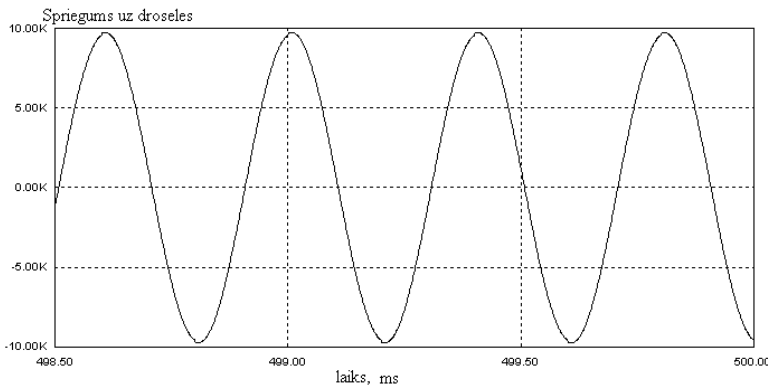
1. $R=5\Omega$, $R_e=0.5\Omega$, $k_u=100$, $L=50\text{mH}$, $L_e=5\text{mH}$.

$$C = \frac{4(0.005 + 0.05)^3 0.05 \cdot 0.005}{100^2 \pi^2 (5 \cdot 0.005^2 + 0.5 \cdot 0.05^2)^2} = 0.8925 \mu\text{F}$$

; lai nodrošinātu rezonansi, jāizmanto

rezonanses frekvence 15700 1/s, vai komutācijas frekvence $f=2500$ Hz.

Pirmajam piemēram tika veikta datormodelēšana ar $U_d=100$ V un kā redzams no 29. attēla, patiesi spoles sprieguma amplitūda ir praktiski 10 kV, t.i., $k_u \cdot U_d$.



29.att. spoles sprieguma diagramma rezonanses ķēdē paralēli ar etalona spoli

4. EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Pētījumiem izveidota spole (att.30.) ar šādiem tehniskajiem parametriem:

- spoles induktivitāte 45,1 mH;
- spoles rezistence pie līdzsprieguma ir 4,7 omi;
- spoles rezistence pie frekvences 100 Hz ir 5,22 omi;
- labums pie 100 Hz – $Q=5,4$;
- spoles rezistence pie frekvences 1kHz – 6,6 omi (labums $Q=42,7$);
- spoles rezistence pie frekvences 10 kHz -100,7 omi (labums $Q=28,9$);
- (visi rezistances mērījumi veikti ar elektronisko parametru mērītāju)
- spoles vijumu skaits – 1019;
- vijumu skaits vienā slānī – 93;
- slāņu skaits spolē – 11;
- spoles garums 26.5cm;
- ārējais diametrs ar tukšo vidu - 15cm, $R=7.5\text{cm}$;
- pašu tinumu biezums 3cm +3cm;
- vada šķērsriezuma laukums 1.0 mm^2 ; $S_v = \pi R^2$; $R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{1}{3.14}} = 0.56\text{mm}$.



30.att. Pētījumu objekts – spole

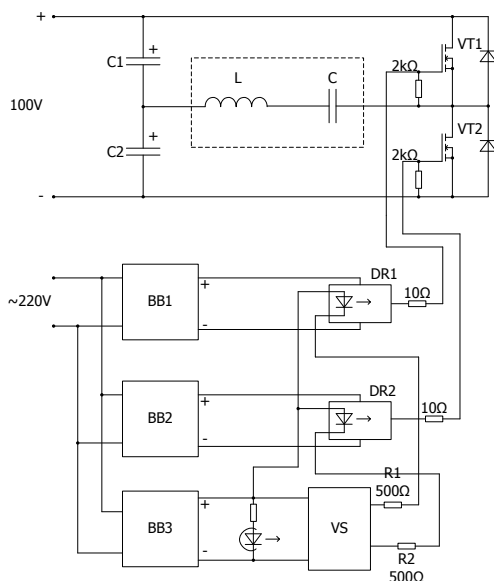


31.att. Pētāmās droseles-kondensatoru bloka attēls

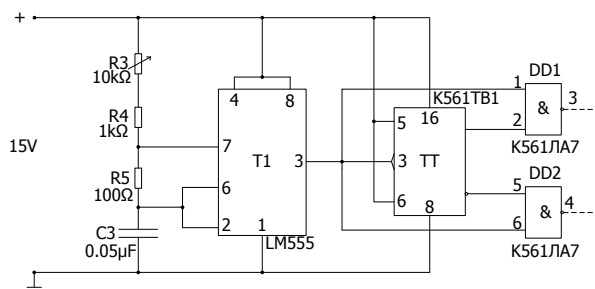
Pētījumi tika veikti rezonanses ķēdē ar spolei virknē slēgtiem augstsprieguma kondensatoriem ar nominālo spriegumu 16 kV un katra kondensatora kapacitāti 0,1 μF . Blokā ir 5 kondensatori, kurus paralēli un virknē savienojot var iegūt kapacitātes no lielākās 0,5 μF diskrētā rindā līdz 0,1 μF , bet virknē slēdzot – līdz mazākajai vērtībai 0,02 μF . Kondensatoru izvēle ļauj iegūt rezonanses frekvences no mazākās $f_r=1060,4$ Hz līdz lielākajai – 5301,9 Hz. Droseles-kondensatoru bloks attēlots 31.att.

Izveidotā rezonanses invertora vadības shēma attēlota 32. att. Spēka daļas barošana veikta no līdzsprieguma avota ar 100 V (32. att.). Ieejā izvietoti divi sprieguma dalīšanas kondensatori C1 un C2 ar kapacitāti 1500 μF katrs. Izveidota pustilta invertora shēma ar MOSFET tranzistoriem VT1 un VT2 ar iebūvētām reversām diodēm. Tilta diagonālē ieslēgti virknē savienotie pētāmā spole un kondensatori.

Vadību veic vadības sistēma VS, kuru baro no barošanas bloka BB3 ar izejas spriegumu 15V. Vadības sistēmas divas izejas caur rezistoriem R1 un R2 attiecīgi pieslēgtas tranzistoru draiveru DR1 un DR2 vadības optoelektriskajām ieejām. Draiverus baro no izolētiem līdzsprieguma barošanas avotiem BB1 un BB2.

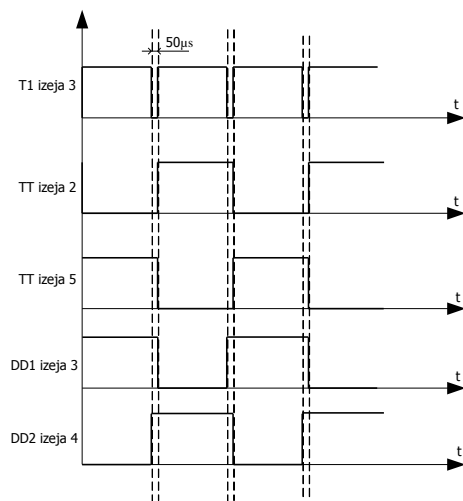


32. att. Rezonanses invertora izveides shēma



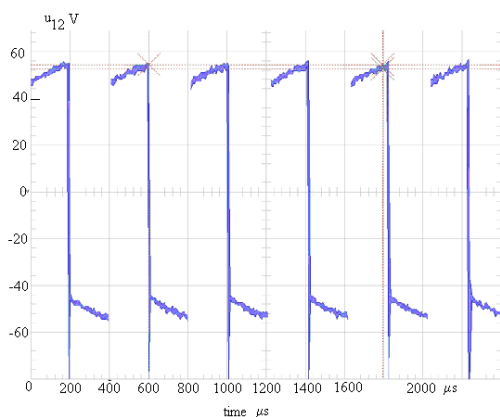
33.att. Vadības shēma

Vadības sistēma (33.att.) sastāv no taimera T1 (tips LM555) ar uzlādes-izlādes R-C ķēdīti R3-R4-R5-C3, kas kopā ar ģeneratora režīmā saslēgto taimeru veido taisnstūra veida



augsta līmeņa signālus ar nulles pauzi starp katru periodu, kuras ilgumu nosaka R5 un C3 parametri. Ģeneratora frekvenci regulē ar rezistoru R3. Taimera izeja pieslēgta T režīmā strādājoša trigeru TT clock ieejai. Katrā izejā ar divas reizes zemāku frekvenci nekā takts ģeneratoram pārslēdzas trigeru tiešā un inversā izeja. Katra izeja pieslēgta savam UN-NE loģiskajam elementam, katra elementa otra ieeja pieslēgta ģeneratora izejai. Tā kā ģeneratora izejā periodiski ir nulles signāls, tad UN-NE loģisko izeju aktīvie stāvokļi nepārklājas un tā veidojas vadības signālu padeves īslaicīgi pārtraukumi, kuru rezultātā spēka tranzistoru vienlaicīga ieslēgšanās ir izslēgta (34. att.).

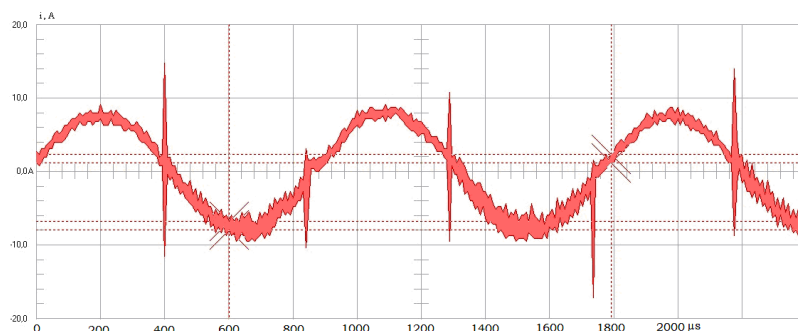
34. att. Vadības shēmas signālu diagrammas



Izmantojot izveidoto shēmu, tika veikti pētījumi ar doto spoli. Rezonanses ķēdes sprieguma momentāno vērtību diagramma attēlota 35. att. Šeit komutācijas frekvence ir 2,5 kHz. Kā redzams ķēdes sprieguma vidējā vērtība pusperioda laikā ir aptuveni 50 V, t. i. pamatharmonikas amplitūda ir 63,7 V. 4.7. att. dota tāda paša sprieguma diagramma pie frekvences 1639 Hz. Pirmā diagramma atbilst rezonanses ķēdes kondensatoram ar kapacitāti 0,1 μF , bet otra diagramma – kondensatoram 0,2 μF .

35.att. Rezonanses ķēdes (starp nullpunktiem) sprieguma diagramma pie frekvences 2,5 kHz

Mainot kondensatorus, tika veikti mērījumi un uzņemtas oscilogrammas ķēdei ar pētāmo droseli rezonanses invertora shēmā. 36. att. parādītas strāvas oscilogramma.

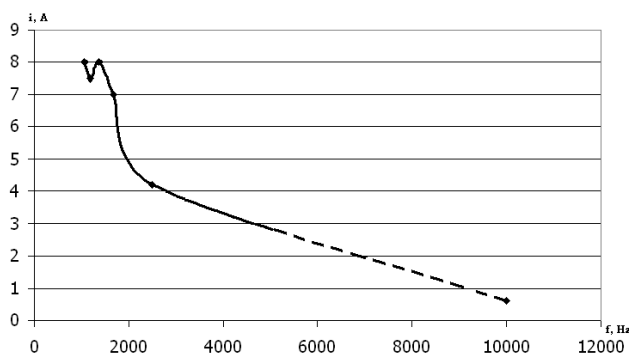


36. att. Strāvas līkne pie frekvences $F=1061.6\text{Hz}$, $C=0.5\mu F$

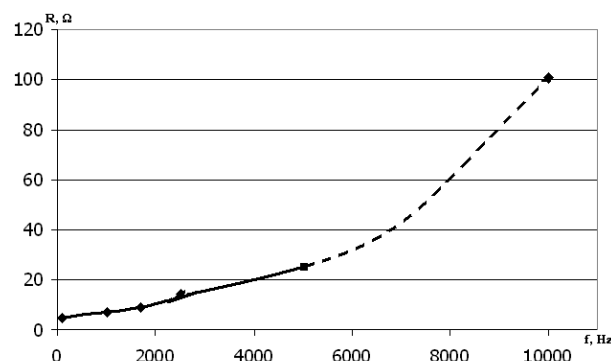
Kā redzams no attēliem, oscilogrammās slēdžu pārslēgšanās brīžos veidojas traucējumu izraisīti izsitieni, kas būtiski traucē novērtējumu. Taču neskatoties uz to var konstatēt, ka paaugstinoties frekvencei samazinās strāvas amplitūda rezonanses ķēdē, t.i.,

redzama spoles rezistances palielināšanās. No oscilogrammām iegūtās strāvu amplitūdas atkarībā no frekvences attēlotas 37. att. Šeit gan frekvenču diapazons nav pārāk liels – no 1000 līdz 2500 Hz, kas saistīts ar kondensatoru kapacitātes pieejamās izvēles problēmām. Līdzīgas līknes iegūtas arī ar efektīvās vērtības ampermetru, kas tika ieslēgts rezonanses ķēdē.

Zinot ķēdes sprieguma pamatharmoniskās amplitūdas vai efektīvo vērtību, var noteikt spoles rezistances atkarību no frekvences. Šīs līknes attēlotas 38.att. Kā redzams, pieaugot frekvencei, strauji aug spoles rezistence, kas skaidrojams ar virsmas efekta ietekmi gan uz vijumu, gan spoli kopumā.

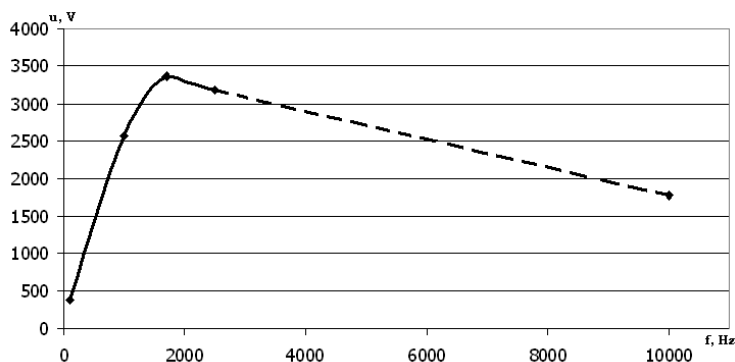


37.att. Rezonanses ķēdes strāvas no frekvences



38.att. Spoles rezistence atkarībā no amplitūdas atkarība no frekvences

Tā kā strāvas amplitūda ar frekvences palielināšanos samazinās, tad tiek ierobežotas



39.att. Spoles sprieguma amplitūda atkarībā no frekvences

arī sprieguma amplitūdas uz spoles. Šāda līkne attēlota 39.att, kur amplitūda aprēķināta reizinot strāvas amplitūdu ar $2\pi f.L$. Vienlaikus attēlota arī sprieguma atkarība pie konstantas rezistances, pieņemot par pamatu tās vērtību pie 1000Hz frekvences. Kā redzams, reāli, pieaugot frekvencei, spriegums tiek ierobežots.

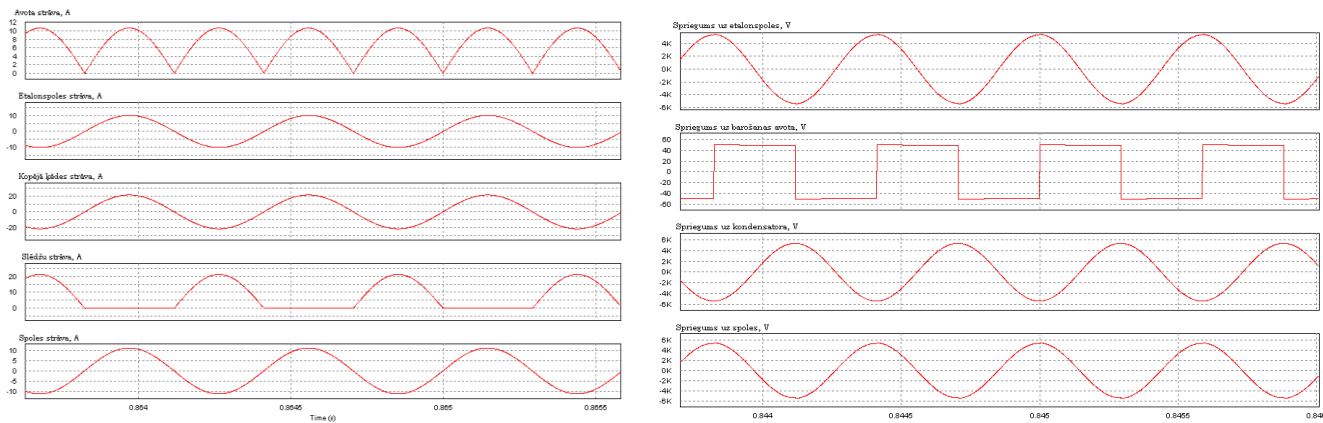
4

Svarīgi ir novērtēt pareizi spoles patieso rezistanci pie dažādām frekvencēm. Ja par pamatu pieņem 1. nodaļā aprēķināto rezistances pieaugumu no frekvences, kad tika pieņemti vienādi magnētiskā lauka iespiešanās dziļumi visos spoles slāņos, un salīdzina rezultātus ar eksperimentā iegūtajiem, tad redzams, ka eksperimentā ir daudzkārt lielāki rezistances pieaugumi pie vienādām frekvencēm. Analizējot eksperimentu rezultātus, var secināt, ka spoles katrā nākošajā no ārējās virsmas aplūkotajā slānī ir mazāks iespiešanās dziļums, pie tam δ ir vienāds ar δ/n , kur n ir slāņa numurs, skaitīts no ārējās virsmas.

Procesu izpētei shēmā ar paralēlo augstfrekvences spoli par pamatu ņemta pētāmā spole ar dotajiem un izmērītajiem rezistances parametriem atkarībā no frekvences. Pieņemot frekvenci un attiecīgo rezistanci, pētām procesu shēmā ar paralēlo etalonspoli, kuras induktivitāte ir 50 mH un rezistence 2 omi. Procesu izpēte veikta PSIM datormodelī ar barošanas spriegumu pustilta invertora shēmai 100 V. Frekvences tika pieņemtas 100 Hz, 1000 Hz, 1700 Hz, 2500 Hz un 10kHz. Pēc šīm frekvencēm tika aprēķināti sprieguma

paaugstinājuma koeficienti un nepieciešamās kapacitātes.

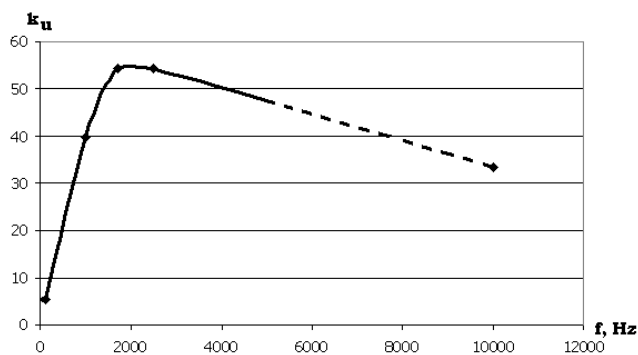
Iegūtās ķēžu strāvu un spriegumu diagrammas attēlotas 40. att.



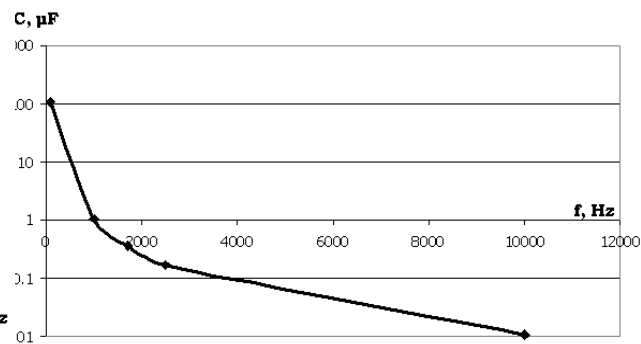
40. att. Shēmas strāvu un spriegumu diagrammas pie frekvences 1700 Hz ; $f=1700\text{Hz}$, $C=0.37\mu\text{F}$, $U_{\text{max}}=5423\text{V}$, pētāmās spoles rezistence 9.1 omi.

Kā redzams no attēla, maksimālais spriegums uz spoles sasniedzams pie frekvences 1700 Hz un pēc tam tas tomēr samazinās. Koeficienta k_u atkarība no frekvences attēlota 41.att. No šejienes var izdarīt secinājumu, ka, lai panāktu lielāku spriegumu uz spoles, nepieciešams tomēr palielināt barošanas avota spriegumu, pie tam proporcionāli nepieciešamajam sprieguma pieaugumam. Pie tam nav jēgas palielināt frekvenci virs 1700 Hz, kad ir vislielākā efektivitāte pie dotajiem etalonspoles parametriem.

Redzams, ka visiem parametriem to efektīvie lielumi samazinās līdz ar frekvences paaugstināšanos.



41. att. Koeficienta k_u atkarība no frekvences



42. att. Kondensatora vērtības pie dažādām frekvencēm

SECINĀJUMI PAR PROMOCIJAS DARBU

1. Zelfrekvences spoļu starpslāņu un starpvijumu izolācijas pārbaudei var pielietot pētīšanu augstfrekvences sprieguma rezonanses ķēdē, kas ieviesta rezonanses invertora ķēdē. Šādā veidā tiek panākts augsts spriegums, kas pievienots spolei ar mazu strāvu spolē, kas nodrošina sistēmas darbību no zemsprieguma mazjaudīga līdzsprieguma barošanas avota.

2. Veicot sistēmas elementu parametru aprēķinus, jāņem vērā zelfrekvences pētāmo spoļu rezistances straujā atkarība no frekvences mainīgā elektromagnētiskā lauka iespaidā gan uz vijumu, gan uz visu spoli, kā rezultātā rezistence strauji pieaug, ierobežojot spoles labumu pie augstām frekvencēm.

3. No aplūkotajām pārveidotāju shēmām vispiemērotākā ir rezonanses invertora pustilta shēma, kurai ir gan minimālais slēdžu skaits, gan visvienkāršākā vadības sistēma.

4. Spoles sprieguma amplitūdas vērtību rezonanses režīmā pustilta invertora shēmā var ar ļoti augstu precizitāti noteikt pēc rezonanses ķēdes sprieguma pamatharmoniskās amplitūdas ietekmi uz spoles rezistanci, kas nosaka ķēdes strāvas amplitūdu, bet tā, savukārt, reizināta ar leņķisko frekvenci un induktivitāti – sprieguma amplitūdu.

5. Ja veido vienkāršo rezonanses ķēdi, tad, palielinot frekvenci, pētāmās spoles rezistence pieaug un maksimālā spoles sprieguma vērtība sasniedzot maksimumu, pēc tam strauji samazinās, kas ierobežo iespēju iegūt augstus spriegumus uz spoles.

6. Ja paralēli pētāmajai zemfrekvences spolei ieslēdz etalonspoli ar praktiski no frekvences nemainīgu rezistanci, tad iespējams daļēji ierobežot spoles strāvas strauju samazināšanos pie frekvences pieauguma, un panākt augstākus spriegumus uz spoles pie vienām un tām pašām frekvencēm.

7. Arī shēmā ar paralēlo etalonspoli ir novērojams sprieguma līmeņa ierobežojums pie noteiktas frekvences. Izejot no šī ierobežojuma, var secināt, ka nav jēgas darboties ar lielāku frekvenci par maksimumam atbilstošo.

8. Spoles izolācijas caursites gadījumā eksperimenta laikā strauji samazinās spriegums uz spoles, jo nebojātās spoles daļas rezistence īsslēgtā kontūra iedarbes iespaidā ir strauji palielinājusies, bet induktivitāte – samazinājusies, nodrošinot ķēdes izeju no rezonanses režīma.

9. Spoles izolācijas caursites brīdī novērojams rezonanses ķēdes strāvas impulsveida pieaugums, kurš var būt bīstams invertora slēdžiem, un tas jāievēro projektējot ietaisi.

10. Lai panāktu lielākus spriegumus uz pētāmās spoles, līdzstrāvas barošanas avotam būtu jānodrošina regulēšanas iespējas.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Dreimanis E., Raņķis I. Determination of high-voltage windings monitoring voltage in scheme with resonant inverter, 6th International symposium topical problems in the field of electrical and power engineering, Kuressaare, Estonia, 2009, p.22-25.

2. Dreimanis E., Raņķis I. Development of the impulse method for testing high-voltage coil interturn insulation, 5th International symposium topical problems in the field of electrical and power engineering, Kuressaare, Estonia, 2008, p.17-19.

3. Dreimanis E., Raņķis I. Resonant inverter operation with over-frequency of load circuit, 8th International symposium topical problems in the field of electrical and power engineering, Parnu, Estonia, 2010, p.221-224.

4. Dreimanis E., Raņķis I. Determination of high-voltage windings monitoring voltage in scheme with resonant inverter, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 24, Rīga, RTU, 2010, 94-98 lpp.

5. Dreimanis E., Raņķis I. Elektrisko bezserdes spoļu parametru novērtējums, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 26, Rīga, RTU, 2010, 63-66 lpp.

6. Dreimanis E., Raņķis I. Elektriskās spoles darbība vijuma īsslēguma gadījumā, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 26, Rīga, RTU, 2010, 58-62 lpp.

7. Dreimanis E., Hramcovs V., Cīmanis V. Augstsprieguma tinumu izolācijas pārbaude ar rezonanses invertora palīdzību, *Enerģētika un Elektrotehnika*, sērija 4, sējums 22, Rīga, RTU, 2008, 94-108 lpp.

8. Dreimanis E., Raņķis I. Calculation of voltage resonance circuit with coreless electrical coil, 9.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2010. 190-192p.

9. Dreimanis E., Raņķis I. Operation of Electrical Coil with damaged windings insulation// 10.International Symposium. Topical Problems in The Field of Electrical and Power Engineering 2011. 13-16p.