

Elektrisko bezserdes spoļu parametru novērtējums

Ivars Rankis, Riga Technical University, Edgars Dreimanis, Riga Technical University

Kopsavilkums. Darbs veltīts transformatoru un reaktoru elektrisko spoļu parametru novērtējumam, ko varētu izmantot sprieguma rezonanses pie paaugstinātas frekvences režīmu izpētei. Izmantojot tipveida spoles induktivitātes aprēķina izteiksmi, kā arī praktiskās rekomendācijas, pie pieņēmuma, ka spoles tinuma biezums ir vienāds ar tās vidējo rādiusu, iegūtas parametru (spoles tinumu vidējā rādiusa, strāvas racionālā blīvuma, spoles masas, tinuma vada diametra) saimes atkarībā no induktivitātes un efektīvās aprēķina strāvas šo parametru zonās no 0.1 līdz 60mH un no 50 līdz 300A. Aproximējot aprēķinu rezultātus, iegūtas arī tuvināto aprēķinu izteiksmes, kurās ievēroti induktivitāte, efektīvā strāva un spoles garuma attiecība pret ārējo diametru. Aprēķinot darbību paaugstinātas frekvences sprieguma režīmā, ievērots virsmas efekts un iegūtas sakarības spoļu tinumu rezistances attiecībai paaugstinātas frekvences un līdzstrāvas gadījumos.

Atslēgas vārdi: frekvence, induktivitāte, rezistance, rezonanse, spole, strāvas blīvums.

I. IEVADS

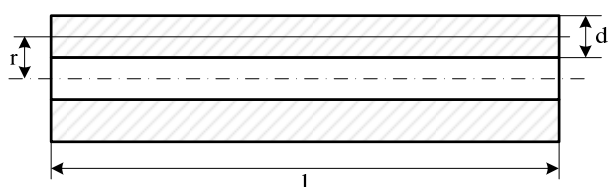
Elektriskās spoles ir būtiski elektromagnētisko elektrotehnisko ierīču elementi un to parametru izpētei veltīti daudzi darbi. Šī raksta uzdevums ir novērtēt spoles rezistenci, to ieslēdzot paaugstinātas frekvences sprieguma ķēdē, kad īslaicīgi ar šādu spriegumu tiek pārbaudīta spoles starpvijumu izolācija, pie tam spoles tinuma vads ir homogēns, t.i., atbilstošs darbam industriālā sprieguma elektromagnētiskajās sistēmās.

II. SPOLES PARAMETRI LĪDZSTRĀVAS ĶĒDĒ

Par pamatu pētījumam pieņemta pazīstamā spoles induktivitātes izteiksme [1]:

$$L = \frac{0,32r^2w^2}{(6r + 9l + 10d)10^4}, \quad (1)$$

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



1.att. Elektriskās spoles skice

Pētījumā pieņemts, ka $d = r$. Šāds pieņēmums ļauj normalizēt izteiksmi (1). Savukārt pie $d=r$ vijumu skaits ir atkarīgs no strāvas efektīvās vērtības I_{ef} , pieņemtā strāvas

blīvuma j , aizpildījuma koeficienta k_a (pēc [2] k_a var tikt pieņemts kā 0,35):

$$w = \frac{l \cdot r \cdot 0,35 \cdot j}{I_{ef}}. \quad (2)$$

Viens no svarīgākajiem parametriem ir strāvas blīvums, kura vērtība ir jāsaskaņo ar spoles racionālajiem silšanas apstākļiem pie uzdotās strāvas aprēķina efektīvās vērtības I_{efa} . Pēc [2] īpatnējiem jaudas zudumiem uz dzesējošās virsmas laukuma vienību jābūt robežās starp $q = 1100 \text{ W/m}^2$ un $q = 1200 \text{ W/m}^2$. Ja indikators q ir mazāks par 1100 W/m^2 , tad j jāpalielina, ja lielāks par 1200 W/m^2 - jāsamazina. Ņemot vērā, ka spoles iekšējā virsma ir saistīta ar elektromagnētisko sistēmu, kā dzesējošo var pieņemt tikai ārējo virsmu $S_{dz} = l \cdot 3\pi r$, bet zudumus tinumā ar vara vadiem noteikt kā:

$$\Delta P_{sp} = I_{efa} \cdot w \cdot 0,02 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi r j. \quad (3)$$

Pielietojot algoritmu „sākotnējais j - rādiusa aprēķins - vijumu skaita aprēķins - zudumu aprēķins - q aprēķins - j precizēšana un aprēķinu atkārtojums”, var iegūt parametru saimes $r = f(L)$, $R_0 = f(L)$, $j = f(L)$, $G_{sp} = f(L)$ pie dažādiem I_{efa} . Šeit R_0 ir spoles tinuma rezistence līdzstrāvai, G_{sp} - spoles masa kg. Minētās sakarības induktivitāšu diapazonam no 0,1mH līdz 60mH un efektīvo strāvu - no 50A līdz 300A, attēlotas 2.att. Šeit pieņemts, ka spoles garums l ir 4 reizes lielāks par ārējo diametru, t.i., indikators $l/d = l/3r = 4$. Šāds l/d indikators ir labs dzesēšanas uzlabošanai, tādēļ šai gadījumā var tikt palielināts j .

Minētie raksturojumi ir ļoti atkarīgi no spoles garuma l un ārējā diametra d attiecības $ld=l:d$ - pie lielākiem $l:d$ rādiuss r samazinās, rezistence R_0 pieaug un pieaug arī racionālais strāvas blīvums j . Tas saistīts ar dzesēšanas apstākļu uzlabošanu.

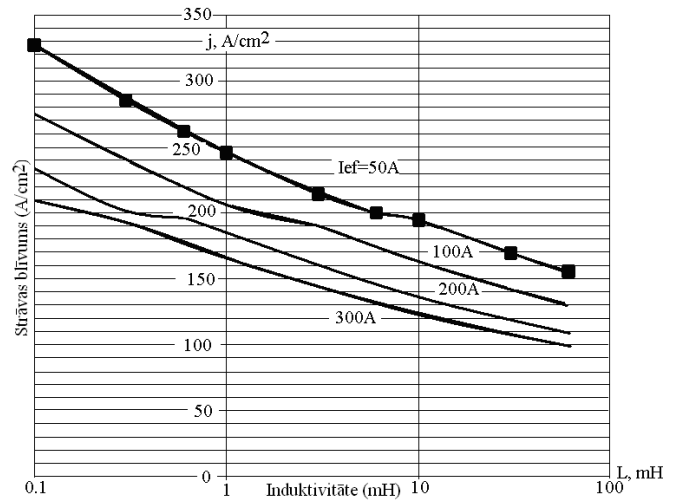
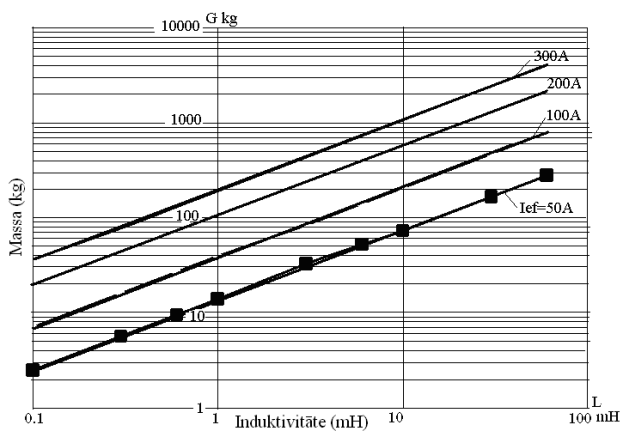
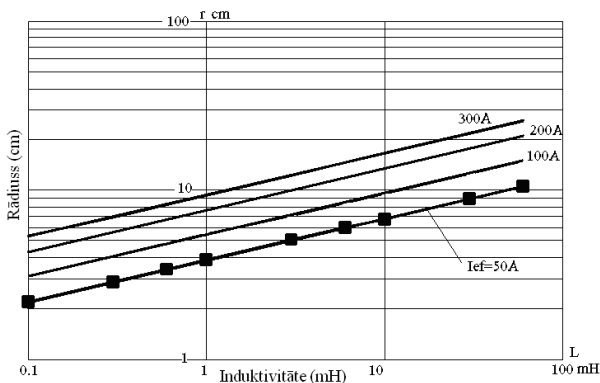
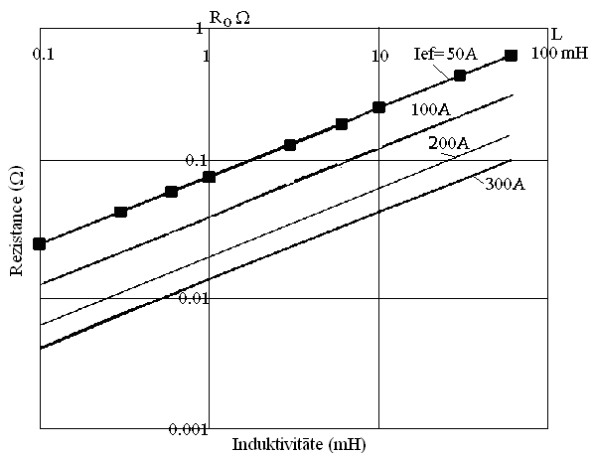
Raksturlīknes $r = f(L)$, $R_0 = f(L)$, $j = f(L)$ aplūkotajam induktivitāšu un strāvu diapazonam var diezgan labi aproksimēt:

rādiuss $r = \frac{0,045}{\sqrt[4]{ld}} \cdot \sqrt[4]{L} \sqrt{I_{efa}},$ (4)

rezistance līdzspriegumam

$$R_0 = 86 \cdot \sqrt[4]{ld} \frac{\sqrt{L}}{I_{efa}},$$
 (5)

strāvas blīvums $j = \frac{1,6 \cdot 10^6 \cdot \sqrt[10]{ld}}{\sqrt[6]{L} \cdot \sqrt[5]{I_{ef}}}$ (6)



2.att. Elektrisko spoļu parametru $R_0 = f(L)$, $r = f(L)$, $G_{sp} = f(L)$, $j = f(L)$ pie dažādiem I_{efa} saimes; spoles garuma un ārējā diametra attiecība ir 4:1

Pielietojot iegūtās izteiksmes, spoles vada rādiuss aprēķināms kā

$$r_v = \sqrt{\frac{I_{efa}}{\pi j}} = \sqrt{\frac{I_{efa} \sqrt[6]{L} \cdot \sqrt[5]{I_{efa}}}{1,6 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot \sqrt[10]{ld}}} \quad (7)$$

III. AUGSTFREKVENCES STRĀVAS IETEKME

Augstfrekvences strāva caur spoli izraisa izteiktu virsmas efektu spoles vadā, kas raksturojas ar elektromagnētiskā viļņa iespīšanās dziļumu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}},$$
 (8)

kur ρ - īpatnējā rezistence ($0,02 \cdot 10^{-6} \Omega m$ karstam vara vadam), μ - magnētiskā caurlaidība (nemagnētiskiem materiāliem $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$).

Turklāt starp strāvu vadošiem spoles vadiem eksistē arī tuvuma efekts [4], kā rezultātā vēl vairāk sarežģās katra vijuma reālās strāvas ceļa forma. Rezultātā spoles šķērsgrīzumā visi vijumi nav vienādos strāvas blīvuma apstākļos un, kā zināms [3], lielākie strāvas blīvumi ir spoles iekšējos slāņos. Taču, lai vienkāršotu aprēķinu, tuvināti pieņemam, ka strāvas blīvumi ir vienādi visos spoles šķērsgrīzuma slāņos un tos ietekmē tikai virsmas efekts.

Kā zināms [3], virsmas efekta rezultātā strāva vadītājā reāli plūst tikai ārējā slānī ar biezumu δ un vadītāja efektīvais šķērsgrīzums samazinās:

$$S_{vef} = \pi r_v^2 - \pi (r_v - \delta)^2 = \pi (2r_v \delta - \delta^2). \quad (9)$$

Izmantojot r_v un δ izteiksmes, var iegūt attiecību starp S_{vef} pie paaugstinātas strāvas frekvences un šķērsriezumu

$S_v = \pi r_v^2$ līdzstrāvas gadījumā:

$$\frac{S_{vef}}{S_v} = \frac{\delta}{r_v} \left(2 - \frac{\delta}{r_v}\right) = \quad (10)$$

$$= \sqrt{\frac{8 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[10]{ld}}{\pi \cdot f \cdot I_{efa} \cdot \sqrt[5]{L} \sqrt[5]{I_{efa}}}} \left(2 - \sqrt{\frac{8 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[10]{ld}}{\pi \cdot f \cdot I_{efa} \cdot \sqrt[5]{L} \sqrt[5]{I_{efa}}}}\right)$$

Izteiksme spēkā, ja $\delta < r_v$, t.i., ja frekvence ir augstāka kā

$$f_\delta = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot \sqrt[10]{ld}}{\pi \cdot I_{efa} \cdot \sqrt[5]{L} \sqrt[5]{I_{efa}}} \quad (11)$$

Tā kā, pieaugot frekvencei, attiecība $\frac{S_{vef}}{S_v}$ samazinās, tad rezultātā attiecīgi pieaug spoles rezistence R_δ attiecībā

pret R_0 , kas ir apgriezta attiecībai $\frac{S_{vef}}{S_v}$. Attēlā 3 ir

parādīta attiecība $\frac{R_\delta}{R_0}$ spolēm ar dažādu induktivitāti un

dažādām efektīvajām strāvām pie indikatora $ld = 4$. Kā redzams, jo lielāka ir induktivitāte un efektīvā strāva, jo

lielāka ir attiecība $\frac{R_\delta}{R_0}$.

Aprēķini rāda, ka attiecības l un d indikatoram ld nav lielas ietekmes uz rezistences pieaugumu.

Laikā pārbaudītu iegūtās sakarības, tika veikti rezistanču īpatnējās vērtības aprēķini uz spoles vada garuma vienību un šīs vērtības salīdzinātas ar vispārzināmo izteiksmi vara vadam [4]:

$$R'_\delta = 4,165 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{f}}{r_v} \frac{\Omega}{m} \quad (12)$$

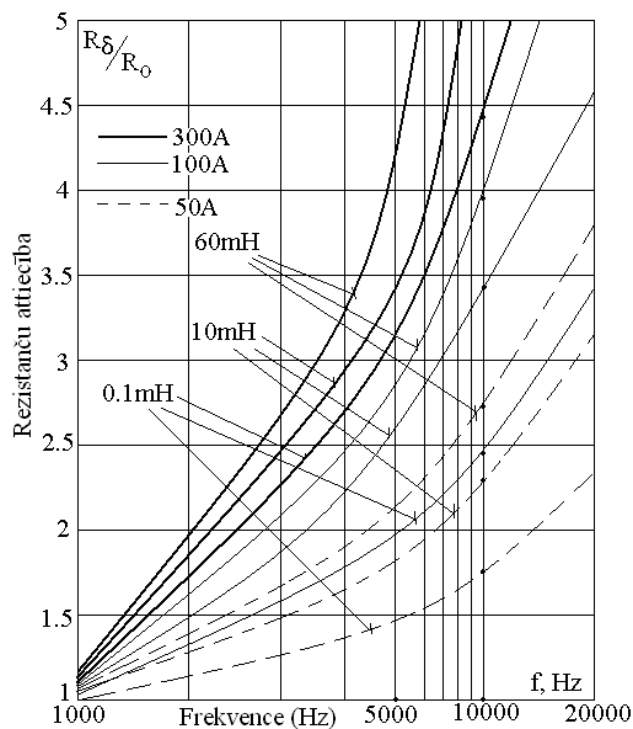
Tā, piemēram, spolei ar induktivitāti $L = 0,01H$ un efektīvo strāvu $I_{efa} = 100A$ spoles rādiuss $r = 0,118m$,

vijumu skaits $w = 430$, vada rādiuss $r_v = 4,64mm$ un pie frekvences $5000Hz$ īpatnējā rezistence ir

$0,000765 \frac{\Omega}{m}$. Aprēķinātā pēc izteiksmes (12) ir

$0,0006347 \frac{\Omega}{m}$. Līdzīga rezultātu sakritība novērojama

arī pie citām frekvencēm, induktivitātēm un strāvām, kas norāda uz izveidotās tuvinātās metodes pietiekošu efektivitāti. Turklāt, jo lielāki aprēķinu parametri, jo rezultāti ir tuvāki.



3.att. Tuvināti aprēķinātās $\frac{R_\delta}{R_0}$ attiecības spolēm ar garuma un diametra attiecību 4:1 pie dažādām strāvām un induktivitātēm

IV. SECINĀJUMI

Izveidotā aprēķinu metode ļauj tuvināti novērtēt bezseržu elektrisko spoļu galvenos parametrus – rezistenci līdzspriegumam, racionālo strāvas blīvumu, spoles vidējo rādiusu, masu atkarībā no induktivitātes, garuma un ārējā diametra attiecības un aprēķina efektīvās strāvas vērtības pie pieņēmuma, ka spoles tinuma biezums ir vienāds ar tās vidējo rādiusu, t.i., $d=r$.

Induktivitātei augot, visi galvenie parametri, izņemot racionālo strāvas blīvumu, palielinās; rādiuss un masa, pieaugot aprēķina strāvai, pieaug, bet racionālais strāvas blīvums un rezistence līdzspriegumam – samazinās.

Darbojoties augstfrekvences strāvas ķēdē, spoles rezistence būtiski palielinās virsmas efekta iespaidā. Iegūtā izteiksme rezistences palielinājumam virsmas efekta iespaidā nodrošina pietiekamu precizitāti un to var pielietot tuvinātajos aprēķinos.

LITERĀTŪRAS SARAKSTS

- [1] Электротехнический справочник, под общ. ред. П. Г. Грудинского и др. 5-е изд., испр. Москва: Энергия, 1974-1975.
- [2] Пуглаенко Л.А. Оптимальный в экономическом отношении сглаживающий реактор со стержневым магнитопроводом и зазорами.- Изд.вузов.сер. Электромеханика, 1980, Н.7, с 756-759.
- [3] Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника.- М.: Техносфера, 2005, 630 стр.
- [4] Атабеков Г.И., Купалян С.А. и др. Теоретические основы электротехники, части II- III - М.: Энергия, 1966, 275 стр.



Ivars Rankis, professor, Hab.Dr.sc.eng. He graduated from Riga Polytechnical institute in 1960 as engineer-electromechanic. Defended his first degree of Dr.sc. (candidate of technical sciences) in 1970. Defended his second degree Hab.Dr.sc.eng. in 1992 at Riga Technical university.

From 1958-1966 he worked as engineer at Riga Electrical machine building company. From 1966 he started studies as doctoral student, but from 1970 – as teacher of different subjects of electrical engineering at Riga Technical university. Research interests are connected with Power electronics and Industrial automation. Now is professor at departement of Industrial electronics and electrical technologies of Riga Technical university.

Riga Technical university, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering
Address: Kronvalda 1, LV1048,Riga.
Phone +371 67 089 917, rankis@cef.rtu.lv



Edgars Dreimanis, doct.student. He graduated Riga Technical university in 2007 with Master degree in electrical engineering. Now is working in telecommunication enterprise as engineer-electric. Started doctoral studies in 2007. Resrach interests are connected with application of power electronics in different fields of economy.

Riga Technical university, Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering

Address: Kronvalda 1, LV1048, Riga.

Phone:+37167 089 917,

edgars.dreimanis@tvnet.lv

Ivars Rankis, Edgars Dreimanis. Parameters evaluation of electrical coreless coils.

This research is devoted to parameters evaluations of electrical coils of transformers and reactors which should be applied for investigation voltage resonance regimes at higher frequency. Taking into account the typical equation for calculation of coils' inductance as also practical recommendations it's obtained a parameters (averaged radius of coil, rational current density, mass of coil and diameter of wire) family in dependence on inductance in range of 0.1 to 60mH and RMS current of 50 to 300A at assumption that thickness of windings turns is equal to the averaged radius of coil. From the results is obtained approximated equations in which inductance, RMS current and relation between length and external diameter of coil are taken as arguments. Calculating operation of raised frequency the skin-effect is taken into account and connections between resistance at raised frequency and DC current are obtained.

Иварс Ранкис, Эдгарс Дрейманис. Оценка параметров электрической катушки без сердечника.

Работа посвящена оценке параметров электрических катушек трансформаторов и реакторов, что могло быть использовано для исследования резонансных режимов при высоких частоте и напряжении катушки. Используя типовое уравнение индуктивности катушки и практические прекомендации, при допущении, что толщина слоя намотки равна среднему радиусу катушки, получено семейство параметров катушки (среднего радиуса, рациональной плотности тока, массы, диаметра провода) от значений индуктивности и эффективного тока в зоне величин от 0.1 до 60мН и токов от 50 до 300А. Апроксимируя результаты расчетов, получены и приближенные вырашения учитывающие индуктивность, действующий ток и соотношение длины и внешнего диаметра катушки. При расчете режима работы с повышенной частотой учтен только поверхностный эффект и получены соотношения резистивности при повышенной частоте и постоянном токе.