

Влатко Чингоски

АД Електростопанство на Македонија, Сектор за развој и инвестиции

Јошинори Фуцинами и Хидео Јамашита

Факултет за инженерство, Хирошима Универзитет, Јапонија

АНАЛИЗА НА ТЕМПЕРАТУРНО ПОЛЕ НА СИНХРОНЕН ГЕНЕРАТОР ЗЕМАЈКИ ГИ ПРЕДВИД ВРТЛИВИТЕ ВИСОКО-ФРЕКВЕНТНИ ХАРМОНИЦИ НА МАГНЕТНОТО ПОЛЕ

КУСА СОДРЖИНА

Со цел зголемување на ефикасноста на вртливите машини, од голема важност е во процесот на нивното проектирање да се земе предвид покрај распределбата на електромагнетното поле и распределбата на топлинското поле. Добро е познато дека и мало зголемување на температурата на машината над номиналните вредности доведува до рапидна деградација на својствата на изолационите материјали, едновременно намалувајќи го и животниот век на машината. Заради тоа, потребно е детално да се проучи можниот пораст на температурата при различни работни режими уште за време на процесот на проектирање.

Во овој труд се дискутира еден метод за анализа на прирастот на температурата на вртливите машини (генератори) земајќи предвид појава на вртливи високо-фреквентни хармоници на магнетното поле. Методот е базиран на дводимензионална топлинска анализа со помош на користење на методата на конечни елементи. Ќе покажеме дека со земањето предвид на овие високо-фреквентни хармоници на магнетното поле, всушност значително се подобрува точноста на пресметаната распределба на топлинското поле. Особено е важно да се напомене дека со вклучување на високо-фреквентните хармоници на магнетното поле, точноста на пресметките на загубите во магнетното јадро значително се зголемува. Предложениот метод за анализа е применет на еден трифазен синхронен генератор за кој е прикажана и споредбена анализа помеѓу пресметаните и измерените вредности за загубите и за топлинското поле.

Клучни зборови: синхронен генератор, високо-фреквентни хармоници, загуби во хистереза, загуби заради вртложни струи, метод на конечни елементи.

ABSTRACT

To increase the efficiency of the rotating machines, it is very important to consider thermal field distribution during design stage. It is well known that even a small temperature increase beyond the normal operating level deteriorates rapidly the properties of the insulation materials and decreases drastically the lifetime of the windings. Therefore, it is necessary to throughout investigate the temperature rise in the rotating machines during initial design stage.

In this paper, we discuss a method for temperature field analysis inside the generators taking into account the high-frequency magnetic harmonics. The method is based on the 2D thermal field analysis using the finite element method. We show that taking into account the high-frequency magnetic harmonics, the accuracy of the computed temperature distribution could be improved. The high-frequency magnetic harmonics are considered for the accurate calculation of the iron loss inside each finite element. In this paper, we applied this method to a three-phase synchronous generator and the comparison between the computed and the measured results is shown.

Keywords: synchronous generator, high-frequency magnetic harmonics, hysteresis (iron) losses, eddy-current losses, finite element method.

1 ВОВЕД

Пресметката на распределбата на топлината во електричните машини е прилично сложен и недефиниран проблем. Што се однесува до изворите на топлина, покрај веќе добропознатите загуби во намотките или уште популарно наречени загуби во бакар, постојат уште два генерални извори на топлина кои по својата природа директно се поврзани со распределбата на електромагнетното поле, односно, се појавуваат како резултат на постоењето на ова поле. Овие два извора се загубите заради појавата на вртливите струи како во бакарните проводници така и во железото, како и загубите заради хистереза во магнетните делови од машината. Дополнителен проблем претставува и самиот факт што заради вртењето на машините и постоењето на магнетниот зјај помеѓу статорот и роторот, извонредно тешко е да се определи преносот на температурата со конвекција во овој дел од машината. Заради тоа, поголем број автори се обиделе да направат поедноставување на проблемот со цел да направат пресметка на порастот на температурата барем на некои карактеристични или специфични делови или точки на машините.

Во овие трудови можат да се сретнат голем број на упростувања како на пример, некои автори ги анализираат поодделно статорот и роторот [1]–[4], што доведува до потреба од дефинирање на посебни гранични услови ако се сака да се определат температурите во некои специфични делови на машината. Во некои други пристапи пак [2], [3] се внесуваат т.н. еквивалентни коефициенти на термичка проводност за канал со намотки и за канал со изолација, поодделно. Други автори пак разгледуваат само загуби во бакар или само загуби во железо, а не и двете загуби едновременно. Нажалост, со употреба на било кој од веќе наведените методи за пресметување на загубите во магнетното коло се користи само основната фреквенција на изворот. Имајќи предвид дека загубите во хистереза се пропорционални со фреквенцијата на изворот и со квадратот на магнетната индукција, додека загубите заради вртложните струи се пропорционални со квадратот на фреквенцијата на изворот и вредноста на магнетната индукција, земањето предвид дека магнетната индукција се менува по синусидален закон е една од основните претпоставки за точно определување на загубите, а со тоа и на температурното поле во вртливите машини. Меѓутоа, на овој начин се врши занемарување на високо-фреквентните хармоници на магнетната индукција кои се појавуваат во забите како на статорското така и на роторското магнетно коло. Занемарувајќи ги всушност овие компоненти на магнетното поле, доведува до занемарување на дел од изворите на топлина во машината, а со тоа и до погрешни резултати за распределбата на топлинското поле.

Во овој труд, со земањето во предвид на високо-фреквентните хармоници на магнетното поле, прикажана е метода која овозможува пресметката на загубите во магнетното коло со многу поголема точност. Како резултат на оваа поголема точност во определувањето на загубите, како што е прикажано во трудот, добиени се многу поточни распределби на температурното поле во електричните машини.

2 МЕТОД НА СИМУЛАЦИЈА

Процедурата за вклучување во анализата на високо-фреквентните хармоници на магнетното поле користена во овој труд може да се подели на неколку делови. Најпрво, се прави нумеричка анализа на магнетното поле поврзана со анализа на електричните кола како директен извор на магнетното поле по методата на конечни елементи во дво-димензионална средина (2D coupled-FEM). На овој начин, едновременно се пресметува распределбата на магнетно поле во внатрешноста на машината како и големините на струите кои течат низ статорските и роторските намотки како основен извор за појавата на магнетното поле во машината. Врз основа на овие информации, следен чекор е пресметка на загубите во намотките на машината како резултат на течењето на струите низ нив, без разлика дали се тоа струи од изворот или пак индуцирани струи. Во исто време, се врши и пресметка на загубите во магнетните материјали земајќи ги предвид вишите хармонични компоненти на магнетното поле. На крај, со употреба на пресметаните вредности на загубите во бакар и во железо како извор на топлина во внатрешноста на машината, се определува распределбата на топлинското поле во машината со користење на методата на конечни елементи.

3 ТОПЛИНСКА АНАЛИЗА

Промената на температурата во внатрешноста на електричните машини е резултат на појавата на загубите било да се тие загуби во бакарот (намотките) или загуби во железо (магнетното коло).

Генерираната топлина во внатрешноста на машината се пренесува низ машината како преку магнетните така и преку немагнетните материјали, јадрото, намотките, осовината и сл. Покрај природното одведување на топлината, по надворешниот обим на машината како и низ шуплините во каналите на роторот и магнетниот зјај, се појавува природно одведување на топлината како резултат на вртењето на роторот или пак форсирано ладење заради постоењето на надворешни (или внатрешни) вентилатори. Конечно, во делот помеѓу роторот и статорот, т.н. магнетен зјај топлината се пренесува и преку процес на радијација. Според тоа, може да се заклучи дека дистрибуцијата на топлината во внатрешноста на машините како и нејзиното одведување надвор од истите е многу сложен и комплексен процес. За среќа, влијанието на термичката радијација во делот на магнетниот зјај е прилично мала и може да се занемари. Истовремено, бидејќи ширината на воздушниот зјај е занимарливо мала во однос на неговата должина, постоењето на аксиална компонента на термичкиот флукс може да се занемари во делот на воздушниот зјај. Според тоа, со голема точност може да се заклучи дека основни услови кои ја диктираат вредноста на топлинскиот коефициент на одведување на топлината зависат само од две големини: ширината на воздушниот зјај и брзината на вртењето на машината. Во овој труд, вредноста на температурниот коефициент на одведување изнесува 0.0784 W/mK [2]. Бидејќи дебелината на изолациониот слој помеѓу јадрото на машината и нејзините намотки кој се состои од воздух и изолационен материјал е премногу мал, во овој труд ние користиме константна вредност со износ од 0.111 W/mK за роторот и 0.094 W/mK за статорот [2].

Во врска со одведувањето на топлината од надворешната површина на машината, земено е во предвид дека одведувањето на топлината се остварува само во радијален правец, односно дека не постојат температурни струи нормално на осовината на генераторот. Имајќи предвид дека станува збор за потполно симетрична машина, можеме да направиме анализа само под еден пол на машината со едновремено земање во предвид на соодветните гранични услови кои одговараат на циклична симетрија на моделот.

4 ЗАГУБИ

Загубите во бакар во намотките и загубите во железо во магнетните материјали (ротор и статор) се земени како основни извори на топлина во генераторот. Овие загуби се пресметани врз основа на пресметаните вредности за струите кои течат низ намотките како и вредностите за магнетната индукција добиени како резултат на симулацијата на електромагнетните појави во генераторот со помош на методата на конечни елементи.

4.1 Загуби во бакар

Загубите во намотките на машината односно загубите во бакарот W_C се определуваат според следната формула:

$$W_C = R \left(\sqrt{\frac{1}{T}} \int_0^T i^2 dt \right)^2, \quad (1)$$

каде што R претставува отпорност на намотката, T е период, додека i претставува моментална вредност на струјата која протекнува низ намотката.

4.2 Загуби во железо

Пресметката на загубите во железо е нешто покомплицирана земајќи ги предвид и вишите хармонични вредности на магнетното поле. Имено, n -тиот виш хармоник на магнетната индукција може да се определи со разложување на магнетната индукција B^e со помош на Фуриева анализа. Ова разложување може да се прикаже со помош на елипса како онаа прикажана на Сл. 1.

Според тоа, станува збор за збир на два синусоидални бранови фазно изместени за 90° и со амплитуди еднакви на максималната вредност на магнетната индукција. За да се земе во предвид влијанието на вишите хармоници, во овој труд, направени се најпрво пресметки на n -тите хармонични компоненти на магнетната индукција $B_{n,\max}^e$ и $B_{n,\min}^e$, а дури потоа направени се пресметките за загубите во магнетното коло со користење на вака добиените вредности за магнетната индукција.

Следствено, загубите во железото земајќи ги предвид вишите хармонични компоненти на магнетната индукција можат да се пресметаат според следната формула:

$$W_i^e = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ p \left[K_h(B) n f B_{n\max}^e{}^2 + K_h(B) n f B_{n\min}^e{}^2 \right] S^e L \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ p \left[K_e(B) n^2 f^2 B_{n\max}^e{}^2 + K_e(B) n^2 f^2 B_{n\min}^e{}^2 \right] S^e L \right\}, \quad (2)$$

при што, p претставува густина на магнетниот материјал, f е фреквенција на изворот, S_e е површината на секој конечен елемент, L претставува аксијална должина на машината, n е бројот на вишиот хармоник на магнетната индукција, $K_h(B)$ и $K_e(B)$ се коефициенти на специфичните загуби заради хистереза и заради вртложни струи, соодветно. Првиот дел од (2) ги дава загубите заради хистерезата, додека вториот дел ги дава загубите во железото како резултат на вртложните струи во магнетниот материјал.

4.3 Определување на коефициентите на специфични загуби

Пред да се направи пресметка на загубите во железо според (2), најнапред потребно е да се определат вредностите на коефициентите на специфични загуби во хистереза $K_h(B)$ и во вртложни струи $K_e(B)$. Овие коефициенти можат да се определат според кривите на промена на загубите во железото во функција од промената на магнетната индукција при различни фреквенции. Најнапред, потребно е да се потсетиме на зависноста на овие загуби од фреквенцијата на изворот:

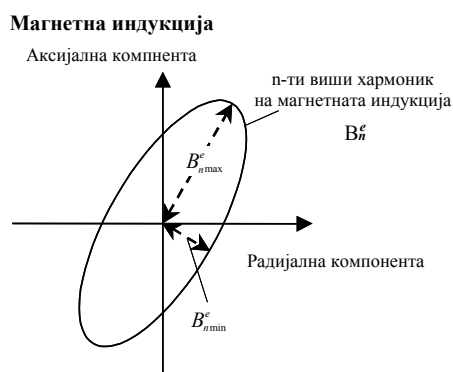
- загубите во хистереза се пропорционални со фреквенцијата, додека
- загубите во вртложните струи се пропорционални со квадратот на фреквенцијата.

Релацијата помеѓу загубите во хистереза W_c и загубите заради вртложните струи W_e по однос на промената на фреквенцијата f' на магнетната индукција B може да се прикажат како на Сл. 2. Ако се определат вредностите за $a(B)$ и $b(B)$, тогаш според Сл. 2 и коефициентите $K_h(B)$ и $K_e(B)$ можат да се определат со користење на релациите дадени во (2). Во овој труд користена е следната процедура:

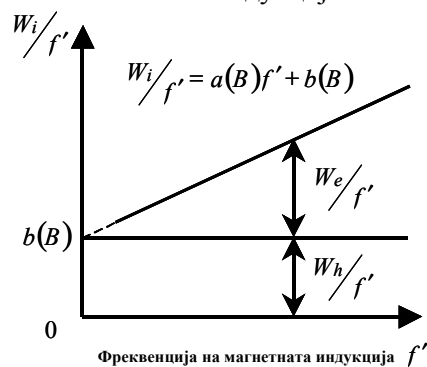
- **Чекор 1:** Се цртаат кривите како од Сл. 2 за различни фреквенции;
- **Чекор 2:** Се определуваат вредностите на коефициентите $a(B)$ и $b(B)$ според (3):

$$\frac{W_i}{f'} = a(B)f' + b(B), \quad (3)$$

каде $a(B)$ и $b(B)$ се константни вредности зависни од вредноста на магнетната индукција B .



Слика 1: N -ти виши хармоник на магнетната индукција.



Слика 2: Релација помеѓу загубите во хистереза и загубите заради вртложни струи во функција од промената на фреквенцијата на магнетната индукција

- **Чекор 3:** Загубите заради хистереза и загубите заради вртложните струи се изразуваат преку следните равенства:

$$W_h = p \left[K_h(B) n f B^2 \right] S L, \quad (4)$$

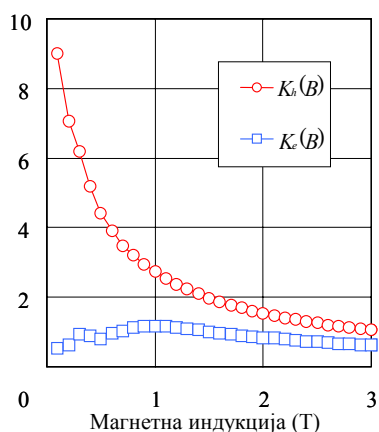
$$W_e = p [K_e(B) n^2 f^2 B^2] SL, \quad (5)$$

Ако се вратиме на Сл. 2, може да се забележи дека и следните равенства важат:

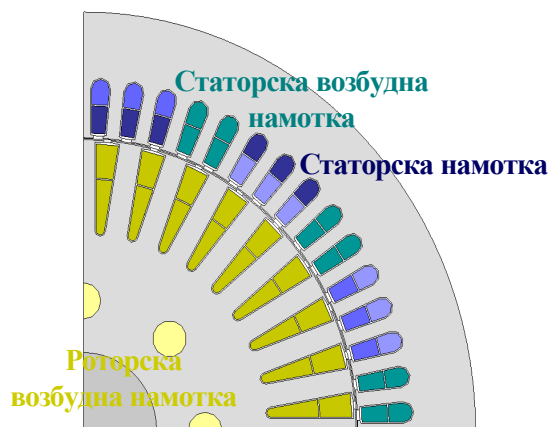
$$b(B) = \frac{W_h}{f'}, \quad a(B) f' = \frac{W_e}{f'}, \quad (6) - (7)$$

- **Чекор 4:** Се определуваат вредностите на коефициентот на специфични загуби во хистереза $K_h(\mathbf{B})$ и коефициентот на специфични загуби во вртложни струи $K_e(\mathbf{B})$ за специфични вредности на магнетната индукција B со користење на сетот равенки (4) – (7).

Со користење на погоре наведената процедура, за неколку вредности на магнетната индукција, можно е да се определат коефициентите на специфични загуби заради хистереза $K_h(\mathbf{B})$ и заради вртложните струи $K_e(\mathbf{B})$. На Сл. 3, дадени се типичните карактеристики на промената на овие два коефициенти во зависност од големината на магнетната индукција.



Слика 3: Зависност на коефициентите на специфични загуби заради хистереза $K_h(\mathbf{B})$ и специфични загуби заради вртложни струи $K_e(\mathbf{B})$ од магнетната индукција



Слика 4: Модел за пресметки.

5 АНАЛИЗИРАН МОДЕЛ И ПРЕСМЕТКА НА ЗАГУБИТЕ

Како модел за анализа во овој труд беше анализиран модел на четири-полен синхронен генератор со самовозбуда шематски прикажан на Сл. 4. Останатите параметри на генераторот беа: моќност $S = 25 \text{ kVA}$, номинален напон $U_n = 220 \text{ V}$, работа во стационарен режим со фактор на моќност $\cos \phi = 0.8$.

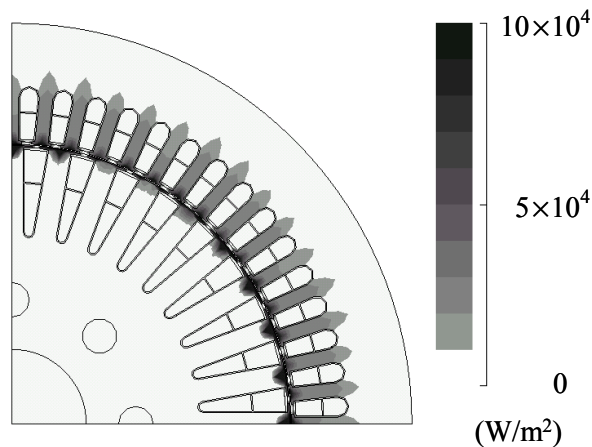
За да се пресметаат загубите во машината, најпрво потребно е да се определат изворите на тие загуби – односно да се пресмета ослободената топлина во самата машина. Прв чекор кон пресметувањето на загубите во генераторот е пресметка на топлинското поле врз основа на кои пресметки во процесот на пост-процесирањето се пресметуваат загубите во машината. Со цел да се направи верификацијата на вака добиените вредности за загревање на машината, направена е споредба помеѓу пресметаните вредности и измерените вредности за загубите во реална машина. Овие спредбени резултати за загубите во бакар и во железо дадени се во Табелите 1 и 2, соодветно. Едновремено, добиената распределба на загубите во железо со помош на анализа по методата на конечните елементи прикажана е на Сл. 5.

Табела 1: Споредба на измерените и пресметаните вредности на загубите во бакар

	Возбудна намотка на статорот	Возбудна намотка на роторот	Статорска намотка	Вкупно
Пресметано (W)	472	1,566	1,055	3,093
Измерено (W)	448	1,301	915	2,664

Табела 2: Споредба на измерените и пресметаните вредности на загубите во железо

	Загуби заради хистереза	Загуби заради појавата на вртложните струи	Вкупно
Пресметано (W)	413	430	843
Измерено (W)	/	/	806



Слика 5: Распределба на пресметаните загуби во железо.

Според прикажаните резултати може да се забележат две основни карактеристики:

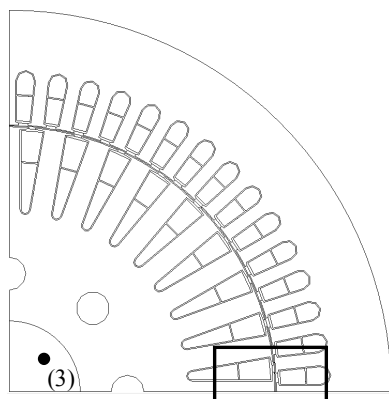
- корелацијата помеѓу пресметаните и измерените резултати е добра со максимални отстапувања помали од 10 %, и
- пресметаните загуби се поголеми од измерените, што според нашето мислење се должи на фактот што во пресметките не е земен во предвид фактот за закривување на намотките во аксијален правец или т.н. skew effect.

Доколку се земе во предвид овој ефект, тогаш вредноста на вишите хармонични компоненти на индуцираниот напон максимално би се намалиле или некои од нив во потполност поништиле. На тој начин, загубите во бакар и во железо би се намалиле како резултат на намалената вредност на струјата која тече низ намотките (за загубите во бакар) како и намалената вредност на резултантната магнетна индукција (за загубите во железо). Ако внимателно се анализира прикажаната распределба на загубите во железото дадена на Сл. 5, може да се забележи дека значителна вредност на овие загуби се создава во забите како на роторското така и на статорското магнетно коло. Според тоа, веднаш станува јасно дека големината на загубите во најголема мерка зависи од појавата и големината на вишите хармонични компоненти на магнетното поле. Точно заради тоа, се одлучивме да направиме анализа на влијанието на овие хармоници на загубите во електричните машини. За таа цел, направена е анализа на овие виши хармонични компоненти во забите на (1) роторот, (2) статорот, и (3) во осовината на машината, како што е шематски прикажано на Сл. 6.

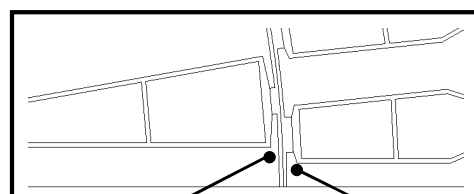
Анализата е направена со помош на Фуриева метода на разложување на резултантното поле на неговите виши хармонични компоненти и тоа во трите делови на машината кои се од значење на истражувањето. Добиените криви на распределбата на вишите хармонични компоненти на магнетното поле во функција од компонентата на магнетното поле, т.н. локациски точки или локуси, прикажани се на сликите 7, 8 и 9, за секој дел од машината (делови (1), (2) и (3)), поодделно.

Според прикажаната распределбата на векторот на резултантното магнетно поле (индукција) и неговите виши хармонични компоненти можат да се изведат неколку заклучоци, меѓу кои поважни се следните:

- Појава на елиптично магнетно поле на 30-ти хармоник на магнетната индукција во забите на роторот за време на неговата ротација што укажува на потребата овој виш хармоник да биде земен во разгледување, а неговата појава е очекувана ако се земе предвид дека бројот на статорските канали кои ги обиколува роторот за време на ротација изнесува точно 30 канали (Сл. 6).

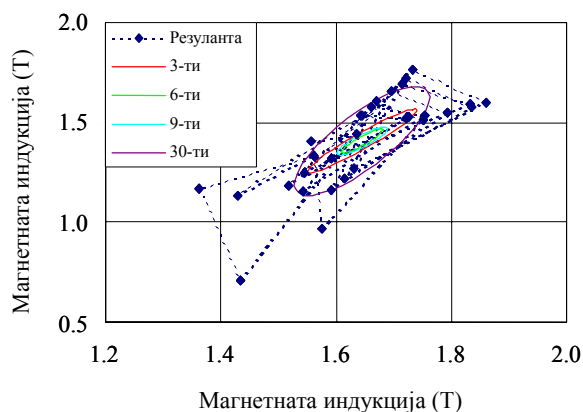


А) Шематски приказ на анализираната машина

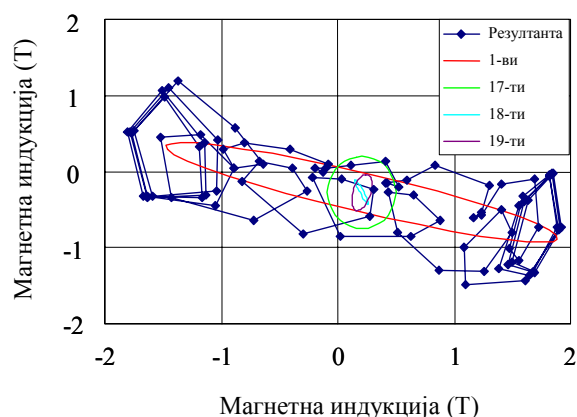


Б) Зголемен поглед на делот од интерес во зоната на забите

Слика 6: Делови од машината кои се земени во анализата на вишите хармонични компоненти на магнетното поле.

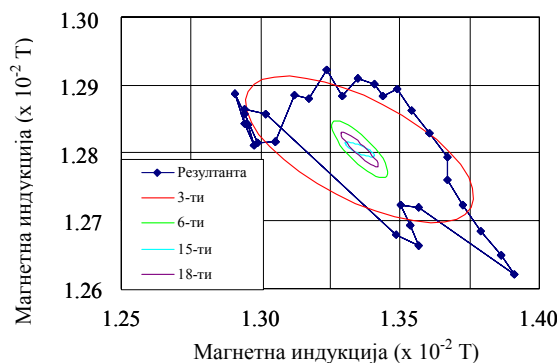


Слика 7: Локација на векторот на магнетната индукција и нејзините компоненти во делот на забите на роторското магнетно коло (1).



Слика 8: Локација на векторот на магнетната индукција и нејзините компоненти во делот на забите на статорското магнетно коло (2).

- Кај статорското магнетно поле (забите на статоротот), веднаш паѓа во очи постоењето на елиптично магнетно поле на првиот или основниот хармоник. Ова недвојбено се должи на фактот што индуцираниот напон во статорските намотки е многу поголем од напоното на возбудното поле т.е. тој е доминантен во овој дел на магнетното коло. Едновремено се забележува појава и на 17-тиот, 18-тиот и 19-тиот виш хармоник со елиптична форма како резултат на фактот што секој статорски заб поминува покрај 18 роторски канали при ротацијата. Ова само наведува на заклучокот дека и овие виши хармоници треба да бидат земени во предвид при анализата на влијанието на вишите хармонични компоненти на магнетното поле врз загубите во електричните машини.



Слика 9: Локација на векторот на магнетната индукција и нејзините компоненти во делот на осовината на генераторот (3).

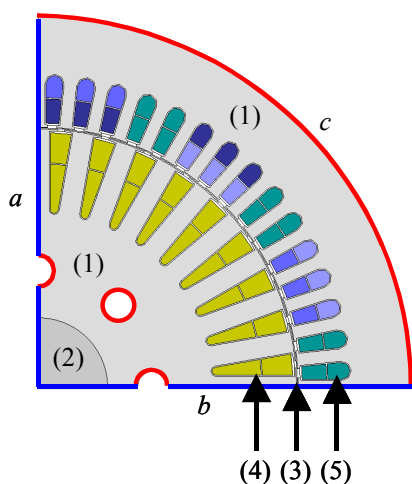
- Со анализа на Сл. 9 може да се забележат две основни карактеристики: (1) вредноста на магнетната индукција е околу 100 пати помала во осовината на машината отколку во забите на статорот и/или роторот, и (2) промените на магнетната индукција во овој дел на машината значително се со помал интензитет отколку во другите две разгледувани области. Во овој дел, значителна вредност има само 3-тиот хармоник. Причината за неговата појава е очекувана и очигледна затоа што:
 - полето генерирано од статорските намотки нема никакво влијание при индуцирање на напони во роторската возбудна намотка затоа што и двете намотки се четворополни, додека
 - статорската возбудна намотка која е дванаесетополна покажува соодветно влијание на индуцираните напони во роторската возбудна намотка која е четворополна.

6 ПРЕСМЕТКА НА РАСПРЕДЕЛБАТА НА ТОПЛИНСКОТО ПОЛЕ

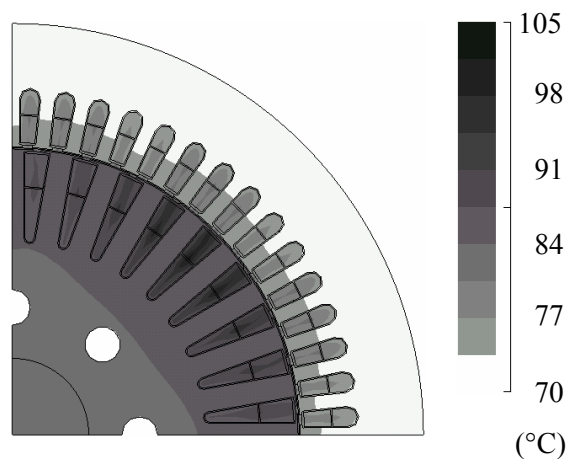
Последна фаза во анализата претставува определување на распределбата на топлинското поле врз основа на веќе определните вредности за загубите во бакарот и во железото на генераторот притоа земајќи ги предвид вишите хармонични компоненти на магнетното поле. За анализа на распределбата на топлинското поле во внатрешноста на генераторот, повторно е користена методата на конечни елементи со употреба на периодични гранични услови. Моделот на генераторот кој го употребуваме за анализа е прикажан на Сл. 10. Користени се следните гранични услови:

- периодични гранични услови по должината на линиите a и b , додека
- природни гранични услови со дефинирана вредност на коефициентот на топлинско одведување по должината на линијата c (Сл. 10).

Вредностите на коефициентите на топлинска проводност за секој регион во анализираниот модел се дадени во Табелата 3. Вредноста на топлинскиот коефициент на конвекција на надворешната површина на статорот изнесува $39.5 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ и $38.5 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ во делот на вентилационите отвори во роторот (Сл. 10).



Слика 10: Упростен модел за анализа на топлинското поле во внатрешноста на генераторот.



Слика 11: Пресметана распределба на топлинското поле во генераторот.

Табела 3: Коefициенти на топлинска проводност

Број	Регион од интерес	Коefициент (W/mK)
(1)	Магнетно коло	42
(2)	Осовина на машината	53
(3)	Воздушен зјај	0.0784 [6]
(4)	Изолација на роторската намотка	0.111
(5)	Изолација на статорската намотка	0.094

На Сл. 11, графички се прикажани резултатите од анализата на распределбата на топлинското поле во внатрешноста на генераторот според методата на конечни елементи. Може да се забележи дека најголемите температури се постигнуваат во делот на централните канали на роторот каде и условите за одземање на температурата од намотките се најлоши. Во тој дел на машината се постигнуваат температури од околу 105° C, што секако добро соодветствува со реалните услови на работењето на машината. Заради споредба, во Табелата 4 дадени се вредности за надтемпературите во неколку карактеристични точки во машината како и нивна споредба со измерените вредности. При тоа, вредностите за температурата во намотките се определени како средна вредност на температурата во целиот регион на каналот исполнет со соодветната намотка. Добиените споредбени резултати покажуваат дека пресметаните вредности се секогаш повисоки од оние кои се измерени, што претставува директен резултат на фактот што веќе понапред во овој труд го изнесовме, а тоа е дека и вредностите за загубите во машината се повисоки од оние кои се измерени. Основна причина за ова е сепак занемарувањето на закривеноста на роторските канали во аксијален правец, т.е. skew effect.

Табела 4: Споредбени резултати помеѓу пресметаните и измерените вредности за надтемпературата

	Статорска намотка	Статорска возбодна намотка	Роторска возбодна намотка
Пресметана вредност (K)	77.5	75.9	89.3
Измерена вредност (K)	65.0	64.6	76.9

7 ЗАКЛУЧОК

Во овој труд прикажан е еден нов пристап за определувањето на топлинското поле во вртливите електрични машини земајќи ги предвид вишите хармонични компоненти на магнетно поле при пресметувањето на загубите во машините. Најпрво беа анализирани загубите во електричните машини и тоа загубите во бакар и загубите во железо при што после анализата на резултантното магнетно поле и неговото разложување на неговите виши хармонични компоненти по методата на Фуриева анализа, беше утврдено дека вредностите на вишите хармонични компоненти можат да имаат значително влијание и треба да се земаат во предвид при анализата на загубите во машините.

Дополнително беше заклучено дека во различните делови на машината, различни виши хармонични компоненти се појавуваат и имаат свое соодветно влијание. Исто така, овие виши компоненти во голема мера зависат од конструкцијата на машините, бројот на канали, како и бројот на половите на машината. Како последен чекор во анализата, беше направена пресметка на распределбата на топлинското поле во внатрешноста на машината како резултат на генерираните загуби. Пресметката е направена по нумерички пат слично како и претходно анализата на магнетното поле со помош на методата на конечните елементи. Споредбата помеѓу нумеричките добиените вредности за температурното поле и измерените вредности е во добра корелација, при што нумеричките вредности се секогаш поголеми воглавно како резултат на занемувањето во анализата на појавата на закосеност на роторските канали во аксијален правец т.е. занемарувањето на т.н. skew effect.

Литература

- [1] A. F. Armor, "Transient, three-dimensional, finite-element analysis of heat flow in turbine generator rotors", *IEEE Transactions on PAS*, Vol. PAS-99, No. 3, 1980, pp. 934-947.
- [2] D. Sarker, P. K. Mukherjee, S. K. Sen, "Temperature rise of an Induction Motor during plugging", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 1, 1992, pp. 116-124.
- [3] D. Sarker, P. K. Mukherjee, S. K. Sen, "Approximate analysis of steady state heat conduction in an induction motor", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 1, 1993, pp. 78-84.
- [4] V. K. Garg, J. Raymond, "Magneto-thermal coupled analysis of canned induction motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-5, No. 1, (1986), pp. 110-114.
- [5] Y. Lee, H. Lee and S. Hahn, "Temperature Analysis of Induction Motor with Distributed Heat Sources by Finite Element Method", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, (1997), pp. 1718-1721.
- [6] V. Hatzithanassiou, J. Xyteras and G. Archontoulakis, "Electrical-thermal coupled calculation of an asynchronous machine", *Archiv fur Electrotechnik* 77 (1994), pp. 117-122.