

# Sprega elektromagnetskih sila i vibracija statorskoga paketa sinkronoga generatora.

---

**Petrinić, Miroslav**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:373252>

*Rights / Prava:* [In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-18**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Miroslav Petrinić

**SPREGA ELEKTROMAGNETSKIH SILA I VIBRACIJA  
STATORSKOGA PAKETA  
SINKRONOGA GENERATORA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2019.



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Miroslav Petrinić

**SPREGA ELEKTROMAGNETSKIH SILA I VIBRACIJA  
STATORSKOGA PAKETA  
SINKRONOGA GENERATORA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Štih

Prof. dr. sc. Hinko Wolf

Zagreb, 2019.



University of Zagreb

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING

Miroslav Petrinić

**COUPLING OF ELECTROMAGNETIC FORCES AND  
VIBRATIONS OF SYNCHRONOUS GENERATOR  
STATOR CORE**

DOCTORAL THESIS

Supervisors:

Professor Željko Štih, PhD

Professor Hinko Wolf, PhD

Zagreb, 2019.



Doktorska disertacija izrađena je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za osnove elektrotehnike i električka mjerenja i u KONČAR – Institutu za elektrotehniku d.d., na Zavodu za rotacijske strojeve

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Štih

Prof. dr. sc. Hinko Wolf

Disertacija ima: 252 stranice.

DOKTORSKA DISERTACIJA BR.: \_\_\_\_\_

## **O mentoru**

**Željko Štih** je rođen 1955. godine u Krapini. Diplomirao je 1978., magistrirao 1981. i doktorirao 1984. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu. Bio je zaposlen u Elektrotehničkom institutu „Rade Končar” na poslovima istraživanja i razvoja u Sektoru za transformatore te u RO „Infosistem” na poslovima razvoja grafičke programske podrške. Od 1986. godine zaposlen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva. U znanstveno-nastavno zvanje redoviti profesor izabran je 2002. godine.

Prof. Štih je autor/koautor tri autorske knjige, dvije uredničke knjige, sedamdesetak znanstvenih radova i stotinjak stručnih elaborata. Trenutno je voditelj istraživačkog projekta „Numeričko modeliranje složenih elektromagnetskih pojava u transformatorima“. U okviru znanstvene i stručne djelatnosti bavi se razvojem numeričkih proračuna elektromagnetskih polja i njihovom primjenom u projektiranju elektromagnetskih naprava.

Predsjednik je tehničkog odbora međunarodnog kolokvija “Transformer Research and Asset Management”, a 1997. godine je dobio nagradu J.J. Strossmayer za znanstveno djelo s područja tehničkih znanosti.

## **About the Supervisor**

**Željko Štih** was born in Krapina, Croatia, in 1955. He graduated in 1978 and received the PhD degree from the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering, Croatia, in 1984. He worked at the Electrical Engineering Institute „Rade Končar” on research and development within the Transformer division and at the „Infosistem” on development of graphical programming support. Since 1986, he works at the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, where he became a Full Professor in 2002.

Professor Štih is the author or co-author of three books, two proceedings, more than seventy scientific papers and more than one hundred expert reports. At the moment he leads the research project „Numerical Modelling of Complex Electromagnetic Phenomena in Transformers“. His research interest is computational electromagnetism and its application to power apparatus and systems.

He is chairman of the Technical Committee of the international colloquium “Transformer Research and Asset Management”. In the year 1997 he received the J.J Strossmayer award for scientific book in the area of technical sciences.

## **O mentoru**

**Hinko Wolf** rođen je 17.10.1962. godine u Zagrebu. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu diplomirao je 1987. godine, magistrirao je 1994., a doktorirao je 1997. Od 1987. do 1988. godine radio je u Institutu za elektrotehniku „Rade Končar”. Od 1988. zaposlen je na Zavodu za tehničku mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Od 2010. obnaša dužnost voditelja Katedre za primijenjenu dinamiku.

Suradivao je na više znanstveno-istraživačkih projekata, te djelovao kao voditelj znanstveno-istraživačkog projekta „Numerička i eksperimentalna istraživanja nelinearnih mehaničkih sustava”. Samostalno ili u koautorstvu objavio je preko 70 znanstvenih radova. Koautor je četiri sveučilišna udžbenika. Tijekom 1992. i 1993. godine kao stipendist tvrtke Schlumberger Technologies u Beču specijalizira primjenu CAD/CAE programskih paketa na statičku i dinamičku analizu mehaničkih konstrukcija. 2007. godine nagrađen je s godišnjom nagradom Akademije tehničkih znanosti hrvatske „Rikard Podhorsky”.

Govori engleski jezik. Član je Hrvatskog društva za mehaniku, Hrvatskog društva za teoriju strojeva i mehanizama i organizacijskog odbora ljetne škole i internacionalne konferencije za integritet i trajnost konstrukcija.

## **About the Supervisor**

**Hinko Wolf** was born on October 17, 1962 in Zagreb. He graduated from the University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in 1987; he took his master's degree in 1994 and his PhD in 1997 at the same university. From 1987 to 1988 he worked at Institute for Electrical Engineering „Rade Končar”. Since 1988 he has been employed at the Department of Engineering Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb. From 2010 he is a head of the Chair of Mechanical Systems Dynamics.

He collaborated on several research projects and was a leading researcher of the project „Numerical and experimental research on non-linear mechanical systems” supported by the Ministry of Science and Technology of the Republic of Croatia. He is the author or co-author of over 70 scientific papers and co-author of four university textbooks.

During 1992 and 1993 as a scholar of Schlumberger Technologies in Vienna he specialized in the application of CAD/CAE software packages on the static and dynamic analysis of mechanical structures. In 2007 he received annual award of Croatian Academy of Engineering „Rikard Podhorsky”.

He is a member of the Croatian Society of Mechanics, the Croatian Society for the theory of machines and mechanisms, and of the organizing committee of the International Conference on Structural Integrity and Durability & Summer School (ISCID)

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Željki Štihu, s kojim surađujem još od prvih godina zaposlenja. Vaše poznavanje osnova numeričkih proračuna, te tečajevi kojima ste me pripremili za upotrebu modernih proračunskih alata, temelj su bez kojeg ovaj rad ne bi bio moguć.*

*Zahvaljujem se mentoru Prof. dr. sc. Hinku Wolfu. Vaši konkretni stručni savjeti bili su velika pomoć u radu. Uz njih su analize i rezultati mehaničkih proračuna dobili novu dimenziju u očima elektrotehničke struke. Hvala na korisnim savjetima i razumijevanju.*

*Zahvaljujem se Prof. dr. sc. Stjepanu Caru, na korisnim savjetima i razumijevanju tijekom izrade disertacije. U Vama sam uvijek imao osobu kojoj sam se mogao obratiti u vezi s bilo kojim problemom, znajući da ću dobiti pomoć. Profesore, velika Vam hvala na svemu.*

*Puno hvala svim kolegama iz tvrtke KONČAR - Institut za elektrotehniku d.d.. Tu posebice moram istaknuti mag.sc. Marijana Boguta, Darka Šeremeta dipl.ing. i Milana Kovačevića ing. s kojima je bilo zadovoljstvo surađivati i od njih učiti. Te dodatno zahvaliti dr.sc. Stjepanu Tvoriću za savjete oko formalnih koraka u pripremi rada.*

*Hvala mojoj obitelji: majci Ružici, ocu Marijanu i baki Marici. Hvala vam što ste me uvijek podržavali. Bez vas ne bi bilo ove disertacije niti bilo kojeg mog uspjeha.*

*Nadasve, hvala supruzi Ivani, koja mi je pružala potporu i sa svojom vjerom u uspjeh dala dodatnu snagu. Hvala ti na strpljivosti i odricanjima koja si prošla zajedno sa mnom.*

*Posebnu zahvalnost dugujem ocu Marijanu, koji je najbolje iskusio sve muke izrade ove disertacije. Hvala na strpljenju, ohrabrenju koje si mi pružio i radovanju svakom mom uspjehu. A nadasve svim stručnim savjetima i pomoći kakvu može pružiti samo čovjek s dugogodišnjim iskustvom u struci i velikim poznavanjem električnih sinkronih generatora.*

## Sažetak

Češće promjene opterećenja, nesimetričnost opterećenja faza veća od standardima propisanih vrijednosti i mogućnost motorskog uz generatorski rad, neki su od postavljenih zahtjeva za suvremene sinkrone hidrogeneratore, a koji proizlaze iz potrebe za povećanjem dinamike regulacije energije. Ukoliko se pojave kakvi kvarovi u namotu tijekom eksploatacijski važnog perioda, pokušava se određeno vrijeme nastaviti rad uz takvo stanje ili uz neke brze privremene popravke kao što je odspajanje dijela namota, uslijed kojih dolazi do elektromagnetske nesimetrije generatora. Da bi strojevi mogli raditi u ovakvim, specifičnim stanjima, potrebno ih je projektirati na za to odgovarajući način. Mogućnost računske provjere rada generatora u nesimetričnom stanju i s različitim vrstama opterećenja stoga je od značajnog interesa. Uz povećanje gubitaka snage, nesimetrična radna stanja mogu biti popraćena i porastom iznosa vibracija te posljedično buke. Ovim radom pobliže su proučeni utjecaji električne nesimetrije na magnetske sile te njima uzrokovane vibracije električnog sinkronog stroja. Prikazana je veza između napona induciranih u mjernom svitku ispod zuba i radijalne sile koja djeluje na zub, raspodjela sila po zubima paketa statora te utjecaj promjene snage, faktora snage i različitih nesimetrija po fazama na ove sile. Prikazani su sastav harmonika vibracija paketa, njegova usporedba s harmonicima sila na zube te način na koji se ove sile i vibracije mijenjaju s promjenom opterećenja.

Kroz rad je predstavljena metodologija otkrivanja nesimetričnog opterećenja generatora s istaknutim polovima analizom magnetskog polja u zračnom rasporu. Ona se temelji na analizi napona induciranih u mjernim svitcima ugrađenim na zube statora po određenom rasporedu. Integracijom i kvadriranjem induciranih napona mjernih svitaka razmaknutih za pola polnog koraka i dvije trećine polnog koraka određeni su valni oblici radijalnih sila na zube, na osnovi čije razlike se utvrđuje postojanje nesimetrije. Usporedbom napona dijametralno postavljenih svitaka utvrđena je razlika stanja električne nesimetrije od ostalih vrsta poremećaja kao što su ekscentričnost rotora i kvar namota. Superpozicijom sila na zube generatora za segment stroja koji se elektromagnetski ponavlja po obodu, određena je ukupna radijalna magnetska sila na paket. Usporedbom frekvencijskog sastava izmjerenih akceleracija paketa s frekvencijskim spektrom radijalne sile paketa utvrđeni su elektromagnetski uzrokovani harmonici vibracija i odvojeni od mehanički uzrokovanih harmonika.

Za analizu stanja električne nesimetrije, najprije su izrađeni numerički 2D modeli generatora temeljeni na metodi konačnih elemenata (MKE) s ciljem izračuna magnetskih sila i njima uzrokovanih vibracija te provjere predložene metodologije za analizu napona mjernih svitaka i otkrivanje nesimetričnog opterećenja. Proračunima je dokazano da se magnetske sile i njima uzrokovane vibracije međusobno razlikuju za različita pogonska stanja te da je pomoću napona induciranih u mjernim svitcima moguće odrediti valne oblike koji se po harmonijskom sastavu poklapaju s radijalnom silom na pojedini zub. Utvrđeno je da se usporedbom ovih valnih oblika može otkriti i prepoznati nesimetrično električno opterećenje. Rezultati dobiveni MKE proračunima verificirani su mjerenjima u laboratoriju na sinkronom generatoru namijenjenom za napajanje različitih ispitivanih uređaja. Navedeni generator posebno je dorađen kako bi se moglo mjeriti vibracije izravno na statorskom paketu i magnetsko polje u zoni zračnog rasporeda.

Mjerenjem su potvrđeni rezultati numeričkih proračuna te je postignuto vrlo dobro slaganje istih. Analizom rezultata također su određeni optimalan raspored te broj potrebnih mjernih svitaka za otkrivanje nesimetričnih električnih opterećenja i ukupne radijalne magnetske sile koja djeluje na paket statora. Temeljem provedenih analiza i uočenih pravilnosti razvijen je algoritam kojim je moguće otkriti električno nesimetrično opterećenje i razlučiti ga od drugih mogućih uzroka magnetske nesimetrije u stroju. Algoritam omogućuje otkrivanje električne nesimetrije usporedbom valnih oblika napona induciranih u šest mjernih svitaka tijekom jednog punog okreta rotora. Razvijen je i algoritam pomoću kojeg se na osnovi napona mjernih svitaka određuje harmonijski sastav ukupne radijalne sile u promatranoj točki paketa, uspoređuju harmonici sile s harmonicima izmjerenih vibracija i utvrđuju dijelovi spektra vibracija uzrokovani elektromagnetskom pobudom. Prikazane metode za analizu radijalnih sila koje djeluju na zube statora i otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja moguće je koristiti kao dio ekspertnog sustava za nadzor i praćenje stanja sinkronog generatora.

**Ključne riječi:** sinkroni generator, nesimetrična opterećenja, mjerni svitak, magnetska indukcija, magnetske sile, vibracije, metoda konačnih elemenata, spregnuti proračuni

# **Coupling of Electromagnetic Forces and Vibrations of Synchronous Generator Stator Core**

## **Introduction**

Dynamics of today's energy grid increases the requirements placed upon operation of synchronous hydrogenerators. More frequent load changes, phase winding currents with higher asymmetries than proscribed by standards and the need to operate in motor and generator load conditions are examples of such demands. In some cases when winding fault of the machine occurs during the peak energy production period, operation is continued in such a state or shortly paused only to rapidly bypass faulted winding section and continue the production until a more suitable time for a proper repair. This kind of specific load condition can be safely maintained only if a generator was designed with such load operations in mind. Ability to analyze different asymmetric load conditions of the electric generator through calculations can therefore be of great interest. Asymmetric load conditions can lead to increased losses, vibrations and unwanted noise of the machine. This research deals with effects of electric asymmetries on the magnetic forces acting on the stator part of the synchronous generator and the vibrations caused by these forces. Effect of generator apparent power change, power factor changes, and load asymmetry change on force distribution over the stator teeth are investigated. Voltage induced within the measuring coils mounted on the stator teeth is also analyzed for these load conditions and connection between coil induced voltage and stator radial magnetic force is presented. Frequency spectrum of stator stack vibrations is compared with the frequency spectrum of magnetic forces acting upon the stator stack for different load states.

Methodology to detect asymmetric load condition of the salient pole generator based on the analyses of magnetic field within the machine air gap is presented. This detection is based on the analyses of the voltage induced within the measuring coils that are installed on the stator teeth in specific order. Through integration and squaring of the measured voltage signal a waveform of radial force acting upon the stator tooth is obtained. By comparing forces that act on the teeth mutually spaced for half of the pole pitch or two-thirds of the pole pitch, existence of electric asymmetry is determined. A method to distinguish electric load asymmetry from symmetric load condition is presented as well. Through superposition of forces acting on the teeth encompassed by the north pole part of the generator (i.e. characteristic circular section of the stator that is electromagnetically repeated over machine circumference) a total radial magnetic force acting on the stator stack is determined.



Through comparison of frequency spectrum of measured accelerations on the stator stack with radial force frequency spectrum of the stator stack the harmonics of vibrations induced by electromagnetic causes are isolated from the remaining vibration spectrum.

Radial forces that act on the teeth, voltages induced in measuring coils and stator stack vibrations were calculated for different electromagnetic conditions of the machine by means of finite element method (FEM) analyses. Calculation results gave insight on ways how forces and vibrations change with the type of electric load conditions and how asymmetric load conditions can be distinguished from symmetric loads, rotor eccentricity or faulted winding condition. These results have been verified through laboratory measurements on synchronous generator specifically prepared for this experimental research. Through measurement results it was also proved that harmonics of vibration caused by magnetic radial forces can be distinguished from mechanically induced vibrations. One of the future goals is that the new findings regarding the air gap magnetic field analysis are implemented in expert monitoring systems for rotating machines. Eventually, this means having an industrial application that achieves better asset management of the key electrical power equipment.

### **Proven methods of force and vibration calculation**

Most common causes of synchronous generator vibrations are listed in this chapter and existing methods for electric machine magnetic force and vibration calculation reviewed. Vibrations that can be caused by the design of machine active part, asymmetric load state, rotor eccentricity, bearings and some additional reasons like loose screws and unbalance of moving parts are shortly described.

Electromagnetic force and vibration calculation methods are divided into analytical and numerical methods based on finite element method described in some detail. Basic calculation principle of Maxwell stress tensor and Virtual work method for magnetic force calculation are presented, with the emphasis on the analyses of the forces acting within the electric machine. In the same manner the basics of FEM calculation of mechanical general motion equation are presented. Principle used for calculation of vibrations caused by forces acting on the stator core is described and the ability to determine potential vibration problem through comparison of stator eigen frequencies with force frequency spectrum.

## **Synchronous generator for experimental measurements and measuring equipment**

In this chapter synchronous generator used for experimental measurement and FEM calculations is described. To perform required laboratory measurements, the analyzed 3-phase synchronous generator was specially reworked. The main reason for this change was to enable vibration measurement directly on the stator core. Using the generator, several symmetrical and electrically asymmetrical load conditions were measured. Measurements were performed using methods and technical solutions otherwise implemented in rotating machine monitoring systems, with measuring equipment that is commonly used in testing and diagnosis of electric devices. The measurement system used during the experimental work consisted of analyzed object (synchronous generator), measuring sensors (coils installed on stator teeth and accelerometers placed on stator core and stator casing), regulated 3-phase resistor bank, regulated 3-phase induction coil and measuring laboratory unit. Embedded coils measure the induced inner voltage, due to the variable magnetic flux that flows through the coil. This voltage is used in further data processing and analysis in order to determine radial force on the stator teeth, and to detect generator electric load asymmetry. The measuring coils is designed in the PCB technique with geometric dimensions corresponding to the stator tooth of the analyzed motor. The following machine parameters were only monitored with laboratory measuring unit *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*: line voltages, phase currents and load reactive current. The following machine parameters were recorded with laboratory measuring unit *PULSE LAN-XI* for further data processing and analyses: induced voltage of measuring coils and voltage signals from accelerometers. An integral part of the laboratory unit is the software program *PULSE LabShop*. With this software the data processing of the measured acceleration values was performed. In the last subsection of this chapter, the measurement uncertainty is described and the procedure for determining the uncertainty of experimental measurement is shown. According to the relevant standard, the measurement uncertainty of the overall experimental measurement is determined to be  $\pm 16,75\%$ .

## **Magnetic force determined on the base of measuring coil induced voltage**

This chapter describes the methodology of magnetic radial force determination based on the induced voltage in measuring coil. Through means of integration and squaring of measuring coil induced voltage a waveform of radial force acting on stator tooth is derived. A method to determine frequency spectrum of the radial force acting on the entire stator core is presented.

To use suggested method, one needs to determine forces on all the teeth that are encompassed within the urpole part of the machine. The determined force frequency spectrum can then be used for comparison with measured vibration frequency spectrum to determine overlapping harmonics.

Also, a new method for asymmetric electric load detection is described, based on the comparison of maximum values of teeth radial forces determined via measuring coils. The three coils need to be installed on three equally spaced teeth of the machine that have the same absolute value of radial force when generator is operating in symmetric load conditions. When asymmetry occurs, these forces no longer share the same peak value. In order to distinguish electric load asymmetry situation from other asymmetries such as a broken rotor bar, short circuit of field winding or rotor eccentricity, a set of additional coils can be placed on the stator teeth that are located on the other end of the stator, compared to original three coils. If machine has even number of urpoles, diametrically opposite teeth share the same electromagnetic state. If the machine has the odd number of total urpoles, the distance in the number of the teeth between the original and the additional coils should be chosen as an integer multiplier of teeth encompassed by the machine urpole. If electric asymmetry is the cause of machine magnetic disturbance, then forces determined based on the opposing coils share the identical waveform.

### **Synchronous generator electromagnetic analysis by FEM method**

This chapter describes FEM simulations that were conducted on the motor model designed in commercial software *ANSYS Electronics Desktop* and *ANSYS Mechanical*. Modal analysis was performed through mechanical 2D FEM calculation model comprising of the stator core and the stator casing machine middle part cross-section. Modal frequencies of the stator stack were detected, and their corresponding forms depicted within the frequency spectrum of 13 kHz.

FEM calculations were initially performed for symmetrical load operation situations. Afterwards, using the same FEM model but with modifications to the outer electric circuit, asymmetric load states were simulated. Conducted analysis showed that different load states result in different waveforms of radial forces and stator stack vibrations. It was noted that increase in amplitude values of radial forces leads to the increase of the vibration intensity. Calculation results also showed that when comparing symmetric and asymmetric load conditions of the same power level or of the same currents passing through the armature winding, higher forces and vibrations occur when asymmetry is present. Situations of eccentric rotor and field winding fault were also analyzed through comparison of stator teeth forces. It was shown that asymmetric load condition can be distinguished from other types of generator irregular states.

## **Synchronous generator measurement results**

For the purpose of FEM results verification, it was necessary to perform experimental measurement on the modified synchronous generator. Bump test measurements were performed first, to determine modal frequencies of the generator. Test results verified the mechanical calculation model modal frequency values. Following were the measurements in steady state symmetrical load conditions, and measurements performed for electrically asymmetric load conditions. Measurement results of the measuring coils verified the results that were obtained by the electromagnetic FEM calculations. Frequency spectrum of measured vibration results verified FEM calculations and vibration dependence on magnetic forces acting within the machine. Accelerometer output was additionally measured for a case of electrically non excited mechanical rotor spin. These results showed that some additional vibrations, not caused by the electromagnetic state of generator, are present on the real machine.

## **Comparison of the results obtained by FEM and measurement**

In this chapter, the comparison between calculated and measured results was performed. First, the induced voltages of the measuring coils were compared, then the radial forces determined through processing of these voltages. Finally, vibration measuring results on the outer diameter of stator core were compared.

Comparison of measuring coil induced voltages and radial forces of teeth showed good alignment for the analyzed symmetrical and asymmetrical load conditions. In both measured and calculated case, asymmetric load condition could be determined through comparison of radial force peak values of teeth that are mutually spaced for one half of the pole pitch. Overlap of measured and calculated vibration frequency spectrum proved that electromagnetically caused harmonics of vibration can be distinguished from mechanically caused vibration. Electromagnetically caused vibration harmonics were affected by load changes in the same manner for both the measured and calculated results.

### **Algorithm for recognition of asymmetric electric load of synchronous generator through the means of measuring coils**

This chapter describes the algorithm and the methodology for recognition of asymmetric load condition of the synchronous generator. The input parameters for the proposed algorithm are induced voltages in three measuring coils spatially spaced for two thirds of the pole pitch, and additional three counterpart coils placed on the teeth that are in opposing position to original three. The first part of the algorithm determines peak radial force values of the three coils and compares these numbers. Based on the peak value difference the asymmetry occurrence is flagged. Second part of the algorithm compares induced voltages of measuring coils placed on opposite stator teeth. If these values do not differ for more than what is allowed by measuring uncertainty, a flag is activated signaling that the asymmetry in question is caused by asymmetric load condition. Otherwise, a disturbance other than the load asymmetry is signaled. In all three cases algorithm gives output result with the corresponding message. The proposed algorithm is designed in the *Octave* software.

### **Algorithm for determination of electromagnetically caused harmonics of vibration of synchronous generator**

This chapter describes the algorithm and the methodology to distinguish the electromagnetically caused harmonics within the vibration frequency spectrum of the synchronous generator, based on the analyses of radial forces acting on stator teeth.

This algorithm comprises of measuring coil induced voltage determination across the urpole region of the generator teeth, processing of these voltages through integration and squaring to get the appropriate stator teeth radial forces, superposition of these forces to get the total magnetic force that effects the yoke of the stator core, frequency spectrum determination of this force, comparison of distinguished harmonics between force and vibration frequency spectrum and determination of frequencies where vibration harmonics coincide with magnetic force harmonics. Based on the FEM force calculations and vibration measurements, the goal of a functional algorithm for determination of electromagnetically caused vibration harmonics was achieved. Chapter presents and describes the proposed algorithm through the flowchart and explanations of the code that was written in the *Octave* software and added as the appendix of the document.

## Conclusion

Within this dissertation a calculation and analysis of magnetic forces and vibrations caused by their effect were analyzed on the example of the synchronous salient pole generator. Effects of power level, power factor level and load asymmetry change were investigated. Distribution of radial magnetic forces acting on stator teeth was presented for different load situations and their correlation to stator stack vibrations were shown. The methodology used for stator teeth force determination that is based on the analyses of voltages induced in the measuring coils placed on the radial surfaces of the stator teeth was elaborated. This procedure includes integration and squaring of measuring coil voltage that is induced in the coil due to magnetic field changes within the machine air-gap region. By superimposing radial forces of teeth located within the urpole region of the machine, and performing fast Fourier transform a frequency spectrum of total radial force acting on the stator yoke is determined. Through comparison of frequency spectrum of measured accelerations with radial force frequency spectrum of the stator stack the harmonics of vibrations induced by electromagnetic causes are distinguished from the rest of vibration spectrum.

The methodology for asymmetric electric load detection, based on the analyses of measuring coil induced voltages that are installed on the stator teeth, was presented. The procedure requires the use of three coils mutually spaced for two thirds of a pole pitch. A procedure that uses only two measuring coils mutually spaced for half of the pole pitch has also been considered but proven to have unreliable recognition threshold. The detection procedure includes measurement of induced voltages of measuring coils and comparison of peak radial force values obtained through measured voltages. Asymmetry is determined based on the difference of the peak force values. For the purpose of distinguishing electric load asymmetry from rotor eccentricity and winding faults, additional coils need to be added, on the diametrically opposite side to the original three coils. Matching of voltages of the coils placed on the opposite stator teeth proves that machine has no asymmetries other than that of the electric load.

Calculations have been conducted by FEM to investigate asymmetric load conditions effect on stator core forces and vibrations. To confirm the thesis and verify FEM results, the corresponding measurements in the laboratory have been performed. Results confirmed that the stator yoke force determination methodology can be functionally implemented only if measuring coils are placed on every tooth of the urpole machine region. Calculations and measurements confirmed that asymmetric load detection methodology can be reliably implemented if 6 measuring coils are used.

Conducted analyses proved that measuring coils placed within the air-gap region of the machine can be used to determine magnetic forces acting upon stator teeth of the machine, and that these results can be used to determine harmonic spectrum of the force acting on the stator core. It was also proven that forces calculated in this manner can be used as input for mechanical vibration calculation. This represents the first scientific contribution of this work.

The second scientific contribution are new insights of how asymmetric load conditions effect radial magnetic forces and vibrations of the stator core of synchronous generator. Analysis conducted using coupled electromagnetic and mechanical calculations showed how different load states effect waveforms of radial forces and stator stack vibrations. It was proven that forces and vibrations share mutual harmonics in their frequency spectrum, and that electromagnetically caused harmonics of vibrations can be distinguished from the rest of the vibration spectrum. It was proven that the increase in amplitude value of specific radial force harmonics leads to the corresponding harmonics increase of vibrations. Calculation results also showed that when comparing symmetric and asymmetric load conditions of the same power level or of the same currents passing through the armature winding, higher forces and vibrations occur when asymmetry is present. Comparison with measurements proved that calculated results match those of the real generator.

The third scientific contribution is related to the design of the algorithm for determination of electromagnetically caused vibration harmonics and algorithm for asymmetric load recognition of synchronous generator based on the analyses of the voltage induced in the measuring coils. Methods, which are based on the analyses of induced voltage of measuring coils, have previously shown its usefulness and reliability in other types of machine analyses like fault detection systems. Presented methods of force analyses can be implemented in such expert monitoring systems for rotating machines.

**Keywords:** salient pole generator, unbalanced load condition, measuring coil, induced voltage, magnetic force, vibrations, finite element method, coupled simulations

## Sadržaj

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Uvod .....                                                                            | 1  |
| 2. Uobičajene metode izračuna sila i vibracija .....                                     | 3  |
| 2.1. Uzroci vibracija.....                                                               | 4  |
| 2.1.1. Izvedba aktivnog dijela stroja .....                                              | 4  |
| 2.1.2. Nesimetrično stanje opterećenja .....                                             | 5  |
| 2.1.3. Ekscentričnost rotora kao uzrok vibracija .....                                   | 7  |
| 2.1.4. Vibracije uzrokovane ležajevima.....                                              | 9  |
| 2.1.5. Ostali uzroci vibracija.....                                                      | 10 |
| 2.2 Metode izračuna sila i vibracija.....                                                | 11 |
| 2.2.1. Analitički proračuni .....                                                        | 12 |
| 2.2.2. Numerički proračuni metodom konačnih elemenata .....                              | 13 |
| 2.2.3. Određivanje magnetskih sila metodom konačnih elemenata .....                      | 14 |
| 2.2.4. Vibracije uzrokovane magnetskim silama .....                                      | 18 |
| 3. Sinkroni generator za eksperimentalna mjerenja i mjerna oprema .....                  | 23 |
| 3.1. Sinkroni generator – objekt mjerenja.....                                           | 23 |
| 3.2. Mjerna oprema .....                                                                 | 30 |
| 3.2.1. Mjerni svitak.....                                                                | 32 |
| 3.2.2. Akcelerometar .....                                                               | 34 |
| 3.2.2. Senzor brzine pomaka .....                                                        | 37 |
| 3.2.2. Impulsni čekić.....                                                               | 39 |
| 3.2.3. Akvizicijska mjerna stanica .....                                                 | 40 |
| 3.2.4. Analizator snage.....                                                             | 42 |
| 3.2.4. Mjerna nesigurnost.....                                                           | 43 |
| 4. Magnetske sile i inducirani napon mjernih svitaka .....                               | 46 |
| 4.1. Odnos magnetske indukcije mjernog svitka i radijalne sile koja djeluje na zub ..... | 49 |
| 4.2. Detekcija nesimetričnog opterećenja upotrebom mjernih svitaka .....                 | 54 |
| 5. Proračuni generatora metodom konačnih elemenata .....                                 | 63 |
| 5.1. Izrada simulacijskog modela.....                                                    | 64 |
| 5.1.1. Model za elektromagnetske proračune.....                                          | 64 |
| 5.1.2. Model za mehaničke proračune.....                                                 | 68 |
| 5.1.3. Povezivanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna .....                        | 70 |
| 5.2. Rezultati elektromagnetskih proračuna za simetrično stanje .....                    | 74 |



|                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.1. Utjecaj povećanja snage na magnetske sile .....                                                                                                    | 80  |
| 5.2.2. Utjecaj promjene faktora snage na magnetske sile .....                                                                                             | 83  |
| 5.2.3. Odnos između magnetske sile i napona mjernog svitka .....                                                                                          | 88  |
| 5.3. Analiza utjecaja električki nesimetričnog opterećenja na magnetske sile i inducirane napone u mjernim svitcima određene numeričkim proračunima ..... | 91  |
| 5.3.1. Utjecaj povećanja snage na sile zubi pri nesimetričnom opterećenju .....                                                                           | 92  |
| 5.3.2. Utjecaj promjene faktora snage na iznos sile.....                                                                                                  | 95  |
| 5.3.3. Utjecaj promjene aktivnih faza na raspored sile po zubima .....                                                                                    | 99  |
| 5.3.4. Utvrđivanje nesimetričnog opterećenja analizom induciranih napona mjernih svitaka...                                                               | 106 |
| 5.3.5. Manje električne nesimetrije .....                                                                                                                 | 109 |
| 5.3.5. Magnetske sile koje djeluju na zube u slučaju drugačijih vrsta poremećaja .....                                                                    | 112 |
| 5.4. Izračun vlastitih frekvencija statora .....                                                                                                          | 116 |
| 5.5. Rezultati mehaničkih proračuna za simetrična opterećenja generatora.....                                                                             | 119 |
| 5.6. Rezultati mehaničkih proračuna za nesimetrična radna stanja generatora .....                                                                         | 126 |
| 6. Rezultati mjerenja na generatoru .....                                                                                                                 | 132 |
| 6.1. Mjerenje vlastitih frekvencija .....                                                                                                                 | 137 |
| 6.2. Mjerenje električnih veličina za simetrična opterećenja.....                                                                                         | 141 |
| 6.3. Mjerenje vibracija za simetrična opterećenja .....                                                                                                   | 146 |
| 6.4. Mjerenje električnih veličina za nesimetrična opterećenja .....                                                                                      | 151 |
| 6.5. Mjerenje vibracija za nesimetrična opterećenja .....                                                                                                 | 157 |
| 7. Usporedba rezultata određenih proračunima i mjerenjima .....                                                                                           | 161 |
| 7.1 Usporedba vlastitih frekvencija statora generatora određenih proračunom i mjerenjem .....                                                             | 161 |
| 7.2 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za stanje praznog hoda .....                                                                                 | 162 |
| 7.3 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za stanje simetričnog opterećenja .....                                                                      | 167 |
| 7.4 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za stanje nesimetričnog opterećenja .....                                                                    | 173 |
| 8. Algoritam za prepoznavanje nesimetričnog električnog opterećenja generatora analizom induciranih napona u mjernim svitcima .....                       | 180 |
| 8.1 Svojstvene karakteristike električnog nesimetričnog opterećenja .....                                                                                 | 180 |
| 8.2 Algoritam za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja sinkronog generatora .....                                                              | 182 |
| 8.2.1. Dio 1. Određivanje radijalnih magnetskih sila analizom napona 6 mjernih svitaka .....                                                              | 184 |
| 8.2.2. Dio 2. Usporedba sila koje djeluju na zube .....                                                                                                   | 186 |
| 9. Algoritam za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih od mehanički uzrokovanih harmonika vibracija.....                                               | 190 |
| 9.1. Mogućnost usporedbe frekvencijskog sastava sila i vibracija paketa statora .....                                                                     | 190 |

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1.1. Harmonijski sastav sile na paket statora.....                                                                                                            | 191 |
| 9.1.2. Usporedba sastava magnetske sile i vibracija paketa statora.....                                                                                         | 199 |
| 9.2 Algoritam za razlučivanje harmonika vibracija uzrokovanih elektromagnetskim silama .....                                                                    | 201 |
| 9.2.1. Određivanje radijalnih magnetskih sila za slučaj praznog hoda generatora .....                                                                           | 203 |
| 9.2.2. Određivanje ukupne radijalne sile u smjeru pozicije akcelerometra .....                                                                                  | 204 |
| 9.2.3. Raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih magnetskom radijalnim silama .....                                                                         | 208 |
| 9.3. Poteškoće određivanja spektra harmonika magnetske sile paketa statora mjerenjem .....                                                                      | 213 |
| 10. Zaključak.....                                                                                                                                              | 214 |
| 11. Literatura.....                                                                                                                                             | 217 |
| Popis oznaka .....                                                                                                                                              | 222 |
| Popis slika .....                                                                                                                                               | 230 |
| Popis tablica .....                                                                                                                                             | 238 |
| Prilog A1: Kôd algoritma za izračun radijalnih sila koje djeluju na zube generatora obradom induciranih napona 6 mjernih svitaka .....                          | 240 |
| Prilog A2: Kôd algoritma za utvrđivanje električne nesimetrije analizom radijalnih sila koje djeluju na zube međusobno razmaknute za $\frac{2}{3} \tau_p$ ..... | 241 |
| Prilog B1.1: Kôd algoritma za izračun sila na zube obuhvaćene prapolom generatora obradom induciranih napona mjernih svitaka .....                              | 242 |
| Prilog B1.2: Kôd algoritma za izračun sila na zube obuhvaćene prapolom generatora za slučaj praznog hoda .....                                                  | 243 |
| Prilog B2: Kôd algoritma za određivanje sile koja djeluje na odabrano mjesto vanjskog oboda paketa statora vektorskim zbrajanjem radijalnih sila zubi .....     | 245 |
| Prilog B3: Kôd algoritma za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih harmonika od mehanički uzrokovanih harmonika iz spektra vibracija.....                    | 247 |
| Životopis.....                                                                                                                                                  | 249 |
| Popis objavljenih radova .....                                                                                                                                  | 250 |
| Biography .....                                                                                                                                                 | 252 |

## **1. Uvod**

Izvedba električnog sinkronog generatora određuje njegovu pouzdanost u radu, životni vijek i kvalitetu proizvedene energije. Ovo posebice dolazi do izražaja u suvremenim elektroenergetskim sustavima, kod kojih se dio energije proizvodi u obnovljivim izvorima kao što su solarne elektrane i vjetroelektrane. Kako proizvodnja ovakvih elektrana ovisi o vremenskim uvjetima, radi postizanje stabilne opskrbe energijom mijenja se i način upravljanja generatorima u klasičnim elektranama. Češće promjene opterećenja, a time i izloženost većim termičkim naprezanjima, nesimetričnost opterećenja faza veća od standardima propisanih vrijednosti [1, 2], mogućnost motorskog uz generatorski rad, neki su od tenderskih zahtjeva za suvremene sinkrone hidrogeneratore, a koji proizlaze iz potreba za povećanjem dinamike regulacije energije.

Kontinuirani rad uz nesimetrično električno opterećenje, osim kod klasičnih generatora, može biti zahtjev i za strojeve posebne namjene. Na primjer, u ispitnim stanicama može postojati potreba za napajanje trofaznih i jednofaznih potrošača. Takav primjer su ispitne stanice transformatora. Kada se trofazni generator koristi za ispitivanja jednofaznih transformatora, kroz njegove fazne namote teku bitno različite struje.

Pri nesimetričnim opterećenjima javljaju se pulsacije magnetskog polja dvostruko veće frekvencije od nazivne frekvencije napona. Oscilacije protjecanja uzrokuju promjene magnetske indukcije u zračnom rasporu, što dovodi do oscilacija elektromagnetskih (EM) sila koje djeluju unutar električnog stroja. Ovo dalje dovodi do pojačanih vibracija.

Da bi se osigurala dobra pogonska svojstva stroja, potrebno je što bolje poznavati elektromagnetske prilike koje na njih utječu. Stoga se osim klasičnih analitičkih proračuna [3-5], upotrebljavaju i složeniji postupci kao što su proračuni upotrebom metode konačnih elemenata (MKE) [6-24]. Analiza metodom konačnih elemenata omogućuje određivanje elektromagnetskih prilika u svakom segmentu stroja, pa time i proučavanje efekata kao što su lokalna magnetska zasićenja materijala te prostorna promjena magnetske indukcije uslijed električne ili geometrijske nesimetrije. Iz tog razloga MKE analiza pogodna je i za određivanje sila nastalih međudjelovanjem statorskog i rotorskog magnetskog polja u stroju.

Razvoj računala omogućio je primjenu MKE proračuna kojima se mogu simulirati dinamičke elektromagnetske pojave uz prisustvo mehaničkog gibanja. Takva izvodljivost proračuna potaknula je proučavanje sila koje se javljaju prilikom rada električnog stroja.

Analiza sila nastalih ekscentričnim rotacijskim gibanjem prvotno je proučavana na asinkronim motorima [8-11]. Budući da je radna točka asinkronog motora određena armaturnim

naponom  $U$ , frekvencijom  $f$  tog napona i momentom tereta  $M_t$  (veličine koje se mogu zadati kao ulazni podaci MKE proračuna), dinamička simulacija konvergira upravo u traženu radnu točku. Nakon njenog uspješnog izračuna moguće je analizirati elektromagnetske sile [12-18], vibracije [19-22] i buku [23] koje nastaju u radu električnog stroja. Radna točka sinkronog generatora određena je iznosima armaturnog napona  $U$ , armaturne struje  $I$ , te njihovim međusobnim faznim pomakom  $\varphi$ . Budući da MKE proračunom nije moguće istovremeno zadavanje iznosa napona i struje armaturnog namota (jedna od tih veličina mora biti izlazna), izračun elektromagnetskog stanja sinkronog generatora za željenu radnu točku složeniji je nego u slučaju asinkronog motora. Za rješavanje ovog problema pogodan je iterativni postupak [24].

Teorijska razmatranja u disertaciji, bazirana na elektromagnetskom proračunu, provedena su pomoću komercijalnog programskog paketa *ANSYS Maxwell*. U njemu su izrađeni proračunski modeli sinkronog generatora s istaknutim polovima za simulaciju električki simetričnog i nesimetričnog opterećenja sinkronog generatora. Upotrebom programskog paketa *ANSYS Mechanical* provedeni su mehanički proračuni za analizu vlastitih frekvencija statora i vibracija nastalih uslijed elektromagnetskih sila koje djeluju na stator generatora. Pri tome je zanemaren utjecaj vlastitih frekvencija rotora i mogući prijenos vibracija rotora na stator preko ležajeva. Eksperimentalna mjerenja izvedena su na stvarnom stroju radi potvrde rezultata numeričkog proračuna.

Cilj rada su doprinosi na:

- metodologiji sprege numeričkog proračuna magnetskog polja i numeričkog proračuna vibracija statorskog paketa sinkronog generatora temeljem proračuna magnetskih sila, što je opisano poglavljima 4 i 5,
- analizi utjecaja magnetskih sila na prirodu vibracija statorskog paketa sinkronog generatora pomoću rezultata svezanih numeričkih proračuna, u slučajevima simetričnih i nesimetričnih pogonskih stanja sinkronog stroja opisanih poglavljima 5, 6 i 7,
- razrada postupaka za razlučivanje elektromagnetskih uzroka vibracija sinkronog generatora iz mjerenja vibracija statorskog paketa i mjerenja magnetskih polja u zračnom rasporu opisanih poglavljima 8 i 9.

## **2. Uobičajene metode izračuna sila i vibracija**

Sinkroni strojevi imaju nekoliko različitih uloga. Najviše se koriste kao generatori za proizvodnju električne energije. No također, mogu se koristiti i kao motori, kompenzatori jalove energije ili strojevi posebne namjene. Bez obzira kakva uloga sinkronog stroja bila, zahtjevi za radnim mogućnostima ovih strojeva rastu.

Primjerice, od motor-generatora u reverzibilnim hidroelektranama, namijenjenim skladištenju energije proizvedene vjetrom ili suncem, zahtijeva se mogućnost čestih promjena opterećenja. Također, za generatore koji se nalaze izolirani od ostatka mreže (daleko od potrošača i ostalih elektrana ili u otočnom radu) zahtijeva se mogućnost nesimetričnog opterećenja faza i do 20 %.

Zbog gubitaka u proizvodnji, do kojih dolazi zbog višetjednog stajanja generatora prilikom remonta, dugotrajni popravci planiraju se u vrijeme niske razine vode (mala proizvodnja). Ukoliko se pojave kvarovi u namotu tijekom eksploatacijski važnog perioda, pokušava se nastaviti rad uz neke brze popravke (primjerice odspajanje dijela namota generatora). U takvim situacijama generator radi u električki nesimetričnom stanju.

Da bi strojevi mogli raditi u ovakvim specifičnim pogonskim stanjima, treba ih projektirati na za to odgovarajući način. Mogućnost računske provjere rada generatora u nesimetričnom stanju i s različitim opterećenjima stoga je značajna.

Strojevi koji služe za proizvodnju električne energije spadaju u kategoriju kritičnih strojeva. Zadatak im je proizvodnja električne energije prema zahtjevima koje postavlja elektroenergetski sustav, odnosno trenutna potreba za električnom energijom. Kako bi se udovoljilo povećanim zahtjevima tržišta energije, generatori sve više rade u nepovoljnim pogonskim stanjima, čime se smanjuje njihov životni vijek i povećavaju troškovi održavanja.

Nesimetrija uzrokovana različitim električnim opterećenjem po fazama stroja, ekscentričnim položajem rotora u odnosu na stator ili kvarom namota dovodi do promjene elektromagnetskih sila koje se javljaju u aktivnim dijelovima električki uzbuđenog stroja. To najčešće znači povećanje iznosa ovih sila i pojavu dodatnih harmonika u njihovom frekvencijskom sastavu. Navedene promjene povećavaju vibracije paketa i kućišta statora električnog stroja.

## **2.1. Uzroci vibracija**

Vibracije koje se pojavljuju u električnim rotacijskim strojevima mogu se podijeliti prema prirodi njihovog nastajanja na mehaničke i elektromagnetske. Mehanički uzroci obično su vezani uz konstrukcijske dijelove stroja (vratilo, ležajevi, ventilatori i dr.), dok su elektromagnetski uzroci najčešće povezani s aktivnim dijelovima stroja, u kojima nastaje elektromagnetska pretvorba energije, a karakterizira ih magnetska pobudna sila. U nastavku je dan kratki pregled najčešćih uzroka vibracija.

### **2.1.1. Izvedba aktivnog dijela stroja**

Magnetske sile kod električnih strojeva u najvećoj mjeri uzrokuju naprezanja i vibracije. Magnetostruktura se uslijed zanemarivog utjecaja na vibracije uglavnom ni ne razmatra. Ukoliko frekvencije nastalih vibracija spadaju u čujno područje (od 16 Hz do 20 kHz), kao posljedica sila može se pojaviti buka.

Ukoliko se neka vlastita frekvencija aktivnih dijelova stroja poklopi s frekvencijom pobudne sile dolazi do rezonancije, kod koje sila malog iznosa može uzrokovati značajne vibracije. Iz navedenog razloga potrebno je poznavati frekvencijski spektar magnetskih sila koje se javljaju u stroju te mehanička svojstva konstrukcije na koju one utječu.

Sljedeća geometrijska svojstva aktivnih dijelova stroja mogu imati utjecaj na frekvencijski spektar i iznos elektromagnetskih sila te njima uzrokovan mehanički odziv:

- međusobni odnos broja utora statora  $N_2$ , polova rotora  $2p$  i broja faza  $m$  (broj utora po polu  $Q$  te broj utora po polu i fazi  $q$ );
- geometrija polova (oblik i dimenzije polne papuče);
- geometrija utora statora (oblik utora, veličina otvora utora);
- topologija prigušnog namota (broj i oblik utora, korak štapova, raspored po obodu polne papuče);
- izvedba armaturnog (statorskog) namota (broj faza, broj slojeva namota, korak namota, skraćanje koraka, broj i prostorni raspored paralelnih grana);
- zaklinjenje utora magnetskim klinovima;
- skošenje polova ili utora;
- veličina zračnog raspora;
- geometrijske nesimetrije (nesavršena okruglost provrta statora i oboda rotora);

- dimenzije ključnih presjeka (visina jarma statora, visina i širina zuba statora, visina i širina polne papuče);
- način učvršćenja statorskog paketa u kućištu;
- raspored rashladnih kanala (radijalnih ili aksijalnih);
- prigušni čimbenici (impregnacijski postupak, debljina magnetskih limova, interlaminacijski premazi, upotreba viskoelastičnih materijala)

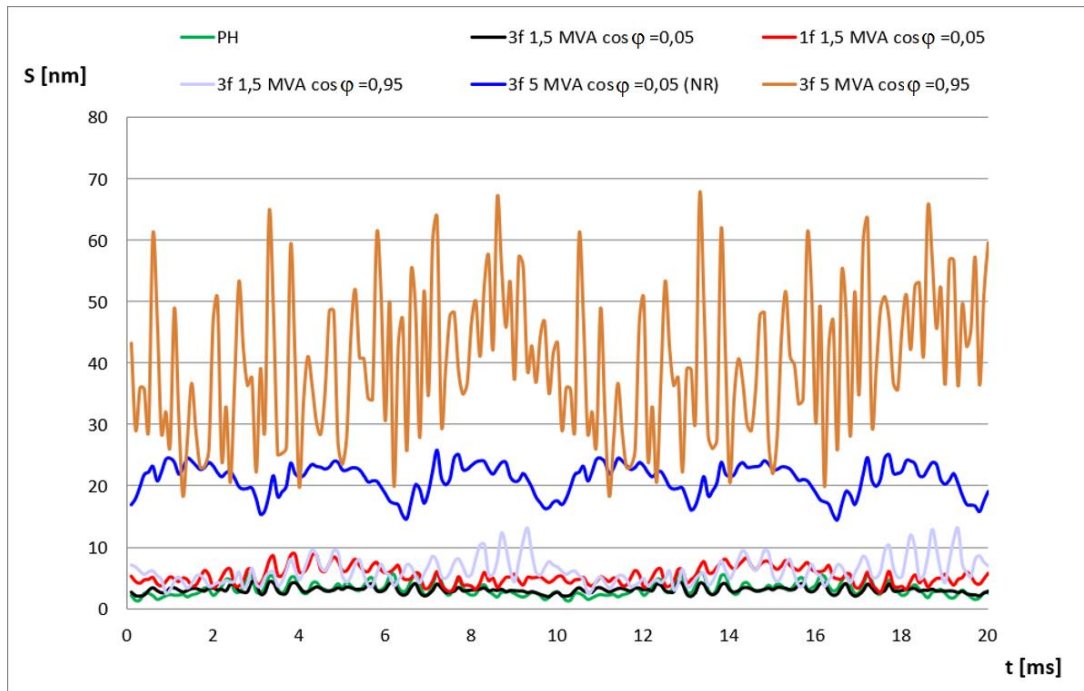
### **2.1.2. Električki nesimetrična opterećenja**

Tradicionalni pristup projektiranju električnih generatora podrazumijeva provedbu računskih analiza za stanja praznog hoda, kratkog spoja i karakteristična simetrična opterećenja. Međutim, u novije vrijeme zahtjevi na radne karakteristike električnih strojeva počeli su se značajno mijenjati:

- u proizvodnji električne energije pojavljuju se energetske pretvarače upravljani električni strojevi promjenjive brzine vrtnje (vjetrogeneratori, male hidroelektrane, dvostrano hranjeni motor-generatori za reverzibilne hidroelektrane);
- od generatora za klasične elektrane zahtjeva se siguran rad uz nesimetrično opterećenja faza do 20 %;
- u slučaju strojeva posebne namjene (kućni generatori za nuklearne elektrane, generatori za ispitne stranice) zahtjeva se mogućnost trajnog rada s jednofaznim teretom.

Magnetske sile i njima uzrokovane vibracije u uvjetima različitih električnih opterećenja mogu se međusobno značajno razlikovati. Slikom 2.1 usporedno su prikazane vibracije u jednoj točki vanjskog promjera paketa statora sinkronog generatora za šest različitih pogonskih stanja. Moguće je uočiti kako se za prikazana radna stanja vibracije međusobno razlikuju po srednjoj i vršnoj vrijednosti te valnom obliku.

Pri radu s pretvaračem, struje kroz namote osim osnovnog harmonika mogu sadržavati i značajne više harmonike zbog kojih raste opasnost od pojave rezonantnih vibracija i buke.



Slika 2.1 Radijalni vibracijski pomaci paketa statora za različita pogonska stanja električnog stroja

Kada je stroj simetrično opterećen, trofazni izmjenični sinusni sustav struja, međusobno fazno pomaknutih za  $120^\circ$  el., formira okretno polje konstantne amplitude. To polje okreće se u smjeru mehaničke vrtnje rotora te ga stoga nazivamo direktnim poljem, a u dvoosnom d-q rotirajućem sustavu struju koja reprezentira to polje zovemo strujom u d-osi.

U uvjetima rada na jednofazni teret, struje triju faza nemaju istu amplitudu niti međusobni fazni pomak od  $120^\circ$  el. (slika 2.2) pa to opterećenje nazivamo nesimetričnim. Ukoliko se takav nesimetrični trofazni sustav struja upotrebom Parkovih transformacija rastavi na rotirajući dvoosni sustav, moguće je vidjeti da uz direktnu, postoji i inverzna komponenta struje. Za razmatrani slučaj dvofaznog opterećenja, računskom provjerom na osnovi vektorskog dijagrama moguće je odrediti da amplituda inverzne komponente iznosi 33 % vrijednosti amplitude struje u direktnoj osi.

Inverzna komponenta protjecanja superponira se na direktno protjecanje, što rezultira pulsirajućim protjecanjem. Uz frekvenciju oscilacija dva puta veću od nazivne frekvencije mreže ( $f = 2 \cdot f_n$ ) rezultatnom protjecanju  $\Theta$  sinusno se mijenja amplituda u intervalu  $1,3 \cdot \Theta_n - 0,7 \cdot \Theta_n$ , gdje je s  $\Theta_n$  označena nazivna vrijednost protjecanja.

Oscilacije protjecanja uzrokuju oscilacije magnetske indukcije u zračnom rasporu, što dovodi do oscilacija magnetskih sila unutar električnog stroja te zbog toga i do pojačanih vibracija statora.





Slika 2.2 Fazne struje generatora s namotom spojenim u zvijezdu pri radu na jednofazni teret

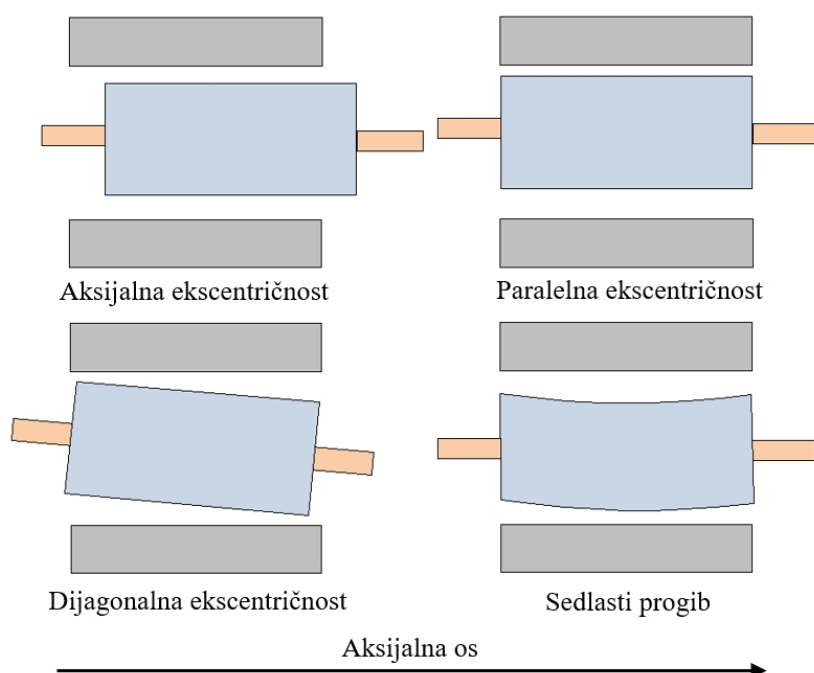
### 2.1.3. Ekscentričnost rotora kao uzrok vibracija

Proučavanje magnetskih sila električnog stroja posebno je zanimljivo za slučajeve vrtnje kod kojih obod rotora nije jednoliko udaljen od unutarnjeg promjera (provrt) statora. Takvo stanje, koje se naziva ekscentričnim, može biti uzrokovano greškom pri montaži (loše centriran rotor), mehaničkim deformacijama stroja (sedlasti progib vratila) ili stanjem ležajeva.

U svakom od tih slučajeva elektromagnetske prilike u zračnom rasporu stroja postaju nesimetrične, pa time dolazi i do neravnomjerne raspodjele magnetskih sila. To se posebice odnosi na radialnu komponentu sile  $F_r$ , koja je najveća na mjestu najmanjeg zračnog raspora. Budući da iznos ove sile raste sa smanjenjem zračnog raspora [5], ona dodatno doprinosi povećanju ekscentričnosti te tako i većem naprezanju materijala. To može uzrokovati nestabilno gibanje rotora, pa čak i njegov mehanički kontakt sa statorom [3, 4].

Ekscentričnost rotora može se opisati položajem i vrstom gibanja rotora u odnosu na stator.

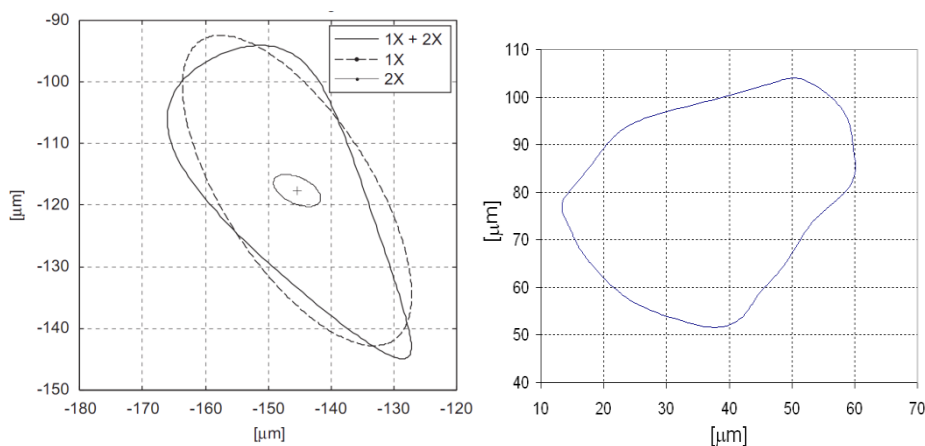
- Položaj rotora u odnosu na stator: aksijalni, paralelni i dijagonalni pomak osi rotora, te sedlasti progib vratila (slika 2.3)
- Vrsta gibanja aksijalne osi rotora: statička i dinamička ekscentričnost.



Slika 2.3 Vrste ekscentričnog pomaka rotora [26]

Paralelni pomak rotora predstavlja jednostavniji slučaj ekscentričnosti, budući da elektromagnetske prilike duž aksijalnog smjera statora ostaju nepromijenjene. Stoga je magnetske sile moguće odrediti 2D MKE proračunom. Kod dijagonalnog pomaka i sedlastog progiba mijenjaju se elektromagnetske prilike duž aksijalnog smjera, pa je za njihovo proučavanje potreban 3D model ili niz međusobno povezanih 2D modela kojima se simulirani stroj dijeli na nekoliko aksijalnih segmenata (tzv. '2,5D' ili 'multi-slice' modeliranje) [6, 9].

Statička ekscentričnost je gibanje kod kojeg se rotor stroja vrti, dok točka najmanjeg zračnog raspora, tj. položaj centralne aksijalne osi rotora, miruje u prostoru. Ovakva situacija simulira se jednako lako kao i slučaj savršeno centriranog rotora, budući da ne zahtijeva dodatne izračune ni posebne postavke MKE modela.



Slika 2.4 Eliptična i ovalna (lijevo) [6] te putanja proizvoljnog oblika (desno) aksijalne osi rotora [18]

Ukoliko aksijalna os rotora ne miruje, njeno gibanje može se opisati gibanjem po kružnici [4, 11], ovalnim gibanjem (slika 2.4 lijevo) [6], ili putanjom proizvoljnog oblika [8, 12, 18] (slika 2.4 desno).

U stvarnosti, određena razina statičke i dinamičke ekscentričnosti uvijek je prisutna. Dopusštena razina ekscentričnosti prema dostupnim istraživanjima iznosi do 10 % veličine zračnog rasporeda stroja [26].

#### 2.1.4. Vibracije uzrokovane ležajevima

Većina električnih strojeva koristi klizne ili kotrljajuće ležajeve. Kotrljajući ležajevi sastoje se od unutarnjega i vanjskog prstena te niza valjnih tijela (npr. kuglica ili valjaka) smještenih u odgovarajuću kliznu stazu, koji rotiraju unutar tih prstena [52].

Oštećenja dijelova ležaja dovode do vibracija na specifičnim frekvencijama koje su funkcija geometrije ležaja i prikazane su sljedećim izrazima [52, 53]:

- za oštećenje vanjske staze prstena:

$$f_v = \frac{N_k}{2} f_r \left[ 1 - \frac{b_d \cos(\beta)}{d_p} \right] \text{ Hz}, \quad (2.1)$$

- za oštećenje unutarnje staze prstena:

$$f_v = \frac{N_k}{2} f_r \left[ 1 + \frac{b_d \cos(\beta)}{d_p} \right] \text{ Hz}, \quad (2.2)$$

- za oštećenje valjnih tijela ležaja:

$$f_v = \frac{d_p f_r}{2 b_d} \left\{ 1 - \left[ \frac{b_d \cos(\beta)}{d_p} \right]^2 \right\} \text{ Hz}, \quad (2.3)$$

- za oštećenje kaveza ležaja:

$$f_v = \frac{f_r}{2} \left[ 1 - \frac{b_d \cos(\beta)}{d_p} \right] \text{ Hz}, \quad (2.4)$$

gdje je  $f_v$  – frekvencija vibracije,  $f_r$  – frekvencija rotacije valjnih tijela,  $N_k$  – broj valjnih tijela,  $b_d$  – promjer valjnog tijela,  $d_p$  – promjer koraka valjnog tijela ležaja,  $\beta$  – kut kontakta valjnog tijela sa stazom.

Uzroci vibracija ležaja pretežito su mehaničke prirode te mogu biti posljedica:

- istrošenosti dijelova ležaja, tj. zamora materijala uslijed dugogodišnjeg rada;
- vlastite ekscentričnosti uslijed greške u proizvodnji ili nepravilne ugradnje ležaja;
- onečišćenja zbog prašine i sitnih čestica nastalih abrazijom ili zbog korozivnog djelovanja, npr. vode, kiselina i sl.;
- nedovoljnog podmazivanja, koje dovodi do zagrijavanja i abrazije.

Vibracije ležaja mogu biti i posljedica oštećenja nastalih uslijed električnih pojava kao što su:

- prisutnost ležajnih struja koje se mogu pojaviti uslijed magnetske nesimetrije i homopolarnog toka;
- lutajuće struje kroz ležajeve zbog napona prema uzemljenju (*common mode* – kod pretvarača koji nemaju galvansko odvajanje).

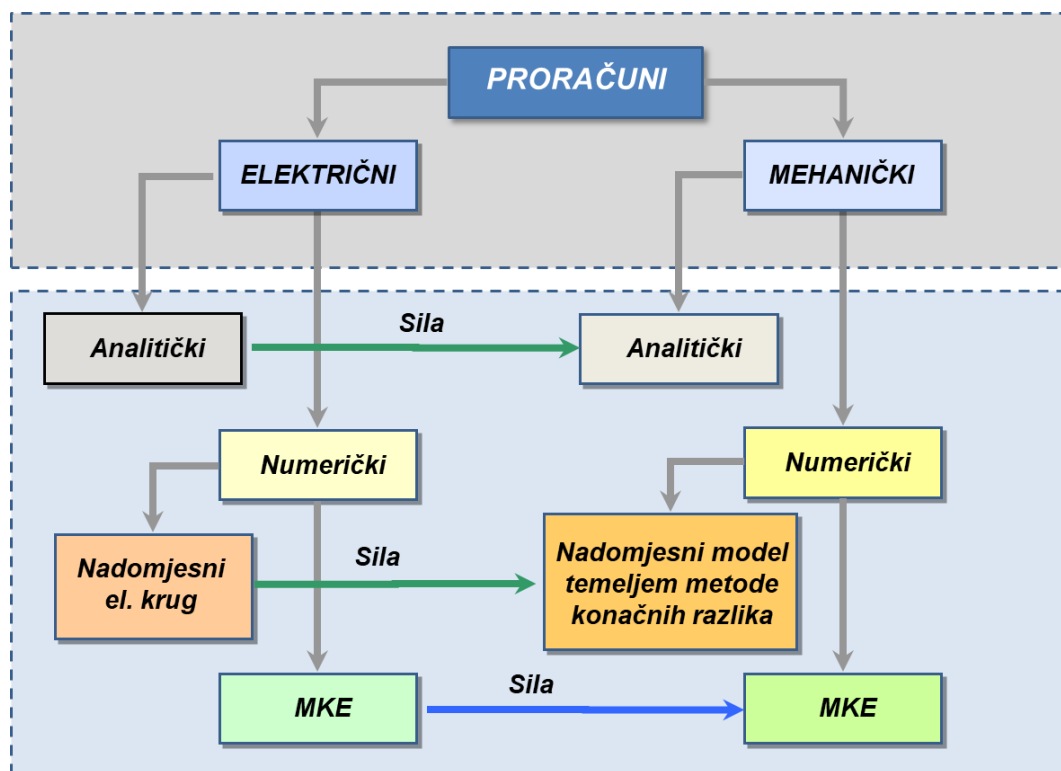
#### **2.1.5. Ostali uzroci vibracija**

Osim prethodno navedenih, postoje i razni dodatni uzroci koji mogu dovesti do povećanih vibracija električnog stroja. U ovu kategoriju spadaju:

- statička i dinamička neuravnoteženost rotirajućih masa preostala nakon postupka balansiranja;
- neučvršćeni dijelovi kućišta;
- otpušten spoj kućišta na temelje;
- otklon vratila generatora na spoju s pogonskim strojem (kada nije postignuta koncentričnost i paralelnost).

## 2.2 Metode izračuna sila i vibracija

Analiza strojeva provodi se na osnovi rezultata proračuna i mjerenja. Proračune možemo podijeliti na način prikazan slikom 2.5. Brzi analitički proračuni primjenjivi su za simetrična stacionarna opterećenja, dok je za prijelazne pojave potrebno koristiti računski zahtjevnije metode.



Slika 2.5 Međupovezivost proračuna za izračun sila i njima uzrokovanih vibracija

Numerički proračuni ovdje su prikazani u “širem smislu“. U ovu grupu proračuna spadaju analize pomoću nadomjesnih električnih krugova, logičkih krugova, ili regulacijskih krugova baziranih na *Laplaceovim* transformacijama koje se rješavaju upotrebom programskih paketa kao što su *MatLab*, *SciLab*, ili *ANSYS Simplorer*. No u užem smislu pod numeričkim proračunom podrazumijevaju se proračuni *Metodom Konačnih Elemenata* (MKE). Kroz ostatak rada se stoga pod pojmom numerički proračuni misli na MKE proračune.

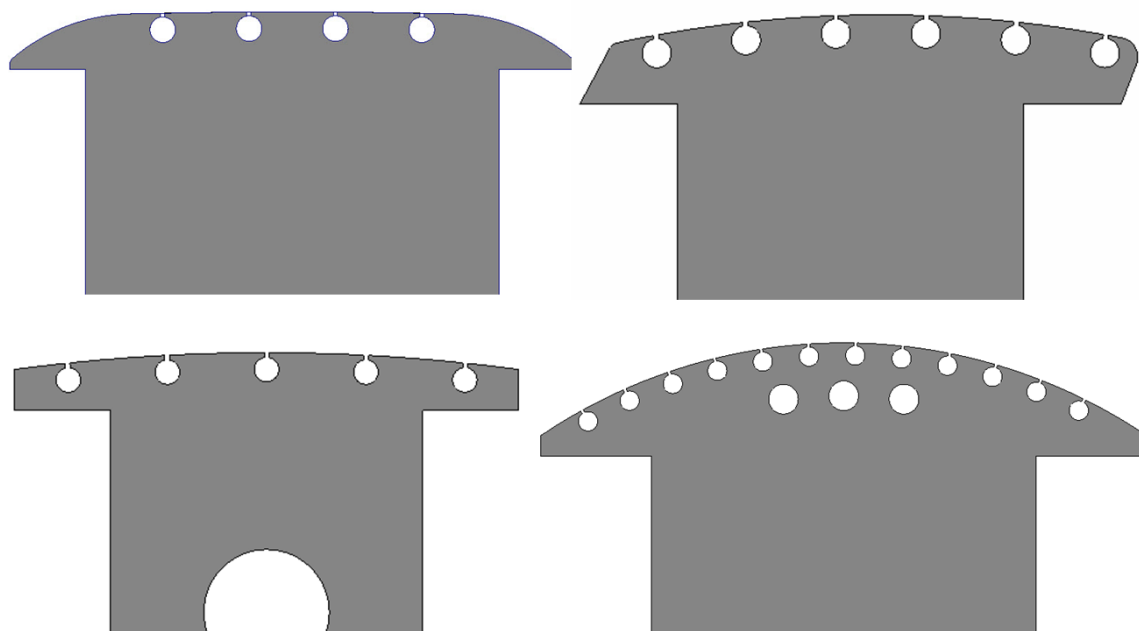
MKE proračuni su obično točniji od brzih analitičkih proračuna jer uzimaju u obzir stvarnu geometriju, no računski su zahtjevniji i sporiji. Uobičajeno se analitički i MKE proračuni provode odvojeno jedni od drugih (jer se najčešće traži ili brza procjena ili što točniji rezultat).

Radi postizanja optimuma između brzine izvođenja i tražene točnosti moguće je koristiti neku kombinaciju analitičkih i numeričkih proračuna.

### 2.2.1. Analitički proračuni

Elektromagnetski analitički proračuni često sadrže neka zanemarenja i pojednostavljenja.

Tako se primjerice utjecaji magnetskih klinova na magnetska rasipanja uzimaju u obzir upotrebom iskustvenih korekcijskih faktora. Rashladni kanali u statorskom paketu i jarmu rotora te svornjaci i tlačne ploče utječu na zasićenje magnetskog kruga i iznos uzbudne struje, no njihov utjecaj se u analitičkim proračunima aproksimira korekcijskim faktorima ili zanemaruje. Oblik polne papuče matematički je opisan za neke, tipične geometrijske oblike (lučni, trapezni, sinusoidni). No prilikom revitalizacija starih generatora, susreću se i oblici polnih papuča koji odudaraju od proračunom podržanih.



Slika 2.6 Različiti oblici polnih papuča koji se susreću u praksi

Utjecaj prigušnog namota na valni oblik indukcije u zračnom rasporu, a time te na valne oblike protjecanja i napona na stezaljkama generatora ili se zanemaruje ili analizira za specijalne slučajeve uz određene pretpostavke i pojednostavljenja (sinusni oblik protjecanja, jednak korak štapova i sl.).

Sve analize provode se uz pretpostavku električno i geometrijski simetričnog stroja.

Analitički proračun vibracija, također se provodi uz niz pretpostavki:

- aktivni dijelovi generatora često se aproksimiraju pojednostavljenom geometrijom kao što su valjak (rotor) i prsten (stator);

- radijalnom raspodjelom mase ili promjenom gustoće pojedinih zona prstena (valjka) aproksimiraju se zone zubi i polova;
- analizira se neprigušeni titrajni sustav;
- krutost pojedinih dijelova stroja definira se aproksimativnim metodama (ležajevi, zamašne mase, lančani rotor);
- pretpostavlja se i analizira cilindrična simetrija sustava.

### **2.2.2. Numerički proračuni metodom konačnih elemenata**

Analiza metodom konačnih elemenata omogućava određivanje elektromagnetskih prilika u svakom segmentu stroja, pa time i proučavanje efekata kao što su lokalna magnetska zasićenja materijala te prostorna promjena magnetske indukcije uslijed električne ili geometrijske asimetrije. Iz tog razloga MKE analiza pogodna je i za određivanje sila nastalih međudjelovanjem statorskog i rotorskog magnetskog polja u stroju.

Razvoj računala omogućio je primjenu MKE proračuna kojima se mogu simulirati dinamičke elektromagnetske pojave uz prisustvo mehaničkog gibanja. Izvodljivost takvih proračuna potaknula je proučavanje sila koje se javljaju prilikom rada električnog stroja.

Analiza sila nastalih ekscentričnim rotacijskim gibanjem prvotno je proučavana na asinkronim motorima [8-11]. Budući da je radna točka asinkronog motora određena naponom statorskog namota  $U$ , frekvencijom  $f$  tog napona i momentom tereta  $M_t$  (veličine koje se mogu zadati kao ulazni podaci MKE proračuna), dinamička simulacija konvergira upravo u traženu radnu točku. Nakon njenog uspješnog izračuna moguće je analizirati sile [13], vibracije [2, 5] i buku [14, 17], koje nastaju u radu električnog stroja.

Radna točka sinkronog generatora određena je iznosima armaturnog napona  $U$ , armaturne struje  $I$ , te njihovim međusobnim faznim pomakom  $\varphi$ . Budući da MKE proračunom nije moguće istovremeno zadavanje iznosa napona i struje armaturnog namota, izračun elektromagnetskog stanja sinkronog generatora za željenu radnu točku složeniji je nego u slučaju asinkronog motora. Za rješavanje ovog problema pogodan je iteracijski postupak [12, 18]. Automatizirani iterativni postupak određivanja radne točke na osnovi analize magnetske indukcije u zračnom rasporu sinkronog generatora [19], koristi se za proračun magnetskih sila za odabrano pogonsko stanje.

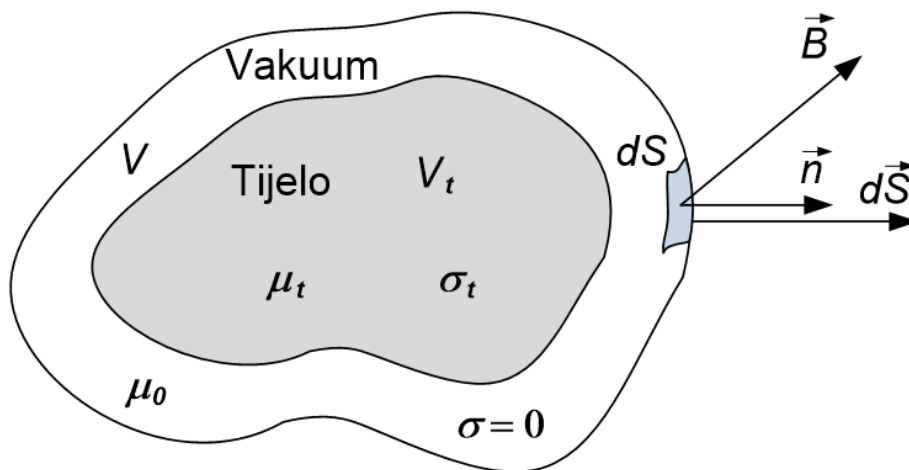
### 2.2.3. Određivanje magnetskih sila metodom konačnih elemenata

Primjenom numeričkih proračuna uvedene su u upotrebu metode pogodne za izračun magnetskih sila [2]. Te metode mogu se podijeliti u dvije grupe:

- izravne metode bazirane na iznosu magnetske indukcije - Maxwellov tenzor naprezanja;
- metode bazirane na zakonu o sačuvanju energije - metoda virtualnog rada.

Sile unutar električnog stroja, najčešće se računaju upotrebom metode Maxwellovog tenzora naprezanja ili metode virtualnog rada.

Metoda Maxwellovog tenzora naprezanja općeniti je postupak za određivanje sila koje djeluju na složenu geometrijsku strukturu, kao što je rotor stroja. Temelji se na određivanju sile  $F$  po površini volumena  $V$  koji obuhvaća promatrano tijelo. Za iznose sila nije bitan oblik obuhvatne površine  $S$ , već poznavanje jakosti magnetske indukcije  $B$  u svakoj njenoj točki (izračunato MKE postupkom) te ispunjenje uvjeta da materijal kroz koji se zatvara obuhvatna površina  $S$  bude jedinstven i magnetske permeabilnosti jednake vakuumu  $\mu = \mu_0$  (slika 2.7).



Slika 2.7 Tijelo u magnetskom polju opisano volumenom  $V$

Ukoliko je  $dS$  diferencijalni dio površine  $S$ , a  $\vec{n}$  vektor normale na tu površinu, tada se promjena sile po površini (gustoća sile) može napisati preko izraza za Maxwellov tenzor naprezanja:

$$\frac{d\vec{F}}{dS} = -\frac{1}{2\mu_0} \cdot |\vec{B}|^2 \cdot \vec{n} + \frac{1}{\mu_0} \cdot (\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B}, \quad (2.5)$$

Ako se za integracijsku površinu odabere ploha kružnog poprečnog presjeka, koja prolazi sredinom zračnog rasporeda električnog stroja, za analizu sila postaje pogodan cilindrični koordinatni



sustav. Kružni poprečni presjek integracijske površine ima nepromjenjiv radijus  $R$ , pa se određivanje diferencijalne površine  $dS$  pojednostavljuje u rješavanje umnoška diferencijalnog luka  $R \cdot d\varphi$  i diferencijalne aksijalne duljine  $dz$ . Uz jedinični vektor  $\vec{n}$  postavljen u smjeru radijusa ( $\vec{n} = \vec{\rho}$ ) cilindričnog koordinatnog sustava i vektor indukcije rastavljen na radijalnu, tangencijalnu i aksijalnu komponentu  $\vec{B} = B_{rad} \cdot \vec{\rho} + B_{tan} \cdot \vec{\varphi} + B_{aks} \cdot \vec{z}$ , raspisivanje izraza (2.5) dovodi do jednadžbi za komponente diferencijalne sile  $d\vec{F} = dF_{rad} \cdot \vec{\rho} + dF_{tan} \cdot \vec{\varphi} + dF_{aks} \cdot \vec{z}$ :

$$dF_{rad} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_{rad}^2 - B_{tan}^2 - B_{aks}^2) \cdot R \cdot d\varphi \cdot dz \quad (2.6)$$

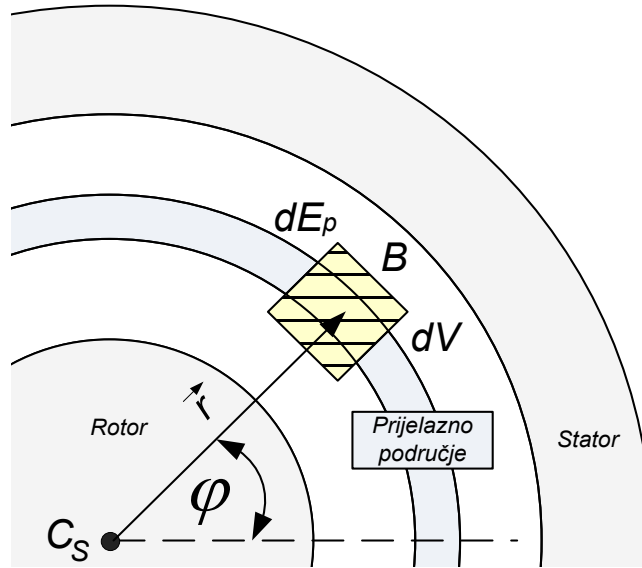
$$dF_{tan} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot B_{rad} \cdot B_{tan} \cdot R \cdot d\varphi \cdot dz \quad (2.7)$$

$$dF_{aks} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot B_{rad} \cdot B_{aks} \cdot R \cdot d\varphi \cdot dz \quad (2.8)$$

Negativni predznak odraz je međusobnog odnosa smjera vektora normale na površinu i sile koja djeluje na stator.

Metoda virtualnog rada temelji se na zakonu o sačuvanju energije i primjeni principa virtualnog pomaka. Uslijed magnetskog polja koje se nalazi u zračnom rasporu ( $\mu = \mu_0$ ), u stroju je pohranjena potencijalna magnetska energija  $E_p$ . Iznos te energije ovisi o volumenu promatranog materijala  $V$ , i njemu pripadnoj magnetskoj indukciji  $B$ . Određenim dijelom volumena  $dV$  obuhvaćen je dio potencijalne energije  $dE_p$  (slika 2.8) za koji vrijedi:

$$dE_p = -\frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot dV \quad (2.9)$$



Slika 2.8 Volumni odsječak  $dV$  u kojem dolazi do promjene potencijalne energije uslijed gibanja

Kako se mijenja položaj rotora stroja, dolazi do promjene indukcije  $B$ , pa time i do promjene potencijalne energije volumnog odsječaka  $dV$ . Ukoliko se pretpostavi da kratkotrajne promjene u mehaničkoj energiji  $\Delta E_{meh}$  (vibracije) ne utječu na električne uvjete stroja (električna energija ostaje nepromijenjena tj.  $\Delta E_{Elek} = 0$ ), promjena potencijalne energije diferencijalnog dijela volumena odgovara promjeni mehaničke energije, odnosno radu:

$$\Delta(dW) = \Delta(dE_{meh}) = \Delta(dE_p) \Rightarrow dW = dE_p \quad (2.10)$$

Iz gornje jednakosti proizlazi da je poznavanjem potencijalne energije  $dE_p$  promatranog volumnog odsječaka moguće odrediti promjenu sile  $dF_x$  koja odgovara prividnom pomaku  $\partial x$  rotora:

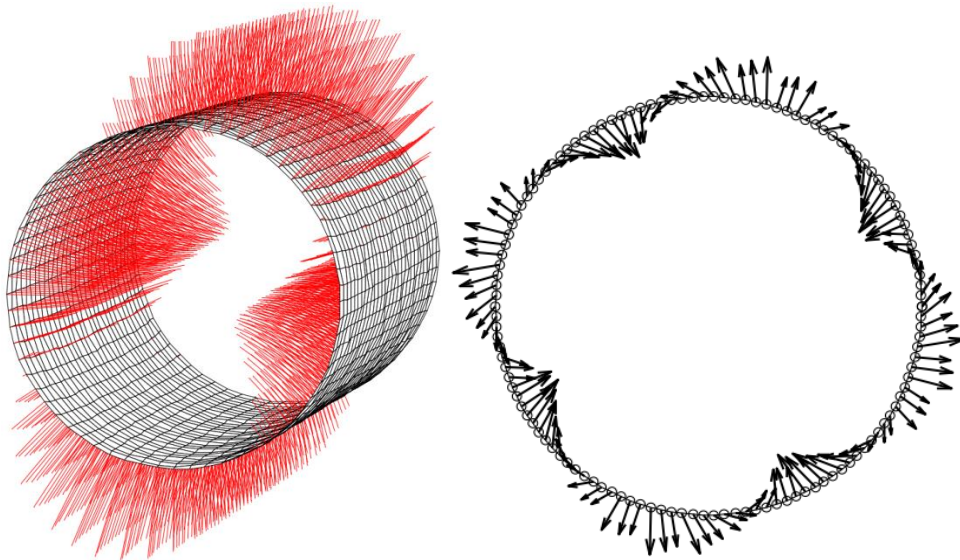
$$dF_x = \frac{\partial(dW)}{\partial x} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \left( dV \cdot \frac{\partial B^2}{\partial x} + B^2 \cdot \frac{\partial(dV)}{\partial x} \right) \quad (2.11)$$

Određivanje iznosa parcijalnih derivacija  $\partial B^2/\partial x$  i  $\partial(dV)/\partial x$ , zahtjeva MKE model stroja podijeljen na tri područja: pomično (rotorsko), nepomično (statorsko) i prijelazno (dodirno) u zračnom rasporu. Volumenom  $dV$  treba biti obuhvaćeno prijelazno područje, kojem se mijenja oblik pod utjecajem virtualnog pomaka. Uz svođenje širine međuslojnog dijela na infinitezimalno malu veličinu, volumen  $dV$  postaje nepromjenjiv ( $\partial(dV)/\partial x = 0$ ), pa se izraz (2.11) pojednostavljuje.

Upotrebom teorema divergencije, proračun sile može se svesti na integraciju po površini  $dS$  koja obavlja promatrani volumen [2]. Izraz (2.12) opisuje površinsku gustoću sile koja djeluje u smjeru normale na površinu  $dS$ . Negativni predznak odraz je međusobnog odnosa smjera vektora normale na površinu i sile koja djeluje na sator.

$$dF_n = -\frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_n^2) \cdot dS \quad (2.12)$$

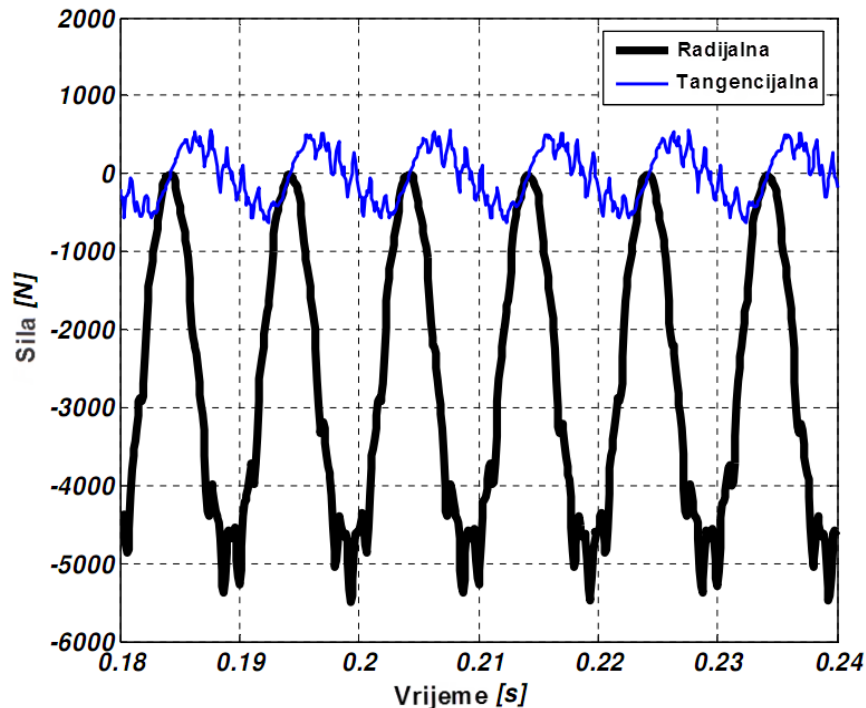
Aksijalna komponenta sile javlja se zbog utjecaja glava namota, skošenja statorskih utora ili polova te radijalne i aksijalne ekscentričnosti rotora. Budući da je za određivanje ove sile potrebno poznavati indukciju u aksijalnom smjeru ( $B_z$ ), koja za navedene slučajeve uzduž stroja nije homogena, postupci za njeno računanje baziraju se na 3D MKE analizama. Kako su takvi proračuni računalno i vremenski vrlo zahtjevni, a aksijalna sila nije glavni uzročnik vibracija, njena analiza rijetko se provodi.



Slika 2.9 Prikaz vektora magnetskih sila u zračnom rasporu stroja [17]

Uz zanemarenje djelovanja aksijalne indukcije i pretpostavku jednolike raspodjele sila uzduž duljine stroja  $L$ , radijalnu i tangencijalnu silu moguće je odrediti uporabom 2D MKE proračuna (slika 2.9). U tom slučaju integracija sile po površini svodi se na integraciju po kružnom odsječku duljine  $L$  (Maxwellova metoda tenzora naprezanja).

Proračuni i mjerenja pokazuju kako je tangencijalna sila barem za red veličine manja od radijalne (slika 2.10), pa se često zanemaruje u analizi vibracija [5, 7, 14]. Budući da je radijalna komponenta sile najveća, o vibracijama i buci električnog rotacijskog stroja najčešće se zaključuje na osnovi njenog iznosa i harmonijskog sastava.



Slika 2.10 Komponente magnetske sile u zračnom rasporu stroja [17]

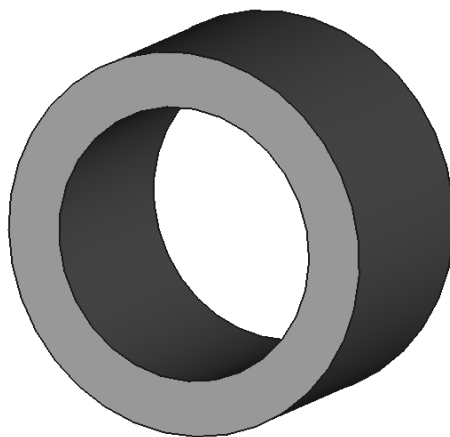
#### 2.2.4. Vibracije uzrokovane magnetskim silama

Periodičnost valnog oblika magnetske sile u zračnom rasporu električnog stroja, uzrokuje titranje statorskog paketa. Ove vibracije ovise o amplitudi sile, no još više o njenoj frekvenciji ponavljanja, jer podudaranje frekvencije magnetske sile s vlastitom frekvencijom statora stroja uzrokuje rezonanciju [2, 6]. Iste sile utječu i na rotor. Zbog veće krutosti, vlastite frekvencije rotora nekoliko puta su više od statorskih. Stoga se utjecaj vibracija na deformaciju rotora najčešće zanemaruje [2].

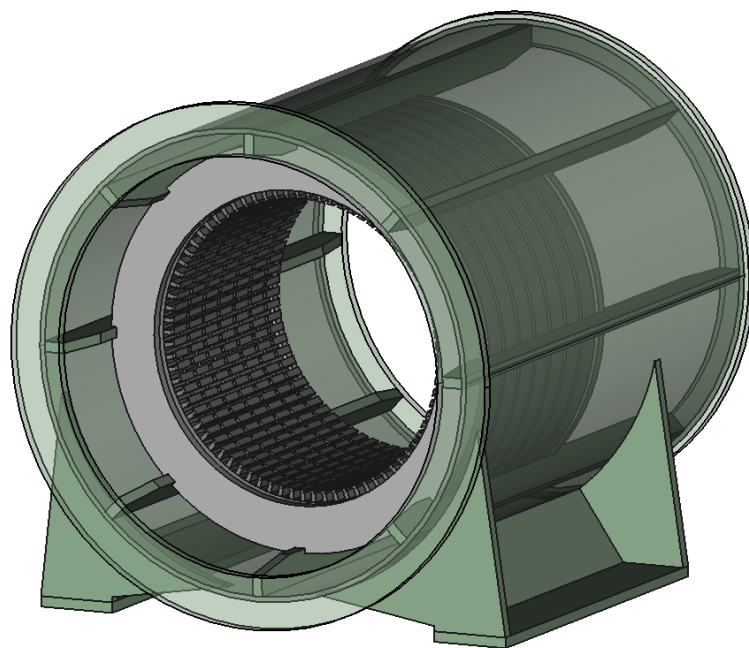
Uz pretpostavku zanemarivog utjecaja vibracija na geometriju rotora, može se uzeti da vrijedi jednosmjerna ovisnost mehaničkih veličina o elektromagnetskim, tj. da mehaničke deformacije povratno ne utječu na elektromagnetske prilike u stroju [2]. Strukturna analiza električnog stroja može se provesti upotrebom općenite jednadžbe gibanja [2, 4, 5, 6, 13, 17]:

$$[M] \cdot \frac{d^2}{dt^2} [\vec{q}(t)] + [C] \cdot \frac{d}{dt} [\vec{q}(t)] + [K] \cdot [\vec{q}(t)] = [\vec{F}(t)] \quad (2.13)$$

U izrazu (2.13)  $[M]$  predstavlja matricu masa,  $[C]$  matricu prigušenja,  $[K]$  matricu krutosti,  $[\vec{F}(t)]$  vektor vremenski promjenjivih sila, a  $[\vec{q}(t)]$  vektor vremenski promjenjivih pomaka čvorova mreže. Veličine ovih matrica ovise o složenosti korištenog modela, koja može varirati od šupljeg cilindra kojim se pojednostavljeno opisuje stator (slika 2.11) do složene geometrijske strukture, pogodne za MKE analizu [6, 17] (slika 2.12).



Slika 2.11 Jednostavan model šupljeg cilindra za analizu vibracija statora



Slika 2.12 Složena geometrijska struktura 3D modela

Poznavanje vlastitih (prirodnih) frekvencija i formi (modova) vibriranja konstrukcije omogućava provedbu dinamičke analize stroja. Ukoliko se odziv periodički ponavlja, pomak  $\vec{q}(t)$  može se pretpostaviti u obliku:

$$\vec{q}(t) = \vec{q}_0 \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (2.14)$$

Pri tom je  $\vec{q}_0$  vektor amplitude pomaka,  $\omega$  vlastita kružna frekvencija, a  $j$  imaginarna jedinica ( $j^2 = -1$ ). Druga derivacija dane harmonijske funkcije po vremenu (2.14) također je harmonijska funkcija:

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{q}(t) = -\omega^2 \cdot \vec{q}(t) \quad (2.15)$$

Uz ove odnose i zanemarenje mehaničkog prigušenja ( $[C] = 0$ ), izraz (2.13) poprima oblik:

$$-\omega^2 \cdot [M] \cdot [\vec{q}(t)] + [K] \cdot [\vec{q}(t)] = [0] \quad (2.16)$$

Rješavanjem determinante dobivenog izraza, dolazi se do svojstvene vrijednosti koja izražava slobodne vibracije konstrukcije na frekvenciji  $\omega$ .

$$\det([K] - \omega^2 \cdot [M]) = 0 \quad (2.17)$$

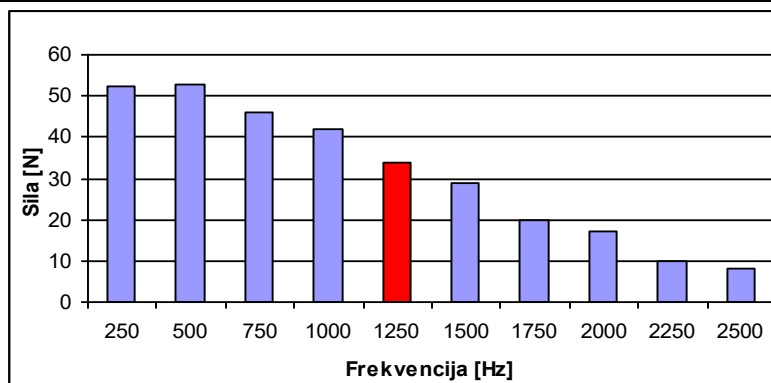
Magnetska sila periodički se ponavlja, pa ju je moguće rastaviti u *Fourierov* red.

$$\vec{F}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \vec{F}_k \cdot e^{j \cdot \Omega_k \cdot t} \quad (2.18)$$

Izrazom (2.18) prikazan je vremenski promjenjiv vektor ukupne magnetske sile  $\vec{F}$  kao suma harmonika, gdje je sa  $\vec{F}_k$  označen prostorni vektor  $k$ -tog harmonika magnetske sile, a s  $\Omega_k$  kutna frekvencija uzbude  $k$ -tog harmonika.

Ukoliko je od interesa samo prepoznavanje pojave rezonancije, dovoljno je odrediti spektar frekvencija magnetske sile u zračnom rasporu i vlastite frekvencije konstrukcije  $f_k(\omega_i)$ . Usporedba ovih vrijednosti i njihovo (frekvencijsko) podudaranje ukazuje na potencijalni problem raspirivanja vibracija (slika 2.13).

|                                 |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| forma vibriranja (mod) $k$      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Vlastita frekvencija $f_k$ [Hz] | 1125 | 1242 | 1310 | 1831 | 1938 |



Slika 2.13 Primjer podudaranja vlastite frekvencije s frekvencijom sile [2]

Za određivanje točnog iznosa vibracija uzrokovanih silom u zračnom rasporu, potrebno je (analogno izrazu 2.18) na više harmonike rastaviti vektor pomaka  $\vec{q}$ .

$$\vec{q}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \vec{q}_k \cdot e^{j \cdot \Omega_k \cdot t} \quad (2.19)$$

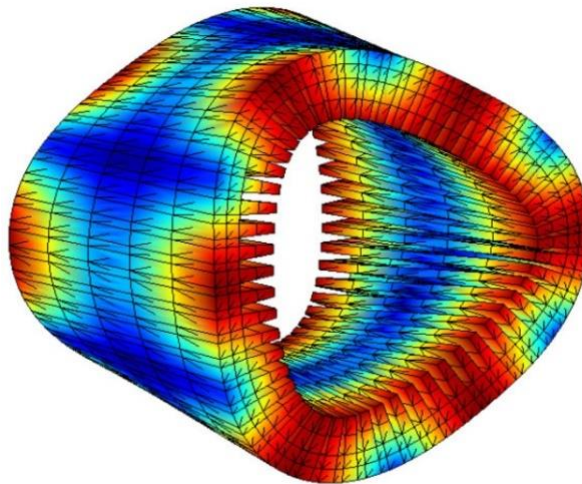
$$([K] - \omega^2 \cdot [M]) \cdot \vec{q}_k = \vec{F}_k \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{q}_k = -\omega^2 \cdot \vec{q}_k \quad (2.21)$$

Za jedan po jedan harmonik pobudne sile, pomoću izraza (2.20) i (2.21) računa se prostorni vektor amplitude pomaka  $\vec{q}_k$ . Povećanje vremenske efikasnosti proračuna prisilnih vibracija moguće je postići upotrebom modalne analize. Ovo svojstvo vibracija dozvoljava određivanje jedinstvene prijenosne funkcije  $G_{m_{ik}}(\omega_k)$  između pomaka i pobudne sile. Da bi se odredila prijenosna funkcija primjenjiva za sve frekvencije, potrebno je provesti dijagonalizaciju matrica mase, prigušenja i krutosti [2]. Vrijednosti matrice prigušenja  $[C]$  u stvarnosti složeno ovise o matricama masa i krutosti sustava, no da bi dijagonalizacija matrice  $[C]$  bila moguća, pretpostavlja se linearna ovisnost opisana izrazom 2.22 u kojem su  $k_{C1}$  i  $k_{C2}$  konstante:

$$[C] = k_{C1} \cdot [M] + k_{C2} \cdot [K]. \quad (2.22)$$

Podudaranje izračunatih rezultata s mjerenjima raste kako se povećava složenost simulacijskog modela. Stoga se najbolji rezultati u određivanju svojstvenih vektora postižu upotrebom mehaničkih MKE proračuna [13, 17], kojima je moguće precizno modelirati geometriju stroja. Takve analize, osim točnog izračuna vlastitih frekvencija, omogućavaju i grafički prikaz glavnih formi (modova) vibriranja stroja (slika 2.14).



Slika 2.14 Treća glavna forma (mod) vibriranja statora [17]

S povećanjem geometrijske složenosti modela rastu i računski zahtjevi, pa se traži kompromis između točnosti rezultata i vremena izvođenja simulacije. Tako se npr. za simulacije često odabire model statora bez armaturnog namota. Usporedba proračuna sa i bez armaturnog namota, pokazala je kako se pri vlastitim frekvencijama nižeg reda ( $k = 2, 3, 4$ ) rezultati ovih dvaju tipova modela razlikuju manje od 5 % [13].

Podudaranje harmonika magnetske sile zračnog raspora s vlastitom frekvencijom konstrukcije stroja uzrokuje rezonantne vibracije. Stoga se ono pokušava spriječiti raznim metodama. Najpoznatiji način predstavlja promjena vlastitih frekvencija izmjenom mehaničkih karakteristika stroja (npr. radijalne dimenzije jarma statora ili učvršćenja statorskog paketa u kućištu). Numeričke proračunske metode (MKE) omogućuju dobivanje detaljne slike elektromagnetskih prilika u zračnom rasporu, te time i provedbu mjera za postizanje povoljnijeg harmonijskog sastava magnetske sile u fazi projektiranja. Neke mjere provode se u vidu promjene elektromagnetski aktivnih dijelova stroja (npr. veličine zračnog raspora, oblika polne papuče, izvedbe prigušnog namota, broja i oblika statorskih utora, koraka statorskog namota, zaklinjenje utora magnetskim klinovima, skošenja statorskih utora ili polova), a drugi izmjenama u električnom upravljanju (uvođenjem aktivnih sustava za smanjenje vibracija) [8, 16].



### **3. Sinkroni generator za eksperimentalna mjerenja i mjerna oprema**

U poglavlju je opisan objekt mjerenja – sinkroni generator na kojem su provedena specifična laboratorijska mjerenja i verifikacija rezultata numeričkih proračuna. Također su prikazane i opisane značajke ispitivanog sinkronog stroja, posebnosti modela korištenog za numeričke proračune, mjerna oprema, postupak mjerenja, odabrani mjerni senzori za detekciju magnetskih polja i vibracija te procjena mjerne nesigurnosti.

#### **3.1. Sinkroni generator – objekt mjerenja**

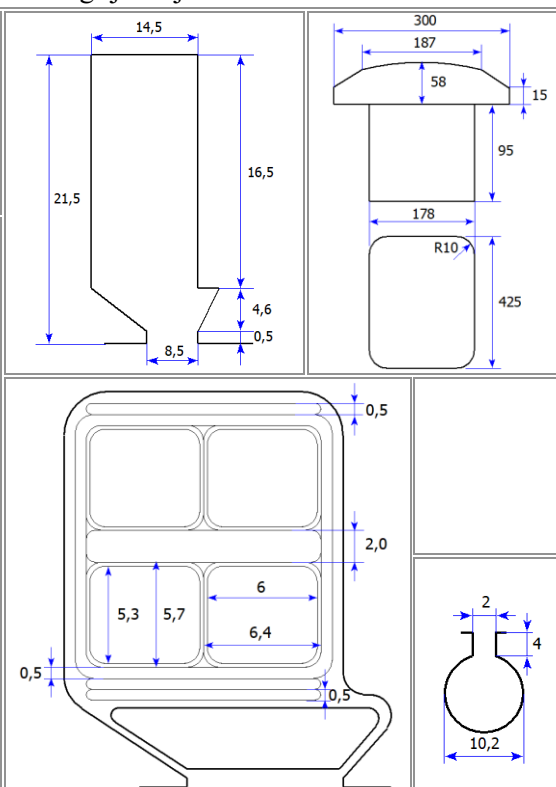
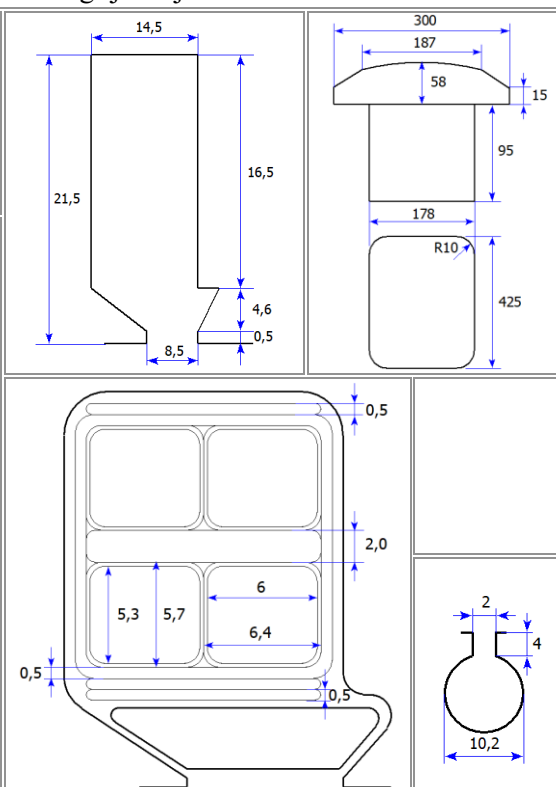
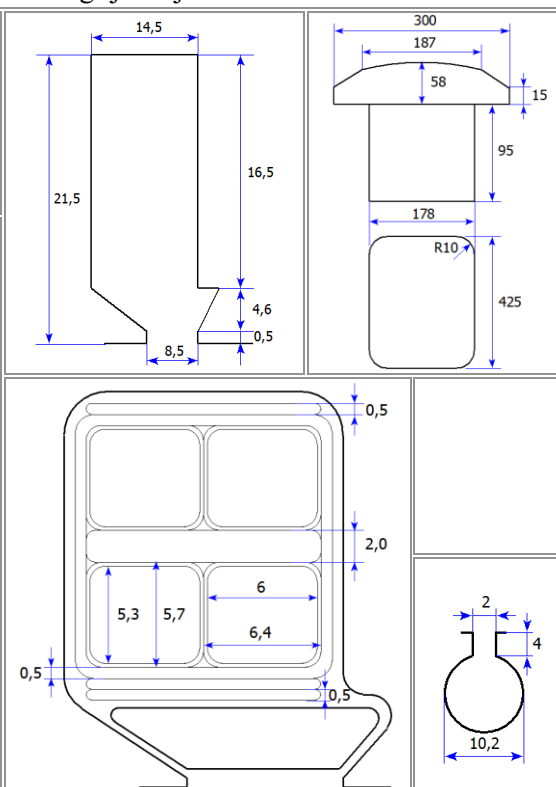
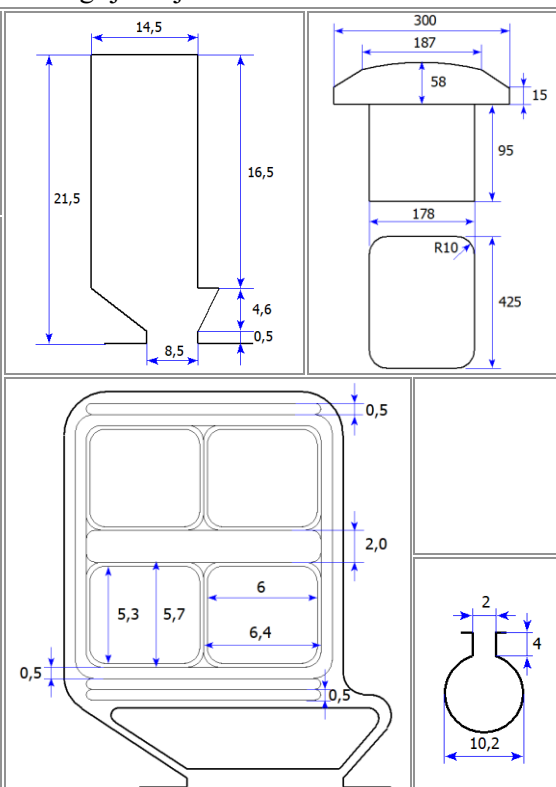
Eksperimentalna mjerenja provedena su na trofaznom sinkronom generatoru tipa 2S 783-4, proizvedenom 1970. godine u tvornici *Rade Končar* i namijenjenom za električno napajanje raznih električnih uređaja u laboratoriju *Končar – Instituta za elektrotehniku*, (slika 3.1).

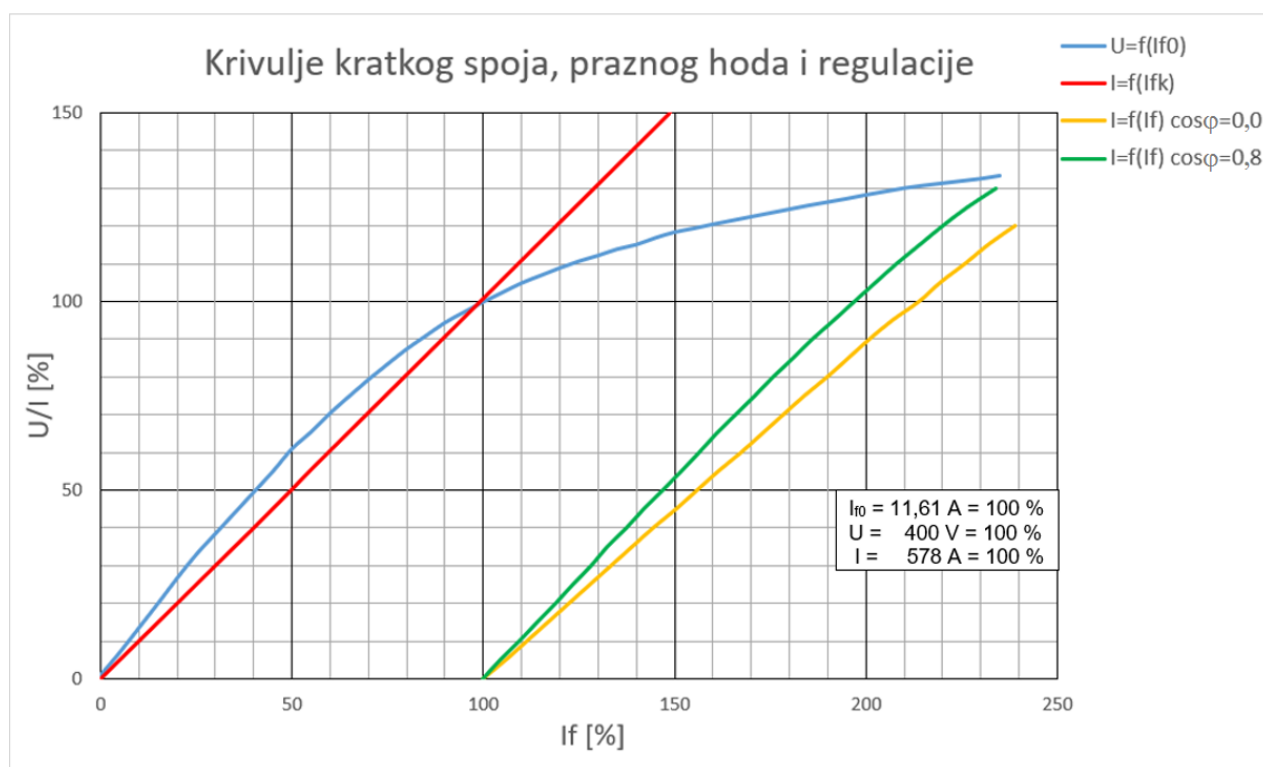


Slika 3.1 Sinkroni generator za provedbu ispitivanja

Ispitni generator je priрубničkim spojen povezan s pogonskim motorom, a regulacijom snage na vratilu i promjenom uzbude generatora, moguće je osigurati rad s različitim opterećenjima u cjelovitom rasponu induktivno-radnih faktora snage, uključujući i trajni rad s potpuno induktivnim teretom. Generator je projektiran za nazivnu snagu 400 kVA, uz napon od 400 V i frekvenciju 50 Hz. U tablici 3.1 prikazani su projektni podaci generatora, geometrijske dimenzije polova, utora statora i punjenje utora u milimetrima, a slikom 3.2 izmjerene osnovne karakteristične krivulje generatora.

Tablica 3.1 Projektni podaci sinkronog generatora 2S 783 – 4

|                                                                                     |                          |            |                       |                   |                                                                                                                                             |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------|--------------|-----|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---|------|----|----|----------|--|--|--|
| KONČAR                                                                              |                          |            |                       |                   |                                                                                                                                             |            |             |              |     | RAČUNSKI PODACI            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          |            |                       |                   |                                                                                                                                             |            |             |              |     | TIP: 2S 783 - 4            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          |            |                       |                   |                                                                                                                                             |            |             |              |     | 3 fazni sinkroni generator |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
| U                                                                                   | 400                      | I          | 578                   | N                 | 1500                                                                                                                                        | S          | 400         |              | 0,0 | u                          | 185,5                                                                               | i | 25,4 | f  | 50 | intermit |  |  |  |
| V                                                                                   |                          | A          |                       | min <sup>-1</sup> |                                                                                                                                             | kVA        |             | cos φ        |     | V                          |                                                                                     | A |      | Hz |    |          |  |  |  |
| Broj polova: 4      pogon: ispitni                                                  |                          |            |                       |                   |                                                                                                                                             |            |             |              |     | zagrijavanje: 80/80 °C     |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
| gl. dimenzije                                                                       | duljina željeza + raspor |            |                       |                   | Stator<br>355+6x10                                                                                                                          |            |             | Rotor<br>425 |     |                            |  |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | Ø vanjski                |            |                       |                   | 780                                                                                                                                         | zr.raspor  |             | 545,8        |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | Ø unutarnji              |            |                       |                   | 555                                                                                                                                         | 4,6        |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | vrsta lima W/kg          |            |                       |                   | DL 53 (0,5) izol                                                                                                                            |            |             | DL 53 (0,5)  |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
| namot armature                                                                      | vrsta namota             |            |                       |                   | dvoslojni petljasti                                                                                                                         |            |             |              |     |                            |  |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | način ugradnje           |            | klin                  |                   | uložni                                                                                                                                      |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | izolacija                |            | klasa                 |                   | posebna                                                                                                                                     |            |             | B            |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | debljina ljuske          |            | materijal             |                   | 0,5 mm                                                                                                                                      |            |             | Mi-le        |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | br.utora                 |            | presjek utora         |                   | 78                                                                                                                                          | 306,25 mm² |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | izolacija                | ut. oblog  |                       |                   | 0,5 mm                                                                                                                                      |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          | međuslojna |                       |                   | 2 mm                                                                                                                                        |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          | podloge    |                       |                   | 0,5 mm                                                                                                                                      |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | prikrata                 |            | korak                 |                   | skoš.                                                                                                                                       |            | 17 / 19,5   | 1 - 18       |     | 1 / 78                     |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | vodiča u utoru           |            | # dionih vodiča       |                   | par. grane                                                                                                                                  |            | 2 x 1       | 2            |     | 2                          |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | dimenzije goli vodič     |            | dimenzije izol. vodič |                   | 6 x 5,3                                                                                                                                     |            |             | 6,4 x 5,7    |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | vodič                    |            | neto masa             |                   | E - Cu / 56                                                                                                                                 |            |             | 109 kg       |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | srednja duljina vodiča   |            |                       | broj svitaka      |                                                                                                                                             | 1182 mm    |             |              | 78  |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | q                        |            | otpor faze            |                   | 3,5                                                                                                                                         |            |             | 0,00591 Ω    |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | spoj                     |            | broj krajeva          |                   | Y / Δ                                                                                                                                       |            |             | 6 / 6        |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | istak                    |            | impregnacija          |                   | -                                                                                                                                           |            |             | Za kl. B     |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
| namot polova                                                                        | izolacija                |            | klasa                 |                   | posebna                                                                                                                                     |            |             | B            |     |                            |  |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | zavoja po polu           |            | # žica                |                   | 368                                                                                                                                         |            |             | 1            |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | broj svitaka             |            | par. grane            |                   | 4                                                                                                                                           |            |             | 1            |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | dimenzije goli vodič     |            | dimenzije izol. vodič |                   | 2,7 x 2,7                                                                                                                                   |            |             | 3,0 x 3,0    |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | vodič                    |            | neto masa             |                   | E – Cu / 56                                                                                                                                 |            |             | 126 kg       |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | spoj                     |            | broj izvoda           |                   | serijski                                                                                                                                    |            |             | 2            |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     | impregnacija             |            | otpor                 |                   | Za kl. B                                                                                                                                    |            |             | 5,24 Ω       |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|  |                          |            |                       |                   | Prazni hod                                                                                                                                  |            | Kratki spoj |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          |            |                       |                   | Iu0                                                                                                                                         | 11,22 A    | Iuk         | 10,22 A      |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          |            |                       |                   | Pfe                                                                                                                                         | 5100 W     | Pk75        | 13550 W      |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |
|                                                                                     |                          |            |                       |                   | napomena: istak glave namota od paketa jednostrano cca 240 mm<br>visina rotorskog namota bez podloge i izolacije prema papuči je cca 87 mm. |            |             |              |     |                            |                                                                                     |   |      |    |    |          |  |  |  |

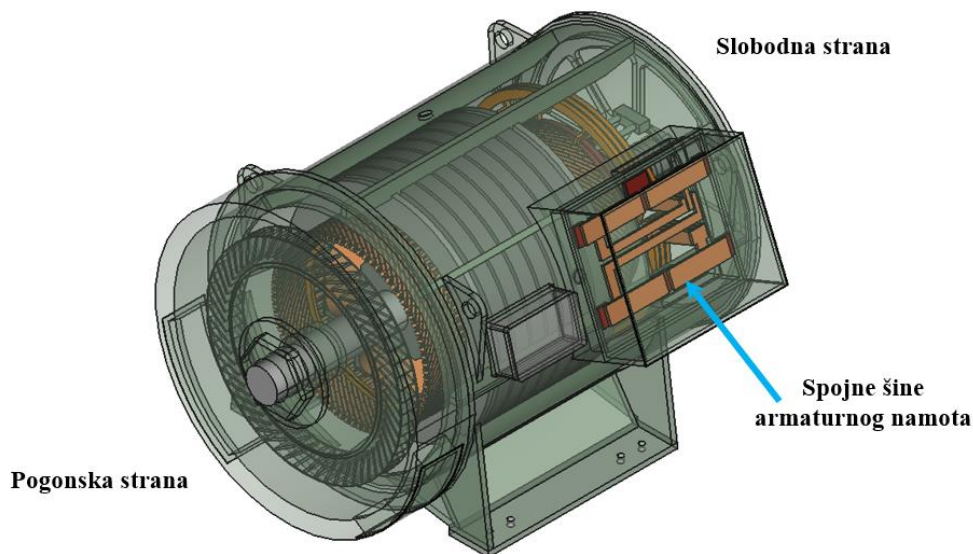


Slika 3.2 Mjerenjem određene krivulje kratkog spoja, praznog hoda i regulacije

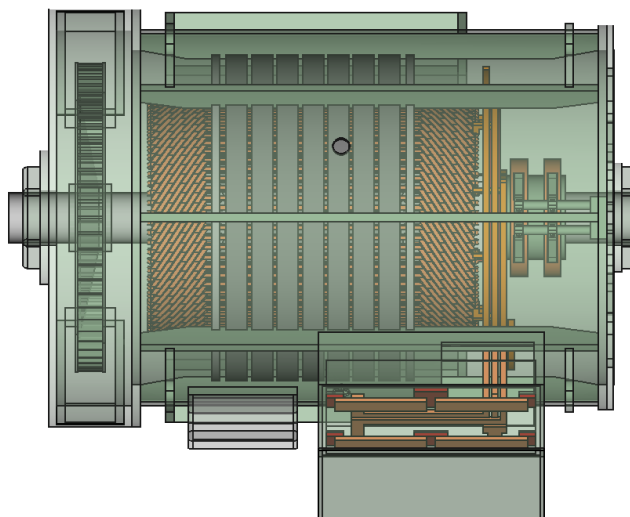
Mehanička zaštita stroja je IP 20, a vrsta hlađenja IC01. Ventilator za hlađenje smješten je na pogonskoj strani (PS) vratila generatora. Rashladni zrak ulazi u generator aksijalno kroz otvore štita na slobodnoj strani (SS), a izlazi kroz dva radijalna izlaza na obodu poklopca ventilatora. Na SS strani generatora smješteni su zamašnjak i klizni koluti za napajanje rotorskog uzbudnog namota.

Pogonski kraj vratila namijenjen je za prijenos momenta preko elastične spojke ili kardana. Generator je u ispitnoj stanici smješten horizontalno i fiksiran na metalno postolje s četiri vijka preko nosača koji su dio kućišta. Statorski paket razdijeljen je radijalnim rashladnim kanalima širine 10 mm na 7 aksijalnih dijelova, svaki duljine 59,2 mm. Statorski paket spojen je na kućište s osam cirkularno jednoliko međusobno razmaknutih pričvrtnih letvi, koje su cijelom duljinom zavarene na kućište i na paket. Izvodi armaturnog namota i uzbuđne stezaljke povezani su s regulacijskom ormarima pomoću električnih energetske vodova.

Slikama 3.3 i 3.4 prikazan je model generatora na kojem su vidljivi detalji kućišta, način spoja paketa statora na kućište pomoću pričvrtnih letvi, nosači preko kojih je stroj fiksiran na postolje, smještaj aktivnih dijelova unutar kućišta i ležajeva u štitovima, pozicija ventilatora i vanjski plašt kućišta s priključnim kutijama.



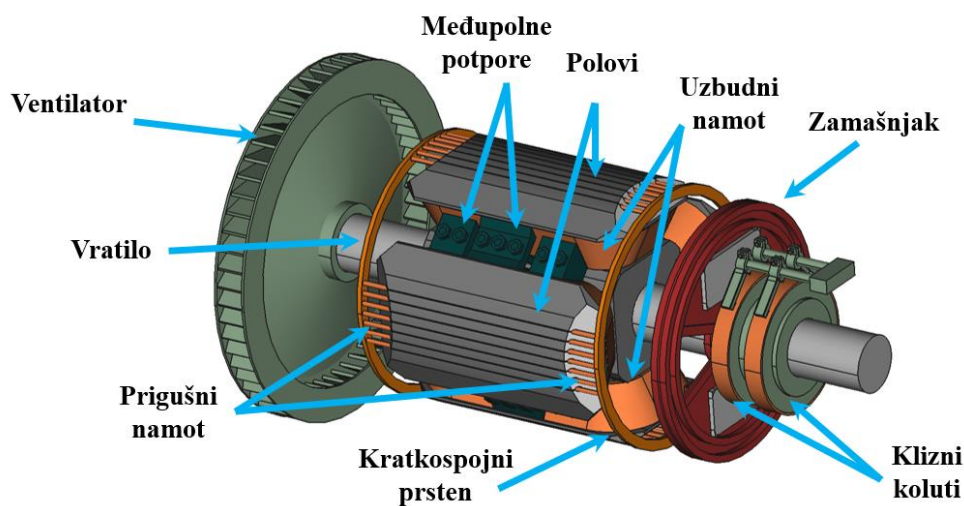
Slika 3.3 Izometrijski prikaz modela sinkronog generatora



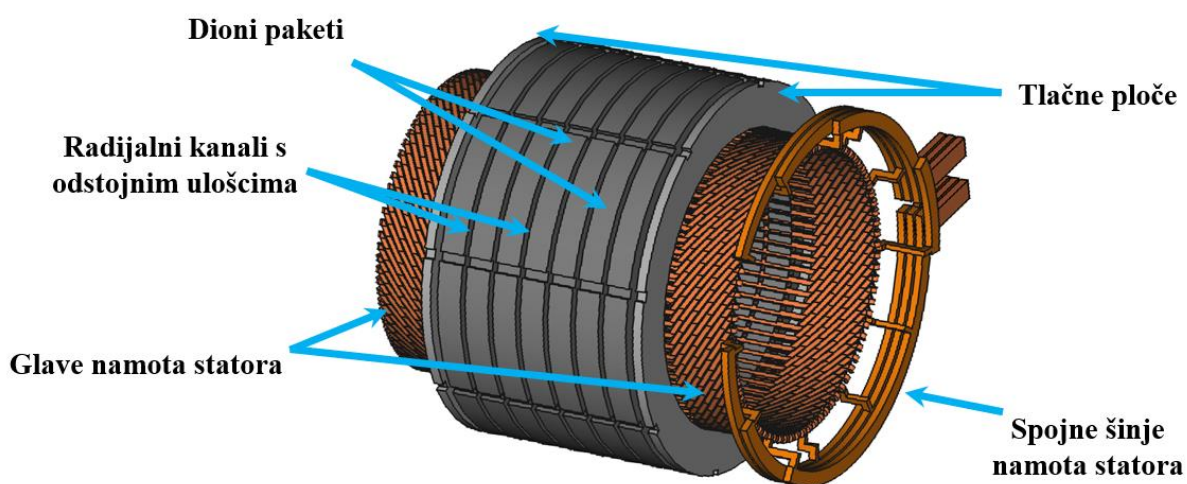
Slika 3.4 Tlocrtni prikaz konstrukcijskih dijelova generatora

Statorski namot generatora je dvoslojni petljasti, izveden od profilnih vodiča. Se sastoji od 78 svitaka smještenih u poluotvorene utore skošene za jedan utorski korak, a u svakom utoru su smještena ukupno dva vodiča (svakom sloju pripada po jedan vodič sastavljen od dva diona vodiča).

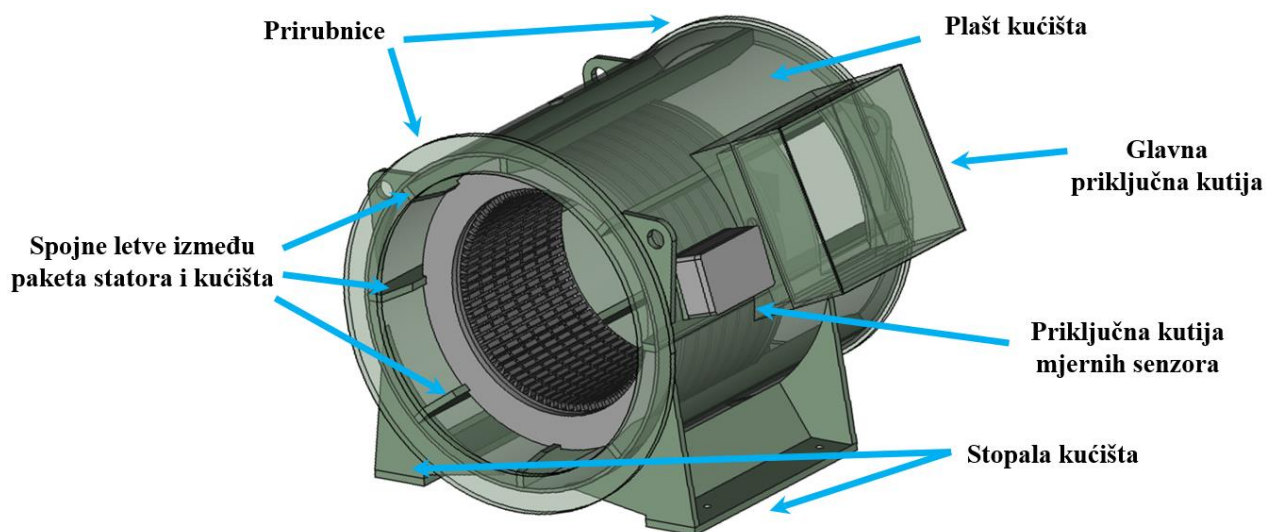
Na rotoru se nalaze četiri istaknuta pola. Uzbudni namot na svakom polu ima 368 zavoja i mehanički je učvršćen s po tri potpore u svakom međupolnom prostoru. Na svakoj polnoj papučici trapeznog oblika nalazi se po sedam štapova prigušnog namota kružnog poprečnog presjeka promjera  $\phi 10$  mm, s međusobnim razmakom koji odgovara koraku utora statora. Model rotora prikazan je detaljnije na slici 3.5, statorski namot sa spojevima u čeonj zoni na slici 3.6, a način učvršćenja paketa statora u kućištu na slici 3.7.



Slika 3.5 Izvedba polova, kliznih koluta, zamašnjaka i ventilatora rotora



Slika 3.6 Izvedba statorskog paketa i namota sa spojevima u čeonj zoni



Slika 3.7 Statorski paket ugrađen u kućište

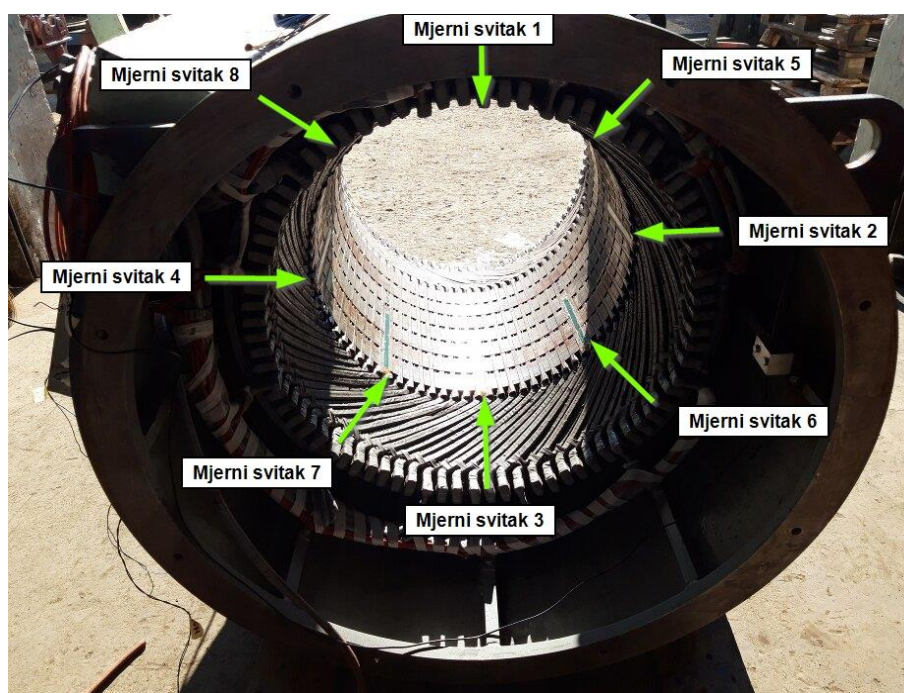


U svrhu provedbe specifičnih laboratorijskih mjerenja, analizirani sinkroni generator je posebno dorađen kako bi se njime mogla provesti verifikacijska mjerenja. Ove dorade obuhvaćale su:

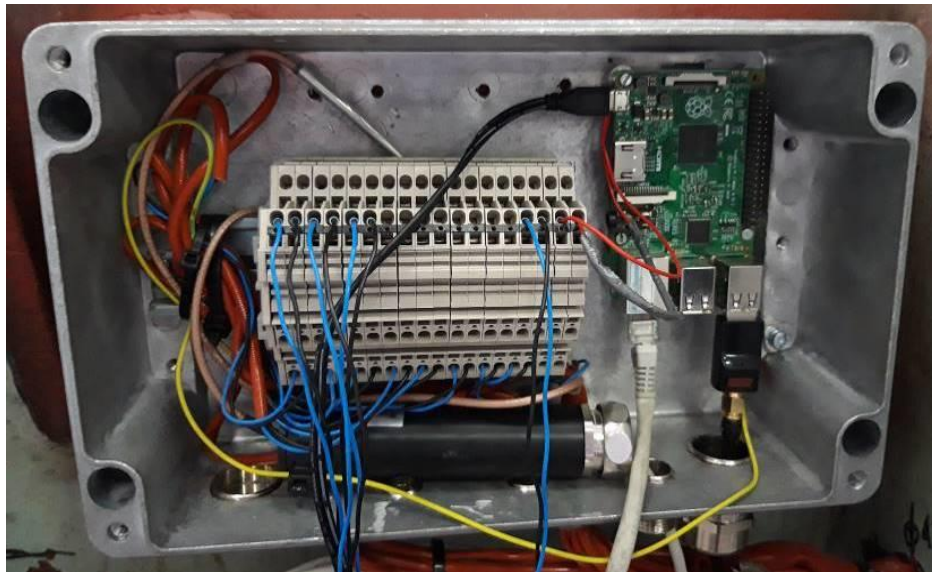
- izradu dva provrta promjera  $\phi 20$  mm na kućištu statora za potrebe izravnog smještaja akcelometara na paket statora;
- ugradnju 8 mjernih svitaka na zube paketa statora u zoni zračnog raspora za potrebe određivanja i usporedbe magnetske indukcije za različita pogonska stanja;
- izradu mjerne priključne kutije na kućištu za spojeve izvoda ugrađenih mjernih svitaka.



Slika 3.8 Provrt na kućištu ispod kojeg je dostupan paket statora za montažu senzora



Slika 3.9 Mjesta ugradnje i brojčane oznake mjernih svitaka – pogled sa slobodne strane stroja



Slika 3.10 Priključna kutija s izvodima ugrađenih mjernih svitaka

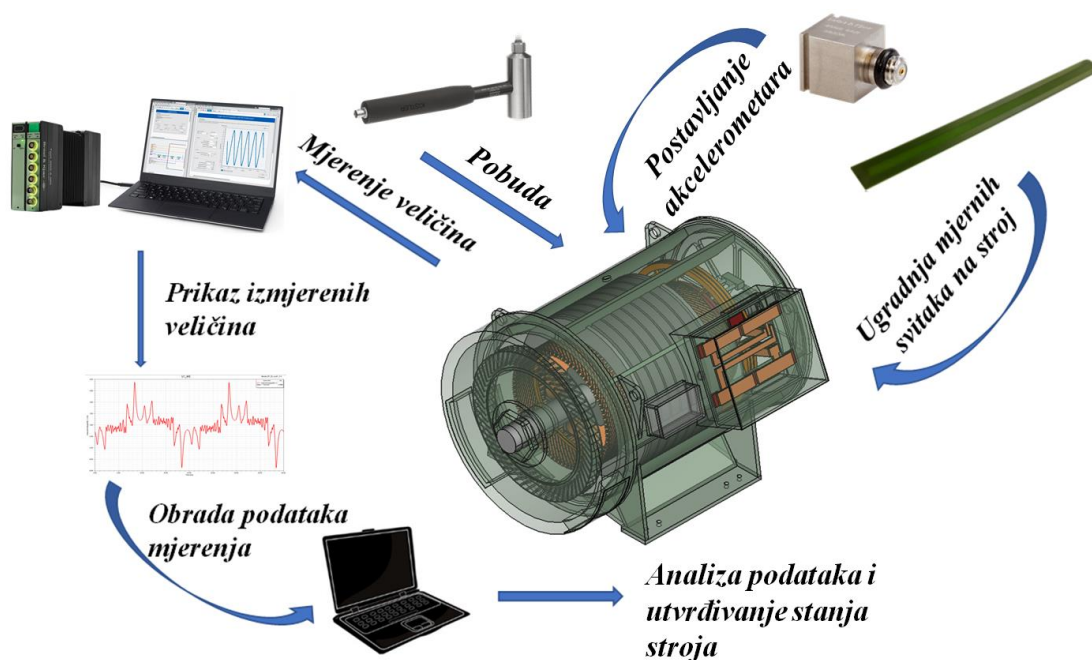
Tablica 3.2 Shema ožičenja priključne kutije s izvodima mjernih svitaka

| r.br.  | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| svitak | <i>Ms1</i> | <i>Ms2</i> | <i>Ms3</i> | <i>Ms5</i> | <i>Ms6</i> | <i>Ms8</i> | <i>Ms7</i> | <i>Ms4</i> |
| žica   | P   C      | P   C      | P   C      | P   C      | P   C      | P   C      | P   C      | P   C      |

### 3.2. Mjerna oprema

Za provedbu ispitnih mjerenja korištene su metode i tehnička rješenja prisutna u monitoringu rotacijskih strojeva, kao i oprema koja se uobičajeno koristi kod ispitivanja odnosno dijagnostike električnih rotacijskih strojeva. Principijelna shema mjernog sustava prikazana je na slici 3.11, koja je sastavljena od:

- objekta promatranja – sinkroni generator,
- mjernih senzora – mjerni svitci, akcelerometri *Brüel & Kjaer CCLD 4508*, senzor brzine vibracija *Brüel & Kjaer VS 80*
- impulsnog čekića za utvrđivanje vlastitih frekvencija *Kistler 9724A*,
- mjerne akvizicijske stanice *Brüel & Kjaer PULSE Lan XI 3050-A-060*,
- prijenosa podataka mjerenja na računalo,
- obrade i analize izmjerenih veličina.

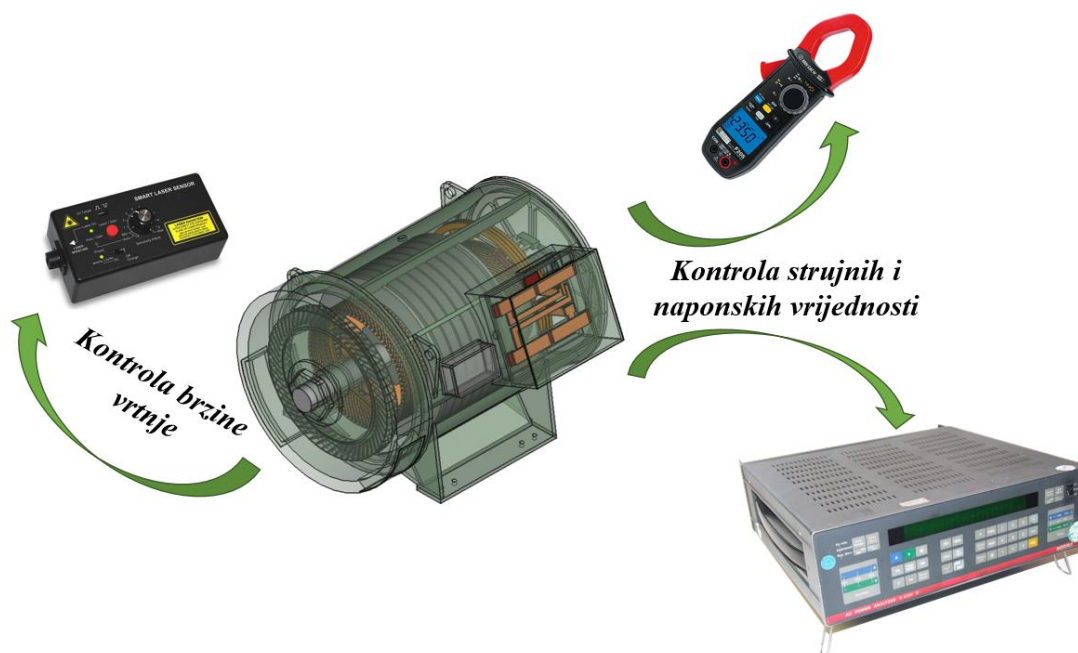


Slika 3.11 Principijelna shema ispitnog mjernog sustava

Osim osnovnih elemenata navedenih principijelnom shemom, tijekom ispitivanja korištena je i dodatna oprema za provedbu kontrolnih mjerenja pri postavljanju ispitivanih pogonskih stanja:

- analizator snage tip *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*,
- prijenosna baterijska strujna kliješta *Chauvin Arnoux F 407*,
- beskontaktni laserski senzor za mjerenje brzine vrtnje, tip *SLS -115/230*.





Slika 3.12 Principijelna shema kontrolnih mjerenja

Terećenje generatora izvedeno je pasivnim teretom spojenim na stezaljke armaturnog namota. Pasivni teret sastojao se je od:

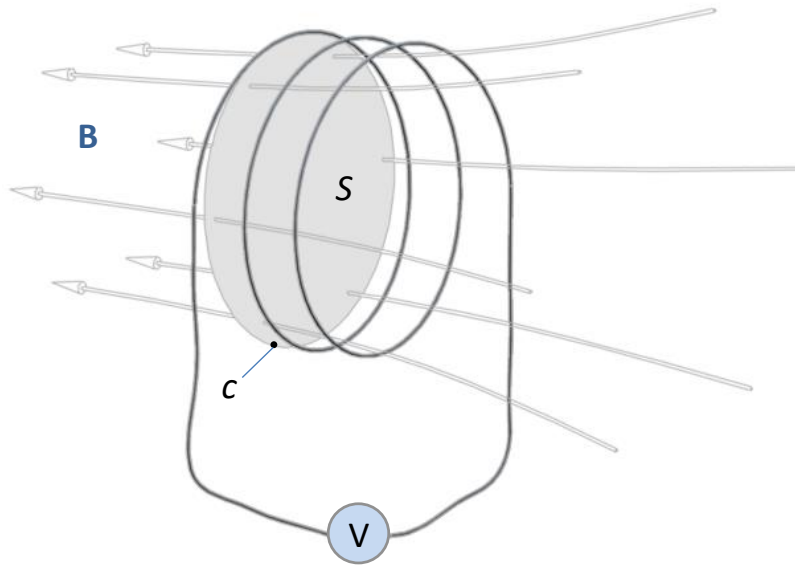
- kaskade omskih otpornika korištene za promjenu radnog opterećenja,
- trofazne regulacijske prigušnice za promjenu induktivnog opterećenja.



Slika 3.13 Kaskada otpornika (lijevo) i prigušnica promjenjivog induktiviteta (desno) korišteni za pasivno terećenje generatora

### 3.2.1. Mjerni svitak

Senzori korišteni za verifikacijska elektromagnetska mjerenja su mjerni svitci ugrađeni u na zube statora u zoni zračnog raspora generatora. Njima se mjeri napon induciran u svitku uslijed promjenjivog magnetskog toka obuhvaćenog tim svitkom, slika 3.14. Po zakonu elektromagnetske indukcije, *inducirani napon u strujnom krugu jednak je brzini kojom se mijenja magnetski tok ulančen strujnim krugom, a smjer induciranog napona je takav da protjera struje koje se protive promjeni toka* [32]. Napon induciran u ovakvom mjernom svitku koristi se potom u daljnjoj obradi i analizi sa svrhom otkrivanja pojedinog specifičnog kvara motora.



Slika 3.14 Definicija elektromagnetske indukcije [7]

Inducirani napon u vodljivoj petlji površine  $S_{sv}$ , koja je obrubljena konturom  $c$ , razmjeran je vremenskoj promjeni magnetskog toka koji petlja obuhvaća:

$$u_{ind} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} \cdot dS_{sv} \quad (3.1)$$

Ako se uzme da se smjer polja podudara s normalom površine, u kojoj leži vodljiva petlja onda je:

$$u_{ind} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} \cdot dS_{sv} = -\frac{dB}{dt} \cdot S_{sv} \quad (3.2)$$

Za vremensku promjenu magnetske indukcije:

$$B = B_m \sin(\omega \cdot t) \quad (3.3)$$

inducirani napon je:

$$u_{ind} = B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot S_{sv} \quad (3.4)$$

Za petlju s  $N_{sv}$  zavoja, odnosno svitak, inducirani napon jednak je:

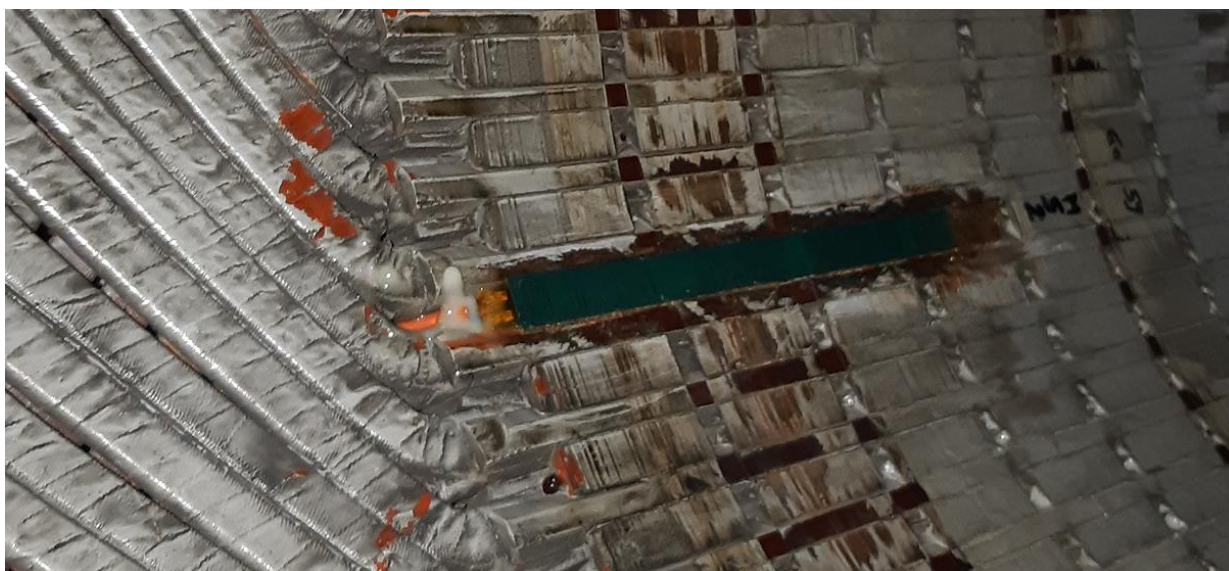
$$u_{ind} = B_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot S_{sv} \cdot N_{sv} \quad (3.5)$$

Na slici 3.15 prikazana je izvedba mjernog svitka izrađenog u PCB tehnici (engl. *PCB – printed circuit board* ili tiskana pločica). Svitci u PCB tehnici (mjerni svitak s točno određenim brojem zavoja utisnut je na tiskanu pločicu), koji su ugrađeni na objekt mjerenja, po dimenzijama su usklađeni s radijalnom površinom statorskog zuba. Na svitak je utisnuto 5 zavoja, kako bi razina induciranog napona u svitku bila dovoljna za utvrđivanje nejednakosti između različitih pogonskih stanja. Širina svitka (11,7 mm) određena je u skladu sa širinom radijalne plohe zuba statora, dok su debljina (0,24 mm) i duljina (198 mm) određene prema tehničkoj procjeni, kojom je uzeta u obzir mogućnost ugradnje svitka u odnosu na širinu zračnog raspora i duljinu statorskog paketa (tablica 3.1). Svitci se na zub statora učvršćuju odgovarajućim dvokomponentnim ljepilom, čime je u potpunosti osigurano da izdrže sva električna, termička i mehanička naprezanja.



Slika 3.15 Mjerni svitak izrađen u PCB tehnologiji

Primjer ugradnje mjernih svitaka na sinkroni generator prikazan je na slici 3.16. Svitci su na zube statora ugrađeni po rasporedu koji omogućuje utvrđivanje postojanja električne i magnetske nesimetrije opisane u sljedećem poglavlju.



Slika 3.16 Mjerni svitak ugrađen na zub paketa statora

### 3.2.2. Akcelerometar

Senzore koji mjere ubrzanje nazivamo akcelerometrima. Ovakvi uređaji često se koriste u mjerenjima vezanima za vibracije. Njihov rad temelji se na Newtonovom zakonu gibanja, izraženog jednadžbom (3.6), u kojoj ja s  $F$  označena sila, s  $a$  akceleracija i s  $m$  poznata masa tijela koje se giba.

$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m} \quad (3.6)$$

Ovo znači da se akceleracija određuje posredno, na osnovi mjerenja sile koja djeluje na tijelo pri njegovom ubrzavanju.

Za potrebe mjerenja vibracija električnih strojeva pogodno je koristiti akcelerometre koje odlikuju volumen manji od 1 cm<sup>3</sup>, masa od nekoliko grama, širok raspon radnih temperatura (-50 do +250 °C), radni frekvencijski opseg od 0,5 do 15000 Hz, mjerna osjetljivost od 1÷100 mV/g, mehanička robusnost i mogućnost spajanja na akvizicijsku opremu s dugačkim jeftinim kabelima. Ovakve zahtjeve ispunjavaju akcelerometri koji djeluju na bazi piezoelektričnog efekta.

Piezoelektričnim efektom nazivamo pojavu kod koje se po površini nekih materijala pojavljuje električni naboj uslijed deformacija volumena tog materijala nastalih pod utjecajem sile. Ova pojava posebno dolazi do izražaja kod određenih monokristala (kvarc, *Seignetteova* sol, *Rochelleova* sol, amonijev-dehidrofosfat), polikristala određenih keramika (PZT-5, BaTiO<sub>3</sub>) i određenih polimera, kao npr. polivinidilen fluorid (PVDF).

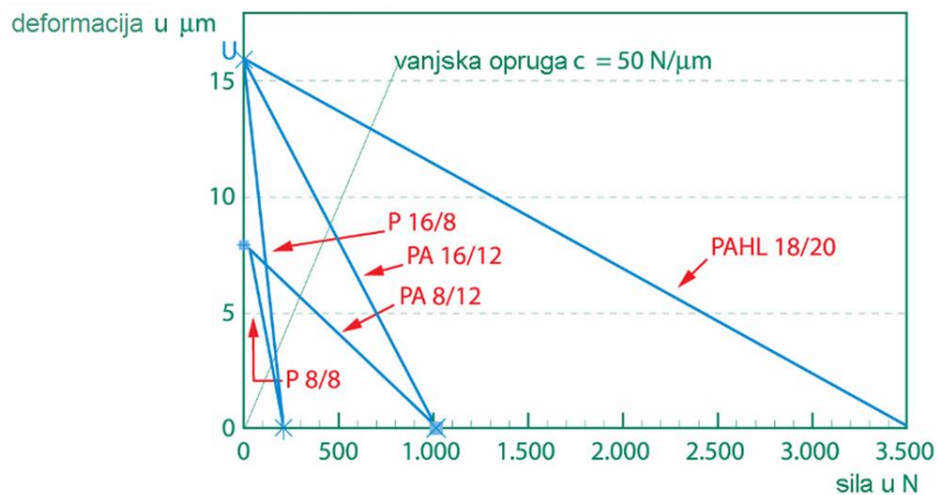
Između primijenjene sile i deformacije piezoelektričnog materijala postoji linearna veza (slika 3.17). Stoga vrijedi sljedeća ovisnost napona  $U$  (na električnim stezaljkama pretvornika) o sili  $F$ :

$$U = \frac{\alpha \cdot F}{C} \quad (3.7)$$

gdje  $C$  predstavlja električki kapacitet a  $\alpha$  piezoelektrični modul upotrijebljenog materijala.

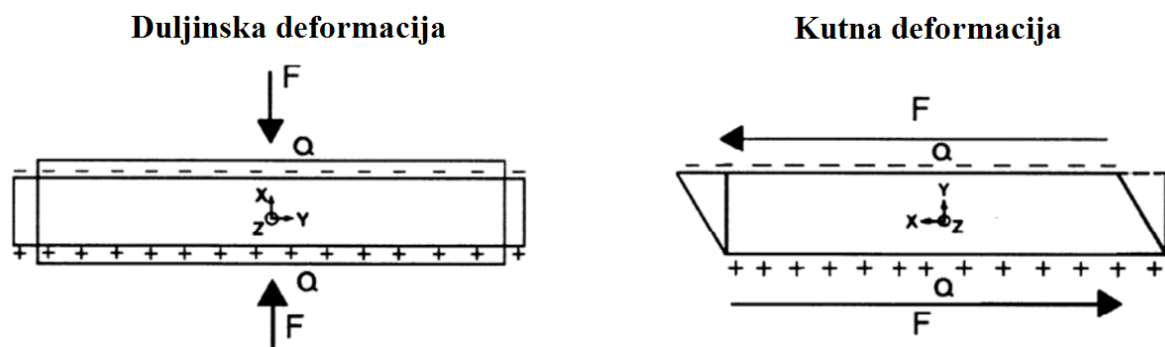
Budući da za piezoelektrične materijale vrijedi linearna ovisnost izlaznog napona o primijenjenoj sili, moguće ih je upotrijebiti i za mjerenje akceleracije. Temeljem jednadžbi (3.6) i (3.7) dobiva se izraz:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{U \cdot C}{\alpha \cdot m} \quad (3.8)$$



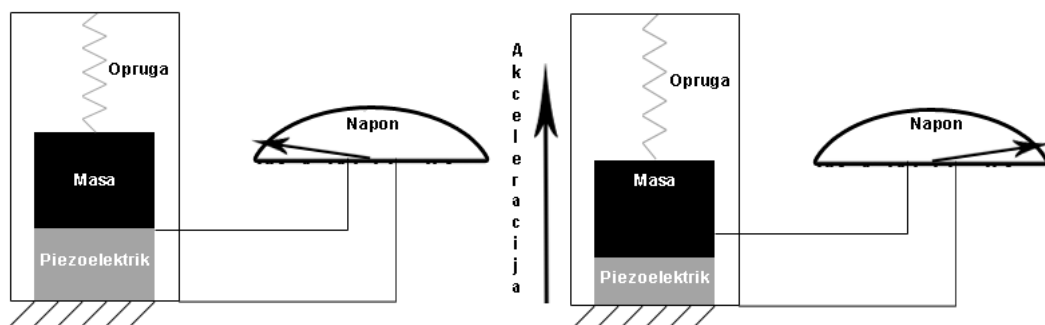
Slika 3.17 Ovisnost deformacije piezoelektrika o primijenjenoj sili [42]

Osim o materijalu, piezoelektrični modul ovisi i o vrsti deformacije (slika 3.18), pa tako za kvarc kod duljinske deformacije piezoelektrični modul iznosi  $\alpha = 2,3 \text{ pC/N}$ , a za slučaj kutne deformacije  $\alpha = 4,6 \text{ pC/N}$ .



Slika 3.18 Vrste rastezanja piezoelektričnog materijala [43]

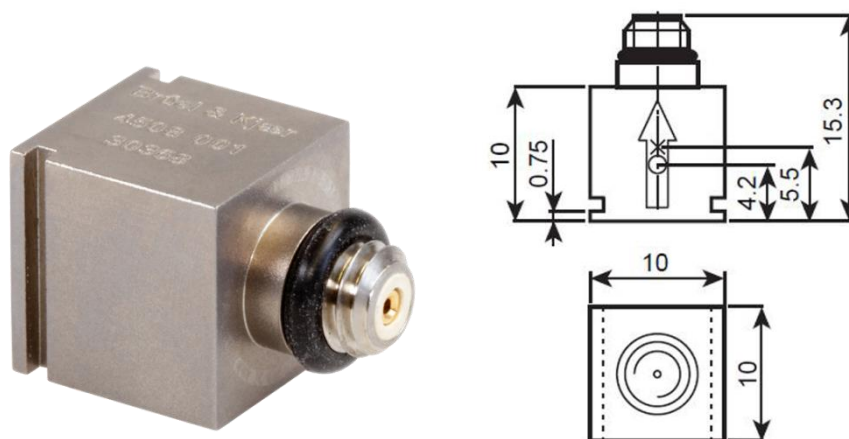
Ovakvi akcelometri sastoje se od tzv. seizmičke mase koju prilikom mirovanja i jednolikog gibanja u neutralnoj poziciji zadržavaju opruge. Prilikom ubrzavanja ta masa svojom inercijskom silom djeluje na piezoelektrični pretvornik (slika 3.19).



Slika 3.19 Princip mjerenja ubrzanja pomoću piezoelektrika [44]



Za potrebe ispitnih mjerenja korišteni su piezoelektrični akcelometri *proizvođača Brüel & Kjaer* tipa *CCLD 4508*, čije su dimenzije prikazane slikom 3.20, a tehničke specifikacije tablicom 3.3.



Slika 3.20 Izgled akcelometra tipa *CCLD 4508* i dimenzije prikazane u milimetrima [38]

Tablica 3.3 Tehničke specifikacije akcelometra tipa *CCLD 4508*

| Specifikacija                                              | CCLD 4508                              |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Raspon radne frekvencije                                   | 0,3 – 8000 Hz                          |
| Radna temperatura                                          | -54 ... +121 °C                        |
| Naponska osjetljivost                                      | 10 mV / (ms <sup>2</sup> ) (98 mV / g) |
| Rezidualna smetnja u opsegu radnih frekvencija (efektivno) | 350 µg (35 mV)                         |
| Maksimalna sinusna radna akceleracija (vršna vrijednost)   | 70 g                                   |
| Maksimalna nedestruktivni udar (vršna vrijednost)          | 5000 g (50 km/s <sup>2</sup> )         |
| Vlastita frekvencija                                       | 25 kHz                                 |
| Vrsta konektora                                            | 10-32 UNF                              |
| Tip izlaza                                                 | CCLD                                   |
| Način montaže                                              | M3 vijak ili ljepilo                   |
| Izlazna jedinica                                           | mV                                     |
| Težina                                                     | 4.8 g                                  |
| Dimenzije                                                  | 10 x 10 x 10 mm                        |
| Materijal kućišta                                          | Titan ASTM gradacije 2                 |

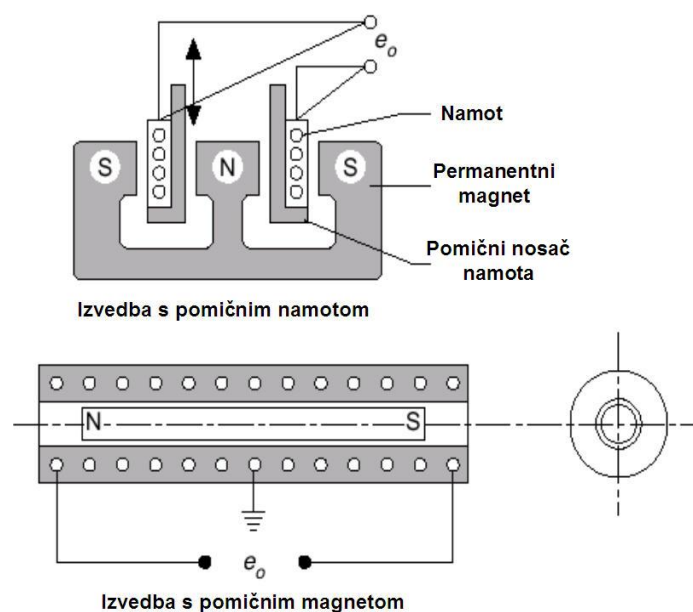
### 3.2.2. Senzor brzine pomaka

Ukoliko se želi mjeriti brzina vibracija, moguće je upotrijebiti pretvornike linearne brzine poznate pod kraticom VLT (kratica od engleskog naziva '*Velocity Transducer*'). Navedeni senzori sastoje se od svitka smještenog u magnetsko polje permanentnog magneta. Vibracijama uzrokovano gibanje dovodi do induciranja napona u svitku. Iznos induciranih napona proporcionalan je brzini gibanja svitka. Ako se s  $v$  označi translacijska brzina gibanja između magneta i svitka, s  $l$  duljina namota, a s  $B$  magnetska indukcija, pri čemu je izvedbom senzora osigurano da su smjerovi gibanja svitka, poprečne površine svitka i magnetskog toka međusobno okomiti, tada za inducirani napon  $U$  vrijedi izraz:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (3.9)$$

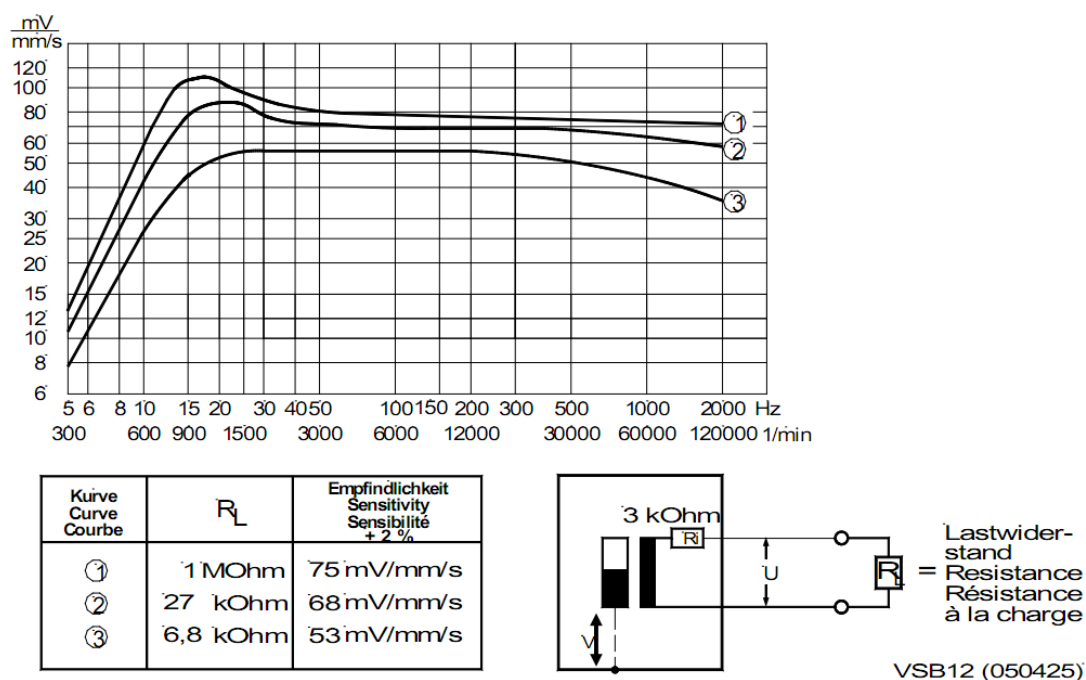
Frekvencijski odziv ovakvih senzora nalazi se u rasponu od 10 do 1000 Hz, što može ograničiti primjenu ukoliko se senzor koristi za mjerenje vibracija. Osim za mjerenje brzine vibracija, ovakvi senzori mogu se upotrijebiti i za utvrđivanje iznosa linijskog pomaka.

Zbog gravitacijske sile razlikuju se izvedbe namijenjene horizontalnom i vertikalnom radu, pa prilikom odabira senzora treba na ovo obratiti pažnju. Po izvedbi se mogu podijeliti još i na senzore s pomičnim magnetom i na one s pomičnim svitkom. Kako senzor mjeri brzinu/vibracije samo u jednom smjeru, za potpunu sliku gibanja u nekoj ravnini koriste se tri senzora, međusobno zakrenuta za  $45^\circ$ .



Slika 3.21 Shematski prikaz VLT pretvornika linearne brzine s pomičnim svitkom (gornji) i pomičnim magnetom (donji) [45]

Mjerenje brzine vibracija u vertikalnoj osi ispitivanog generatora provedeno je upotrebom senzora oznake *VS – 080* proizvođača *Brüel & Kjaer*. Mjerne karakteristike senzora prikazane su slikom 3.22, a osnovni tehnički podaci dani su tablicom 3.4.



Slika 3.22 Ovisnost izlaznog napona  $U$  o mjerenoj brzini vibracija senzora *VS – 080* [39]

Tablica 3.4 Tehničke specifikacije senzora brzine tipa *VS – 080*

| Specifikacija                          | VS – 080                                                                           |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Mjerena veličina                       | Brzina vibracija                                                                   |
| Smjer mjerenja                         | Horizontalno i vertikalno                                                          |
| Naponska osjetljivost pri $f = 80$ Hz  | $E = \frac{75 \text{ mV}}{\text{mm/s}} \times \frac{R_L}{3 \text{ k}\Omega + R_L}$ |
| Unutarnja impedancija                  | $3 \text{ k}\Omega \pm 5 \%$                                                       |
| Osjetljivost na poprečnu pobudu        | $\leq 5 \%$                                                                        |
| Vlastita frekvencija $f_0$             | $15 \text{ Hz} \pm 5 \%$                                                           |
| Temperaturni radni opseg               | $-40 \dots +80 \text{ }^\circ\text{C}$                                             |
| Maksimalni dopustivi vibracijski pomak | $\pm 1 \text{ mm}$                                                                 |
| Maksimalna duljina spojnog kabela      | 200 m                                                                              |
| Tip zaštite                            | IP 44                                                                              |
| Način montaže                          | M8 vijak duljine 14 mm                                                             |
| Izlazna jedinica                       | mV                                                                                 |
| Težina                                 | $\sim 250 \text{ g}$                                                               |



### 3.2.2. Impulsni čekić

Alat koji služi za stvaranje impulsa sile, potrebnih za utvrđivanje vlastitih frekvencija ispitivanog objekta, naziva se impulsnim čekićem. Udarno čelo čekića od nehrđajućeg čelika sadrži akcelerometar niske impedancije izrađen na bazi kvarca. Na ovaj dio čekića mogu se pričvrstiti nastavci od gume, plastike i čelika različite tvrdoće, čime se omogućuje promjena vrste pobudnog udara. Na taj način može se mijenjati raspon pobuđenih frekvencija i mjerenja provoditi na konstrukcijama različite debljine.

Za ispitna mjerenja korišten je udarni čekić tipa 9724A2000 tvrtke Kistler. Izgled ovog čekića prikazan je slikom 3.23, a osnovni tehnički podaci dani su tablicom 3.5.



Slika 3.23 Prikaz impulsnog čekića Kistler 9724A2000

Tablica 3.5 Tehničke specifikacije impulsnog čekića Kistler 9724A2000

| Specifikacija                                      | Kistler 9724A200 |
|----------------------------------------------------|------------------|
| Raspon sile                                        | 0 ... 2220 N     |
| Maksimalna sila                                    | 11100 N          |
| Nazivna osjetljivost                               | 2,25 mV/N        |
| Vlastita frekvencija                               | 27 kHz           |
| Radni raspon frekvencija s čeličnim vrhom (~10 dB) | 6600 Hz          |
| Nazivna vremenska konstanta                        | 500 s            |
| Krutost                                            | 840 N/ $\mu$ m   |
| Temperaturni radni opseg                           | -20 ... +70 °C   |
| Puni opseg izlaznog napona                         | $\pm$ 5 V        |
| Izlazna impedancija                                | > 100 $\Omega$   |
| Napon napajanja                                    | 20 ... 30 V      |
| Stalna struja napajanja                            | 2 ... 20 mA      |
| Težina                                             | 250 g            |
| Promjer udarne glave                               | 23 mm            |
| Duljina tijela                                     | 90 mm            |
| Duljina ručke                                      | 230 mm           |

### 3.2.3. Akvizicijska mjerna stanica

Mjernom akvizicijskom stanicom *Pulse LAN-XI* snimani su naponi inducirani u mjernim svitcima te naponski signali akcelerometara. Proizvođač mjerne stanice je tvrtka *Brüel & Kjaer*. Na slici 3.24 prikazana je korištena mjerna stanica s *LAN-XI* modulima za akviziciju podataka, a u tablici 3.6 dani su tehnički podatci opreme preuzeti iz kataloga proizvođača. *LAN-XI* procesne jedinice omogućuju prihvata 3 do 12 ulaznih mjernih signala (ovisno o odabranom modulu) i njihov prolaz kroz visokopropusni filtar. Analogni ulazni analogni signal pretvaraju u digitalni podatak, te proslijeđuju podatke prema računalu ili *PULSE* mjernoj centrali.



Slika 3.24 Mjerna stanica *PULSE* s *LAN-XI* procesnim modulima [40]

Modularan dizajn omogućuje objedinjavanje do 11 *LAN-XI* jedinica u složeniju akvizicijsku strukturu, a moguće je i svaki modul koristiti zasebno. *LAN-XI* jedinicu najjednostavnije je spajati s računalom putem standardnog mrežnog kabela. Budući da modul ima potrošnju <20 W, veza upotrebom mrežnog kabela ujedno služi i za električno napajanje modula.

U slučajevima gdje elektromagnetske smetnje ometaju bežičnu komunikaciju, a prijenos informacija mrežnim kabelom nije izvediv, mjerene podatke moguće je spremiti na memorijsku mikro-SD karticu veličine do 16 GB.

Kada je u pitanju mjerenje vibracija na generatoru, upotrebom akcelerometra tipa *CCLD 4508*, pogodno je za akviziciju koristiti *LAN-XI* modul tipa *3050*. Po specifikacijama ova jedinica omogućuje prihvata izmjeničnih signala naponske razine  $\pm 10$  V frekvencije do 52 kHz, uz 24 bitnu rezoluciju podataka.

Upotrebom računalnih programa *PULSE Labshop* ili *Test for I-deas software* moguće je mijenjati frekvenciju uzorkovanja podataka (10 Hz - 115 kHz) i propusnost visokopropusnog filtra (0,05 do 115 Hz). Uz linearnost na punom mjernom području 0-160 dB unutar  $\pm 1$  dB, točnost od  $\pm 0,1$  dB za mjerno područje od 1 kHz i smetnje  $< 1200 \mu V_{ef}$ , garantiraju se pojačanje od 0,6 dB uzrokovano limiterom ulaznog napona i fazno odstupanje unutar  $\pm 0,005^\circ$ .

Tablica 3.6 Tehničke specifikacije akvizicijskog modula LAN-XI 3050

|                                              |                                                            |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Ulazne karakteristike                        | LAN-XI 3050                                                |
| Opseg frekvencije ulaznih i izlaznih signala | 0 do 51,2 kHz                                              |
| Broj ulaznih signala po modulu               | 6                                                          |
| A/D pretvorba                                | 2 x 24 bit                                                 |
| Prijenos podataka                            | 24 bit                                                     |
| Mjerni napon ulaznih signala                 | Do $10 V_{vršno}$ / povećani opseg do $31,6 V_{vršno}$     |
| Maksimalni ulazni napon bez oštećenja        | $\pm 60 V_{vršno}$                                         |
| Ulazna impedancija                           | CCLD: $> 100 k\Omega \parallel < 300 pF$                   |
| Maksimalna smetnja u mjernom rasponu do 10 V | $< 125 nV_{ef} / Hz$                                       |
| Apsolutna naponska greška pri 1 kHz i 1 V    | do $\pm 0,05$ dB (12,2 %)<br>tipično $\pm 0,01$ dB (2,3 %) |
| Izlazni konektor                             | 2 x BNC                                                    |
| Izlazna vrijednost DC napona                 | 0 do $\pm 10$ V                                            |
| Izlazna vrijednost AC napona                 | $10 V_{vršno}$                                             |
| Izlazna impedancija                          | $50 \Omega$                                                |
| Greška izlazne frekvencije                   | 0,00025 %                                                  |
| Rezolucija frekvencije                       | 1 mHz (definirana u PULSE softveru)                        |
| Težina                                       | 750 g                                                      |
| Dimenzije (ŠxDxV)                            | 27,5 x 250 x 132,6 mm                                      |
| Operacijski sustav                           | Microsoft® WINDOWS®                                        |

### 3.2.4. Analizator snage

Postavljanje generatora u odabrana stanja opterećenja zahtjeva izmjere faznih struja, linijskih napona i faktora snage. Ove vrijednosti kontrolno su mjerene upotrebom analizatora snage *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*, čije su tehničke karakteristike dane tablicom 3.7.

Analizator snage je precizni digitalni vatmetar. Ovakav instrument moguće je upotrijebiti za ispitivanje različitih vrsta električnih uređaja (npr. transformatora, generatora i motora), bilo za izmjeničnu ili istosmjernu struju. Na stezaljke analizatora dovode se tri signala proporcionalna mjerenom naponu i tri signala proporcionalna mjerenoj struji. Iz ovih veličina pomoću ugrađenog mikroprocesora izračunavaju se: radna, jalova i prividna snaga, faktor snage, impedancija, radni otpor i druge specifične veličine vezane uz objekt ispitivanja. Prilikom provedenih ispitivanja napon je mjeran izravno na mjernom području do 520 V, dok je struja mjerena na području 50 A preko strujnih mjernih transformatora kojima je prijenosni omjer 10:1.

Tablica 3.7 Tehnički podaci analizatora snage *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*

| Ulazne karakteristike            | NORMA AC Power Analyzer D 5255 S                                                                                                                                                  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Broj ulaznih kanala              | 3 naponska ulaza<br>3 strujna ulaza                                                                                                                                               |
| Mjerna područja strujnih kanala  | 0,1-0,2-0,5-1-2-5-10-20-50 ampera<br>dozvoljeno preopterećenje 60 A trajno, 100 A kratkotrajno (5 sekundi)                                                                        |
| Mjerna područja naponskih kanala | 65-130-260-520-650 volti<br>dozvoljeno preopterećenje 800 V trajno, 1.4 kV kratkotrajno (5 sekundi)                                                                               |
| Razlučivost                      | 10 $\mu$ A za mjerenje struje<br>10mV za mjerenje napona<br>1 mW za mjerenje snage<br>1 mWh za mjerenje energije                                                                  |
| Točnost mjerenja napona i struje | $\pm (0,1 \% \text{ izmjerene vrijednosti} + 0,1 \% \text{ mjernog područja})$<br>NAPOMENA: uz frekvenciju mjernog signala od 45 do 65 Hz                                         |
| Točnost mjerenja radne snage     | za $\cos\varphi = 1 \pm 0,1 \% \text{ mjernog područja}$<br>za $\cos\varphi = 0,1 \pm 0,5 \% \text{ mjernog područja}$<br>NAPOMENA: uz frekvenciju mjernog signala od 45 do 65 Hz |
| Točnost mjerenja prividne snage  | suma pogrešaka pri mjerenju napona i struje                                                                                                                                       |
| točnost mjerenja faktora snage   | suma pogrešaka pri mjerenju prividne i radne snage                                                                                                                                |
| Temperaturni koeficijent         | $< 0,1 \% \text{ mjernog područja po kelvinu za mjerenja napona, struje i radne snage}$                                                                                           |
| dugoročna točnost                | $\pm 0,02 \% \text{ mjernog područja godišnje za mjerenja napona, struje i radne snage}$                                                                                          |
| vrijeme mjerenja                 | 480 ms uz napon napajanja 50 Hz                                                                                                                                                   |



Slika 3.25 Analizator snage *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S* [41]

### **3.2.4. Mjerna nesigurnost**

Mjerna nesigurnost u širem smislu znači sumnju u valjanost mjernog rezultata, a definira se kao parametar pridružen rezultatu mjerenja, a opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Budući da se u disertaciji provode eksperimentalna mjerenja, u kojima se koriste mjerni uređaji te se u konačnici želi provjeriti i potvrditi metodologija detekcije kvarova rotora analizirana MKE proračunom, potrebno je iskazati mjernu nesigurnost. Na rezultate cjelokupnog mjerenja, a time i na određivanje ukupne mjerne nesigurnosti utječu sljedeći parametri:

- točnost mjerne stanice *PULSE LAN-XI*,
- točnost analizatora snage *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*,
- nesavršenost ugradnje mjernih svitaka na statorski paket motora,
- dopuštena tolerancija širine zračnog raspora,
- nesavršenosti izrade konstrukcijskih dijelova stroja,
- pogreška ponovljivosti mjerenja induciranih napona u mjernim svitcima,
- pogreška ponovljivosti mjerenja vibracija pomoću akcelometara.

Postupak određivanja mjerne nesigurnosti proveden je prema izrazima i postupku koji se može pronaći u relevantnoj literaturi [33, 34]. Prvo je određena mjerna nesigurnost mjernih uređaja, a potom i ukupna nesigurnost mjerenja. U tablici 3.8 prikazana je mjerna nesigurnost određena za mjernu stanicu. Greška instrumenta i procijenjena nestabilnost izvora određeni su iz službene umjernice mjerne stanice, dok je doprinos ponovljivosti mjerenja određen na osnovi izmjerenih induciranih napona u mjernim svitcima dobivenim za ispravno stanje generatora (geometrijska os rotora podudara se s glavnom osi rotacije). Na osnovi svih doprinosa određena je mjerna nesigurnost mjerne stanice u iznosu od  $\pm 3,98$  %.

U tablici 3.9 prikazana je mjerna nesigurnost dobivena za analizator snage. Greška instrumenta i procijenjena nestabilnost izvora određeni su iz službene umjernice univerzalnog instrumenta, dok je doprinos ponovljivosti mjerenja određen iz karakteristika strujnih transformatora. Na osnovi svih prikazanih doprinosa određena je mjerna nesigurnost analizatora snage od  $\pm 4,2$  %.

Tablica 3.8 Mjerna nesigurnost mjerne stanice

| Doprinos                                                                | Maksimalna greška | Razdioba                 | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Ponovljivost mjerenja (mjerni svitci)                                   | $\pm 4,77$ %      | normalna, $k=2$          | $\pm 2,38$ %          | 1                         | $\pm 2,38$ %       |
| Greška senzora (akcelerometri)                                          | $\pm 5,0$ %       | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 2,89$ %          | 1                         | $\pm 2,89$ %       |
| Greška instrumenta (DC napon)                                           | $\pm 2,3$ %       | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 1,32$ %          | 1                         | $\pm 1,32$ %       |
| Nestabilnost izvora                                                     | 0,5 %             | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | 0,3 %                 | 1                         | 0,3 %              |
| $\sum MJ.STAN. = \sqrt{2,38^2 + 2,89^2 + 1,32^2 + 0,3^2} = \pm 3,98 \%$ |                   |                          |                       |                           |                    |

Tablica 3.9 Mjerna nesigurnost analizatora snage

| Doprinos                                                                    | Maksimalna greška | Razdioba                 | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Greška strujnog transformatora                                              | $\pm 4,2$ %       | normalna, $k=1$          | $\pm 4,2$ %           | 1                         | $\pm 4,2$ %        |
| Greška instrumenta (AC struja)                                              | $\pm 0,1$ %       | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 0,058$ %         | 1                         | $\pm 0,058$ %      |
| Greška instrumenta (AC napon)                                               | $\pm 0,1$ %       | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | $\pm 0,058$ %         | 1                         | $\pm 0,058$ %      |
| Nestabilnost izvora                                                         | 0,5 %             | pravokutna, $k=\sqrt{3}$ | 0,3 %                 | 1                         | 0,3 %              |
| $\sum UNIV.INSTR. = \sqrt{4,2^2 + 0,058^2 + 0,058^2 + 0,3^2} = \pm 4,21 \%$ |                   |                          |                       |                           |                    |

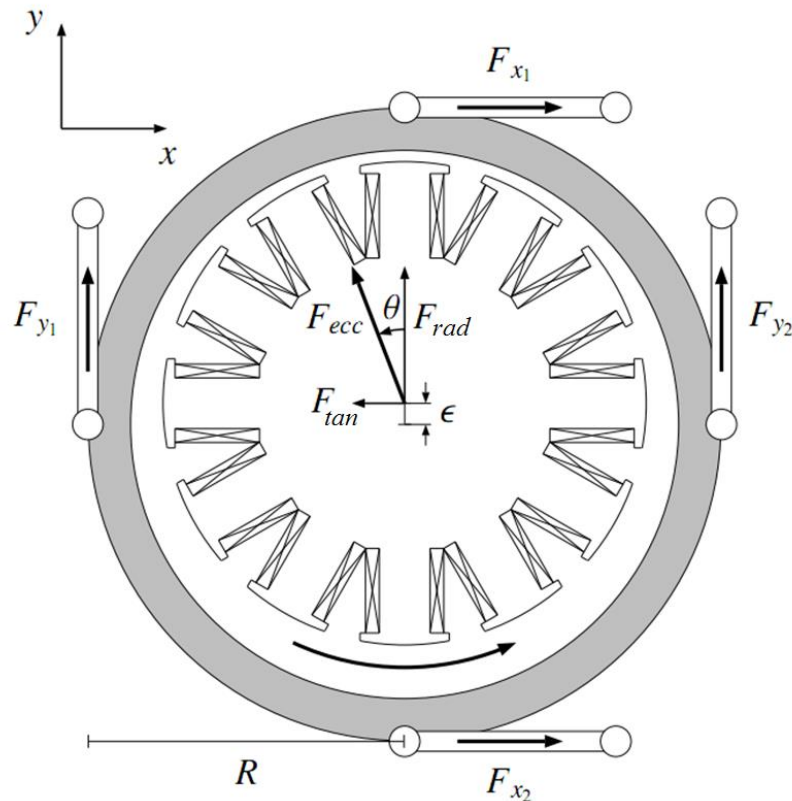
U tablici 3.10 navedena je ukupna mjerna nesigurnost, dobivena za eksperimentalno mjerenje zajedno s pojedinačnim doprinosom svakog faktora. Nadalje, utjecaj faktora nesavršenosti ugradnje mjernog svitka određen je na osnovi njegovih geometrijskih dimenzija i mjesta ugradnje (zub statora). Iznosi tolerancija na širinu zračnog raspora i dimenzije paketa statora definirani su temeljem dostupnih iskustvenih vrijednosti za sinkrone generatore srednjih snaga. Na osnovi svih prikazanih faktora određena je konačna ukupna mjerna nesigurnost eksperimentalnog mjerenja u iznosu od  $\pm 8,37\%$ . Ukoliko se cijeli postupak želi izraziti kao 95 % točnosti izračuna, tada je krajnji rezultat, odnosno ukupnu mjernu nesigurnost, potrebno povećati s faktorom  $k = 2$ . Dakle mjerna nesigurnost postupka tada iznosi  $\pm 16,75\%$ .

Tablica 3.10 Mjerna nesigurnost cjelokupnoga eksperimentalnog mjerenja

| Faktor                                                                                   | Maksimalna greška | Razdioba          | Standardna devijacija | Koeficijent osjetljivosti | Mjerna nesigurnost |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|
| Mjerna stanica                                                                           | $\pm 3,98\%$      | normalna, $k = 1$ | $\pm 3,98\%$          | 1                         | $\pm 3,98\%$       |
| Analizator snage                                                                         | $\pm 4,21\%$      | normalna, $k = 1$ | $\pm 4,21\%$          | 1                         | $\pm 4,21\%$       |
| Nesavršenost ugradnje mjernog svitka - uzdužno                                           | $\pm 1,60\%$      | normalna, $k = 1$ | $\pm 1,60\%$          | 1                         | $\pm 1,60\%$       |
| Nesavršenost ugradnje mjernog svitka - poprijeko                                         | $\pm 2,00\%$      | normalna, $k = 1$ | $\pm 2,00\%$          | 1                         | $\pm 2,00\%$       |
| Tolerancija nesimetrije zračnog raspora                                                  | 10,00 %           | normalna, $k = 2$ | 5,00 %                | 1                         | 2,50 %             |
| Tolerancija izrade statorskog paketa                                                     | 0,07 %            | normalna, $k = 1$ | 0,07 %                | 1                         | 0,07 %             |
| $\sum UK_{MU} = \sqrt{3,98^2 + 4,21^2 + 1,60^2 + 2,00^2 + 2,50^2 + 0,07^2} = \pm 8,37\%$ |                   |                   |                       |                           |                    |
| $\sum MU_{POSTUPAK} = \sum UK_{MU} \times 2 = \pm 9,86\% \times 2 = \pm 16,75\%$         |                   |                   |                       |                           |                    |

#### 4. Magnetske sile i inducirani napon mjernih svitaka

Magnetske sile koje djeluju unutar električnog stroja teško je mjeriti izravnim putem. Za potrebe eksperimentalnih istraživanja moguće je stroj izvesti na poseban način, tako da je aktivni dio statora povezan s vanjskim kućištem preko tenzometara [16].

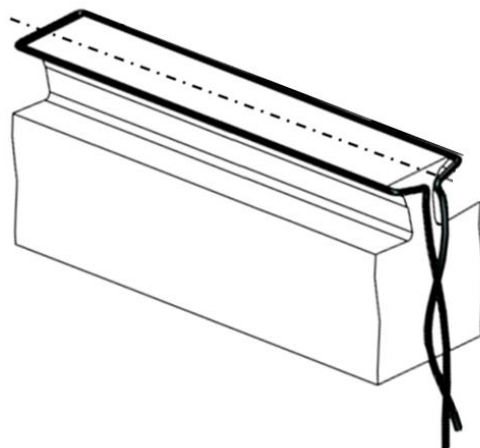


Slika 4.1 Izravno mjerenje sile koja djeluje na paket statora. Stator stroja povezan s vanjskim kućištem preko tenzometara [16].

Navedenim pristupom moguće je odrediti ukupnu silu koja djeluje na stator stroja i oscilacije u iznosu te sile, koje mogu biti posljedica nesimetrije magnetskog polja. Uslijed nestandardne izvedbe ukruta, uvođenje ovakvog mjerenja sile može dovesti do povećanja troškova u izradi novog generatora, pa može biti teško primjenjivo na postojećim strojevima.

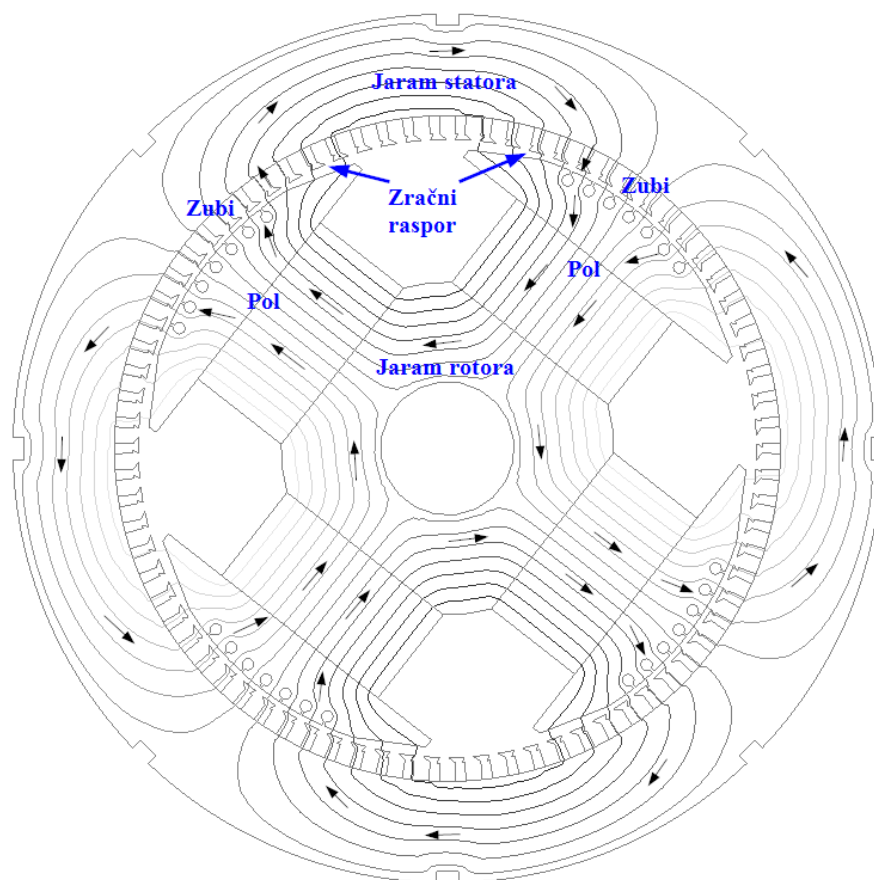
Nova metoda omogućuje analizu radijalne sile koja djeluje na zub paketa statora i utvrđivanje pojave nesimetrije u silama temeljem mjerenja napona inducirano u mjernim svitcima ugrađenim na zube statora uz zračni raspor. Slika 4.2 prikazuje način ugradnje mjernog svitka na zub električnog rotacijskog stroja. U nastavku je ukratko opisana sama metoda i njezino korištenje.



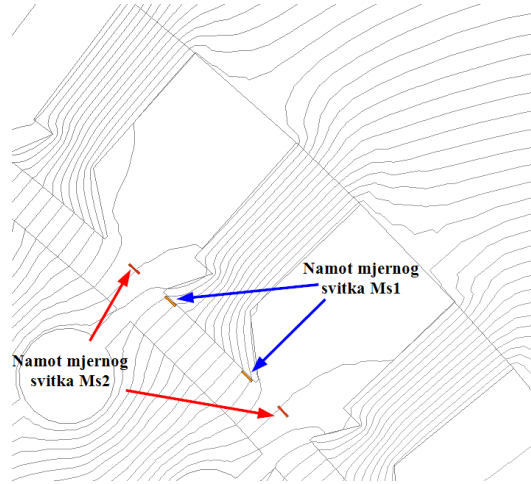


Slika 4.2 Način ugradnje svitka za mjerenje magnetskog polja na radijalnu plohu zuba paketa statora električnog stroja

Glavni magnetski tok sinkronog generatora s istaknutim polovima zatvara se putem koji obuhvaća: jaram statora → zube statora → zračni raspor → pol rotora → jaram rotora → susjedni pol rotora → zračni raspor → zube statora → početna pozicija u jarmu statora. Opisani put (magnetski krug stroja) grafički je prikazan silnicama magnetskog polja na slici 4.3.



Slika 4.3 Put glavnog magnetskog toka četveropolnog generatora s istaknutim polovima



Slika 4.4 Put magnetskog toka u zoni zračnog raspora

Većina silnica magnetskog toka pri prolazu kroz zračni raspor ulazi u stator kroz radijalnu plohu zuba, dok njihov manji dio u zub ulazi kroz bočne površine zuba (slika 4.4). O širini namota mjernog svitka, smještenog na radijalnu plohu zuba, ovisi količina obuhvaćenog magnetskog toka koji ulazi u zub. Tako će svitkom sa slike 4.4 označenim kao  $Ms1$  biti obuhvaćen manji magnetski tok nego svitkom  $Ms2$ .

Magnetski tok  $\phi_{Ms}$  obuhvaćen mjernim svitkom od  $N_{sv}$  zavoja i inducirani napon u svitku  $u_{ind Ms}$  povezuje izraz (4.1)

$$u_{ind Ms} = -N_{sv} \cdot \frac{d\phi_{Ms}}{dt} \Rightarrow d\phi_{Ms} = -\frac{u_{ind Ms}}{N_{sv}} \cdot dt \quad (4.1)$$

U slučaju mjerenja tj. određivanja magnetskog toka na temelju diskretiziranog broja mjernih točaka, izraz (4.1) prelazi u oblik (4.2) gdje je sa  $\Delta t$  označen vremenski period uzorkovanja, a sa  $\Delta\phi$  promjena magnetskog toka kroz dotični period.

$$\Delta\phi_{Ms} = -\frac{u_{ind Ms}}{N_{sv}} \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

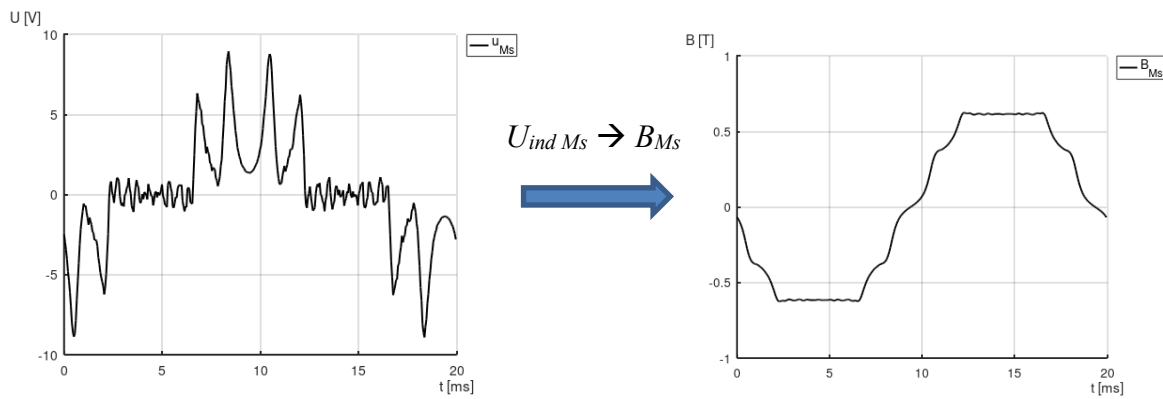
Iz snimke induciranog napona u  $n_t$  vremenskih točaka, iznos magnetskog toka za svaki vremenski trenutak  $t$  određuje se kao:

$$\phi_{Ms t} = -\frac{u_{ind Ms t}}{N_{sv}} \cdot \Delta t, \quad t = 1 \quad (4.3)$$

$$\phi_{Ms t} = \phi_{Ms t-1} - \frac{u_{ind Ms t}}{N_{sv}} \cdot \Delta t, \quad t \in [2, 3 \dots n_t] \quad (4.4)$$

Vremenska promjena magnetske indukcije mjernog svitka  $B_{Ms}$  određuje se iz valnog oblika magnetskog toka za svaki vremenski trenutak  $t$  na temelju izraza (4.5), u kojem  $S_{Ms}$  predstavlja površinu omeđenu mjernim svitkom.

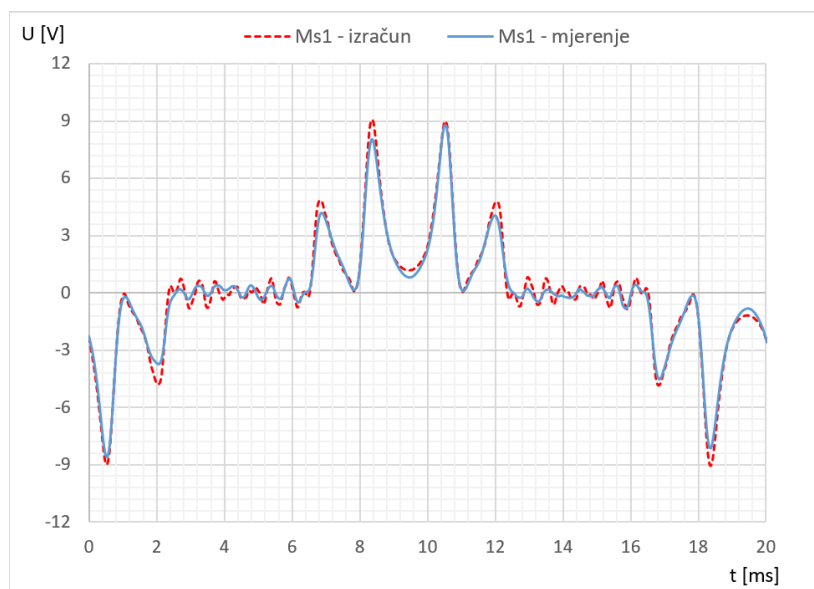
$$B_{Ms t} = \frac{\phi_{Ms t}}{S_{Ms}} \quad t \in [1, 2 \dots n_t] \quad (4.5)$$



Slika 4.5 Pretvorba induiranog napona mjernog svitka  $u_{ind Ms}$  u magnetsku indukciju svitka  $B_{Ms}$

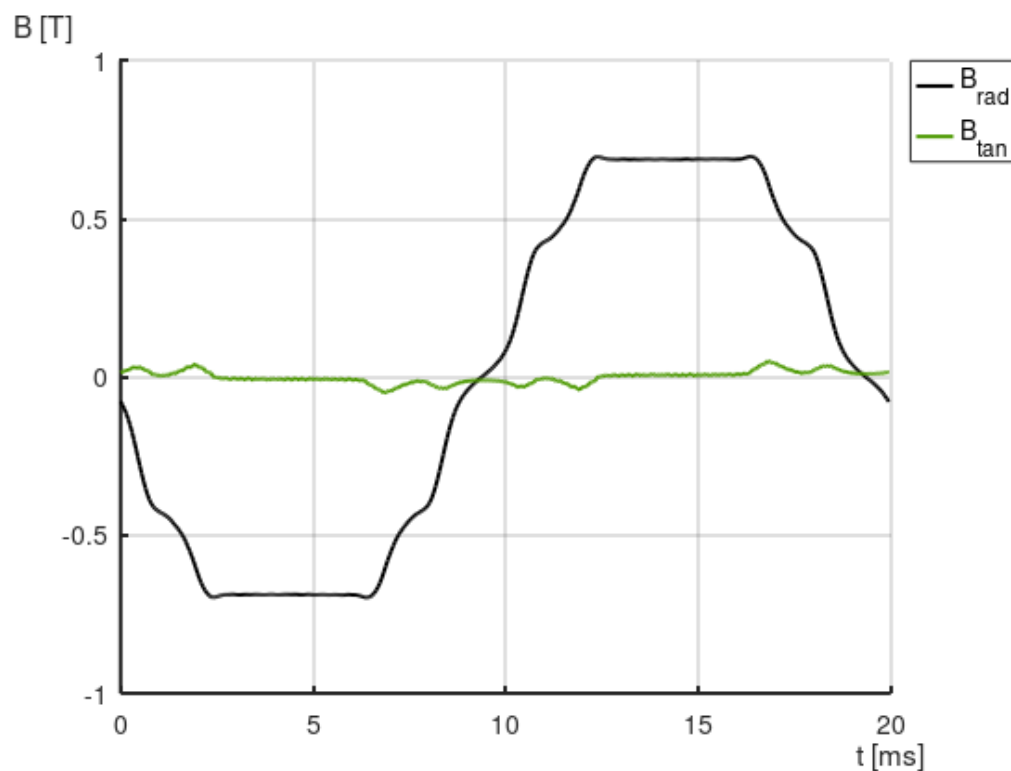
#### 4.1. Odnos magnetske indukcije mjernog svitka i radijalne sile koja djeluje na zub

Napon inducirani u mjernom svitku moguće je odrediti i računski upotrebom proračuna metodom konačnih elemenata (slika 4.6). Proračunski model s kojim se postiže dobro poklapanje rezultata proračuna i mjerenja induiranog napona mjernog svitka moguće je upotrijebiti za određivanje ukupne radijalne i tangencijalne komponente indukcije zuba statora.

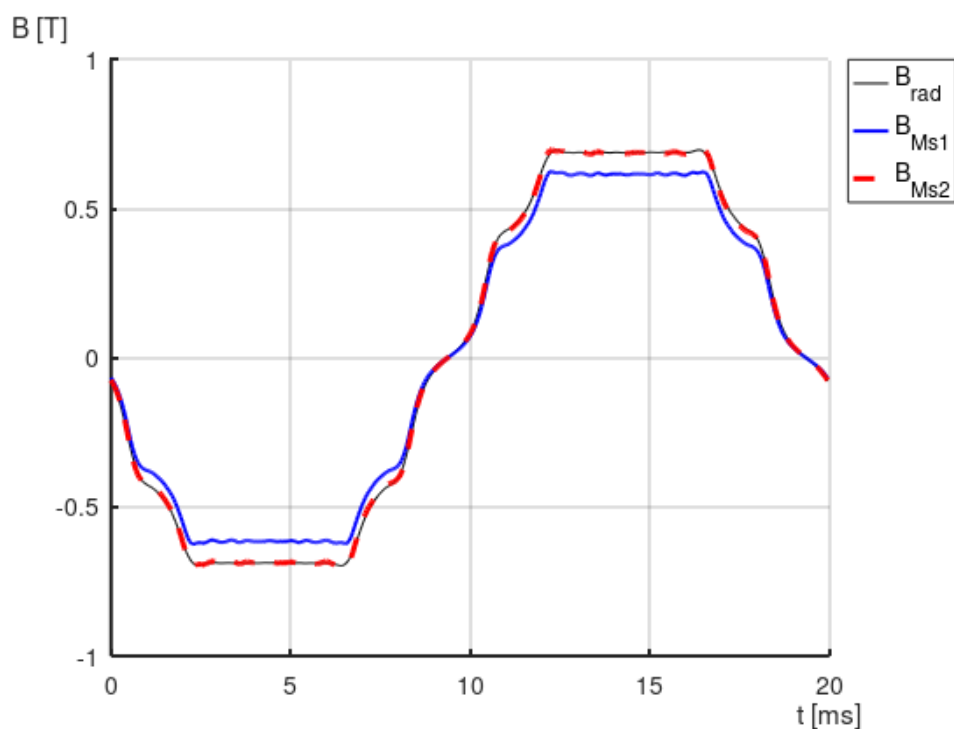


Slika 4.6 Usporedni prikaz izmjenjenog i izračunatog napona mjernog svitka

Kod sinkronih električnih generatora klasične izvedbe, radijalna komponenta magnetske indukcije  $B_{rad}$  značajno je većeg iznos od tangencijalne komponente  $B_{tan}$  (slika 4.7). Na napon mjernog svitka utječe komponenta magnetske indukcije okomita na plohu njegove petlje. Uslijed toga, magnetska indukcija određena temeljem napona mjernog svitka  $B_{Ms}$  po valnom obliku odgovara radijalnoj indukciji  $B_{rad}$ , dok se po iznosu razlikuje zbog mjerne netočnosti  $B_{Ms} \sim B_{rad}$  (slika 4.8).



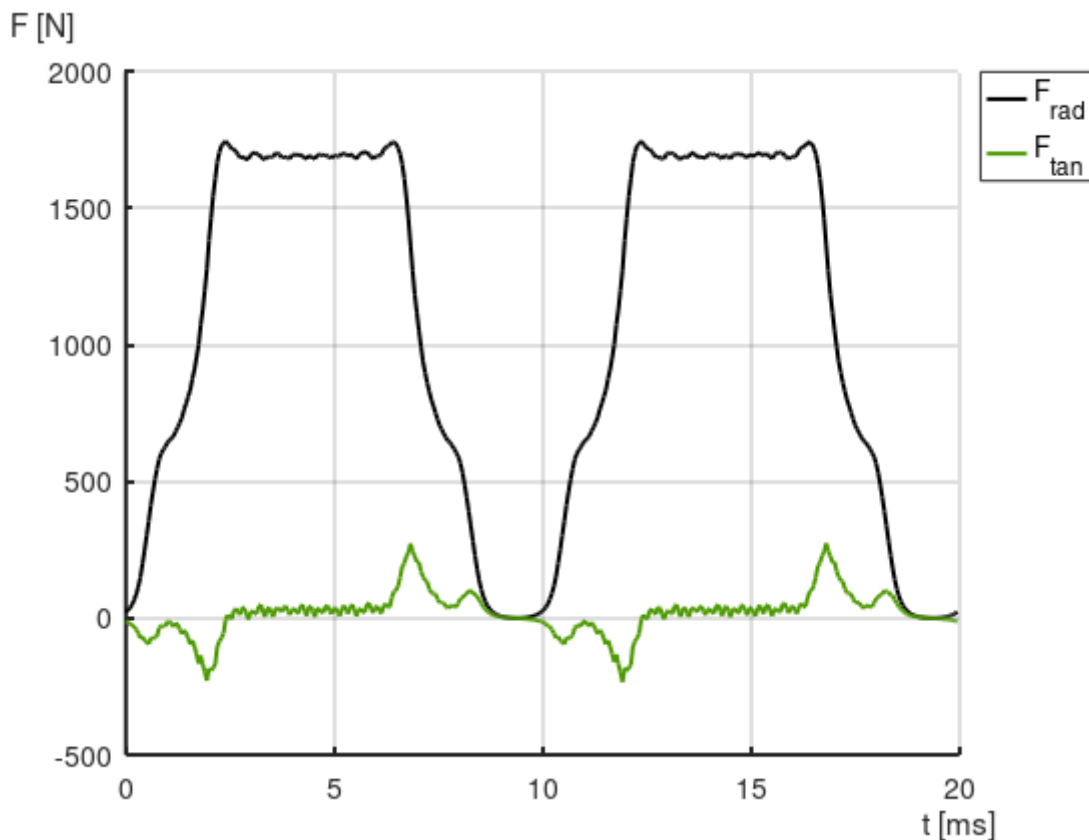
Slika 4.7 Usporedni prikaz radijalne  $B_{rad}$  i tangencijalne  $B_{tan}$  komponente magnetske indukcije zuba



Slika 4.8 Usporedni prikaz ukupne radijalne indukcije zuba  $B_{rad}$  i magnetske indukcije mjernih svitaka  $B_{Ms1}$  i  $B_{Ms2}$

Proračunski model s kojim se postiže dobro poklapanje rezultata proračuna i mjerenja inducirano napona mjernog svitka moguće je upotrijebiti za određivanje ukupne radijalne  $F_{rad}$  i tangencijalne  $F_{tan}$  komponente sile na zub, metodom Maxwellovog tenzora naprezanja.

Kod sinkronih električnih generatora klasične izvedbe, radijalna komponenta sile  $F_{rad}$  značajno je većeg iznosa od tangencijalne komponente  $F_{tan}$  (slika 4.9). Uslijed ovakvog međusobnog odnosa, radijalna komponenta sile predstavlja primarni uzrok vibracija, te joj se stoga pridaje puno veća važnost u analizama i izračunima vezanima za vibracije i buku u odnosu na tangencijalnu komponentu.



Slika 4.9 Usporedni prikaz radijalne  $F_{rad}$  i tangencijalne  $F_{tan}$  komponente sile

U slučaju diskretiziranog broja mjernih točaka i uz pretpostavku nultog iznosa magnetske indukcije aksijalnog smjera ( $B_{aks} = 0$ ), matematički izraz koji povezuje radijalnu silu i komponente magnetske indukcije (izraz 2.6) može se zapisati u obliku:

$$\Delta F_{rad\ t} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_{rad\ t}^2 - B_{tan\ t}^2) \cdot \Delta S \quad t \in [1, 2 \dots n_t] \quad (4.6)$$

U navedenom izrazu indeksom  $t$  označen je redni broj mjerenog podatka, a sa  $\Delta F$  iznos sile koji se odnosi na parcijalnu površinu  $\Delta S$  radijalne plohe zuba.

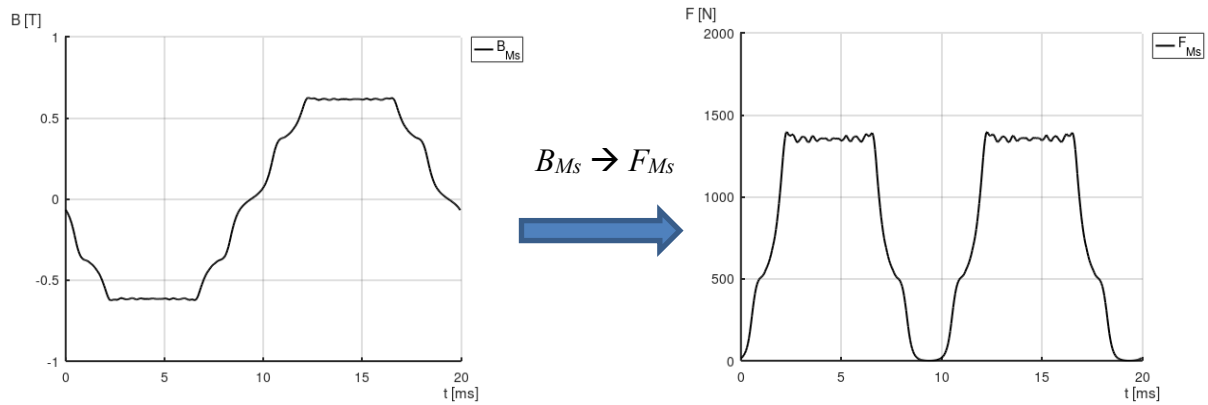
Budući da je radijalna komponenta magnetske indukcije značajno veća od tangencijalne ( $B_{rad} \gg B_{tan}$ ), radijalnu silu moguće je dovesti u korelaciju s radijalnom indukcijom:

$$\Delta F_{rad t} \sim \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{rad t}^2 \cdot \Delta S \quad t \in [1, 2 \dots n_t] \quad (4.7)$$

Kako je magnetska indukcija određena temeljem napona mjernog svitka  $B_{Ms}$  izravno povezana s radijalnom indukcijom  $B_{Ms} \sim B_{rad}$ , Moguće je preko izraza (4.7) dovesti u vezu i magnetsku indukciju mjernog svitka  $B_{Ms}$  s radijalnom silom koja djeluje na zub  $F_{rad}$ .

Temeljem magnetske indukcije mjernog svitka  $B_{Ms}$  i površine zuba  $S_{zub}$ , pomoću izraza 4.8 moguće je odrediti radijalnu silu  $F_{MS}$  koja djeluje na zub.

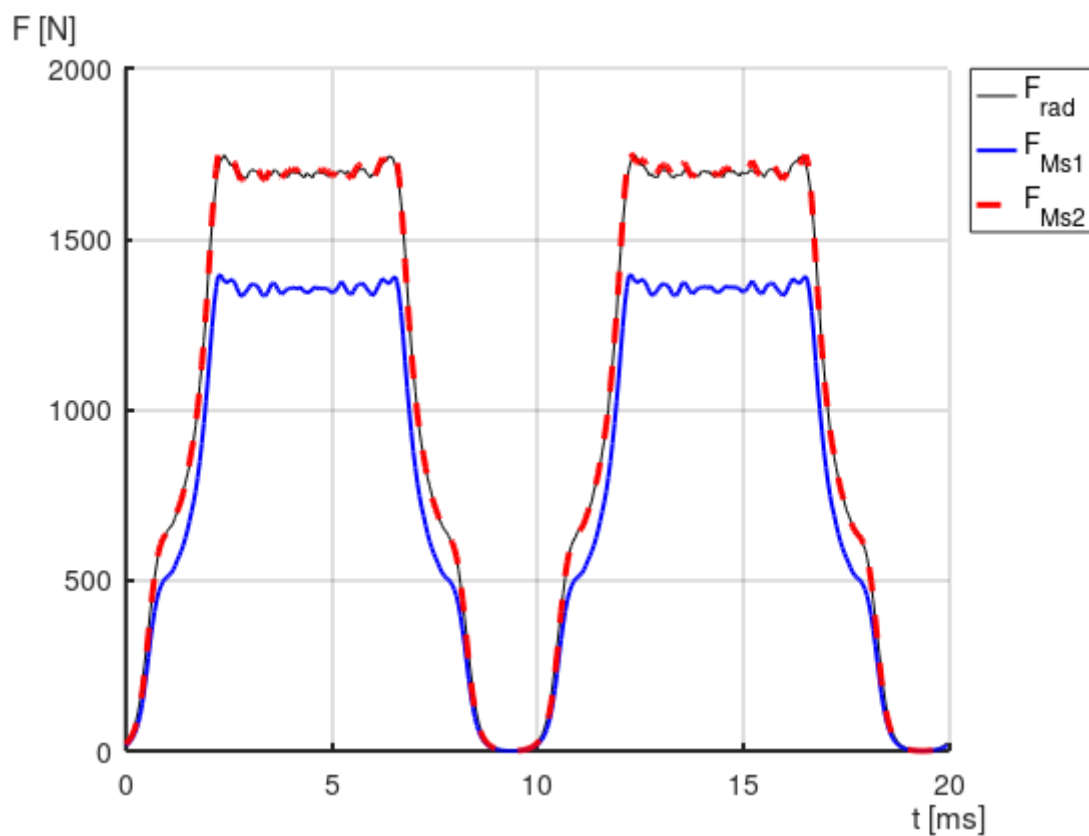
$$F_{MS t} = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B_{Ms t}^2 \cdot S_{zub} \quad t \in [1, 2 \dots n_t] \quad (4.8)$$



Slika 4.10 Pretvorba magnetske indukcije mjernog svitka  $B_{Ms}$  u iznos sile  $F_{MS}$

Radijalna sila na zub određena preko mjernog svitka  $F_{MS}$  razlikuje se od ukupne radijalne sile koja djeluje na zub  $F_{rad}$  (slika 4.11). Razlozi za ovo su:

- Odstupanje radijalne magnetske indukcije određene mjernim svitkom od ukupne magnetske indukcije, uslijed magnetskog toka koji u zub ulazi mimo mjernog svitka;
- Zanemarenje utjecaja tangencijalne i aksijalne komponente magnetske indukcije na radijalnu silu;
- mjerna nesigurnost uslijed nesavršenosti ugradnje mjernih svitaka, geometrijskih nesavršenosti u izradi stroja (okruglost paketa statora, ekscentrični pomak rotora) i točnosti korištene mjerne opreme.

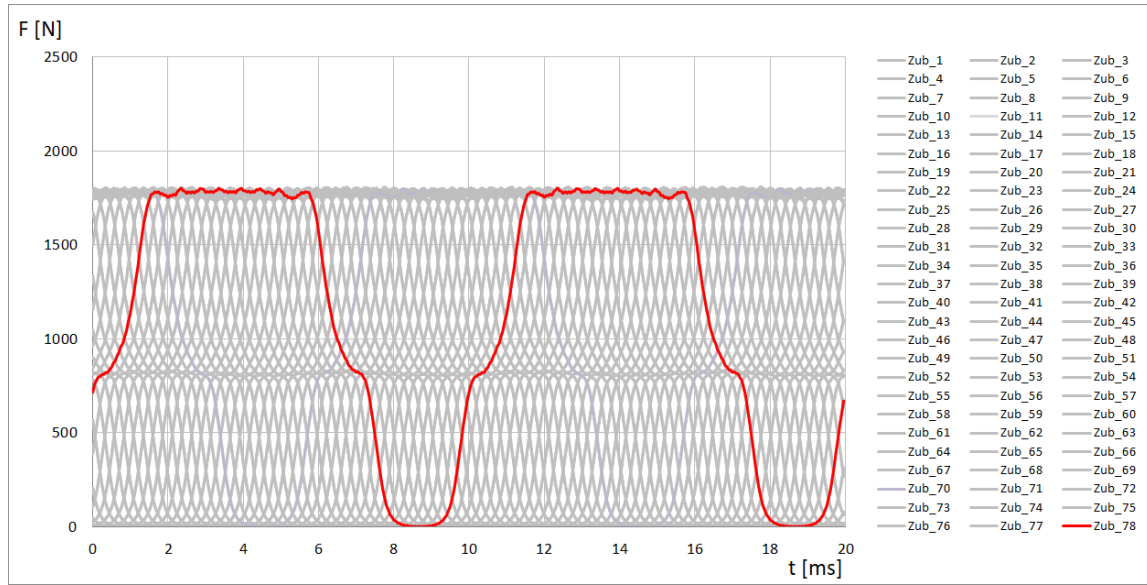


Slika 4.11 Usporedni prikaz radijalne sile  $F_{rad}$  i sile  $F_{Ms1}$  i  $F_{Ms2}$  koje odgovaraju kvadratu indukcije mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms2$

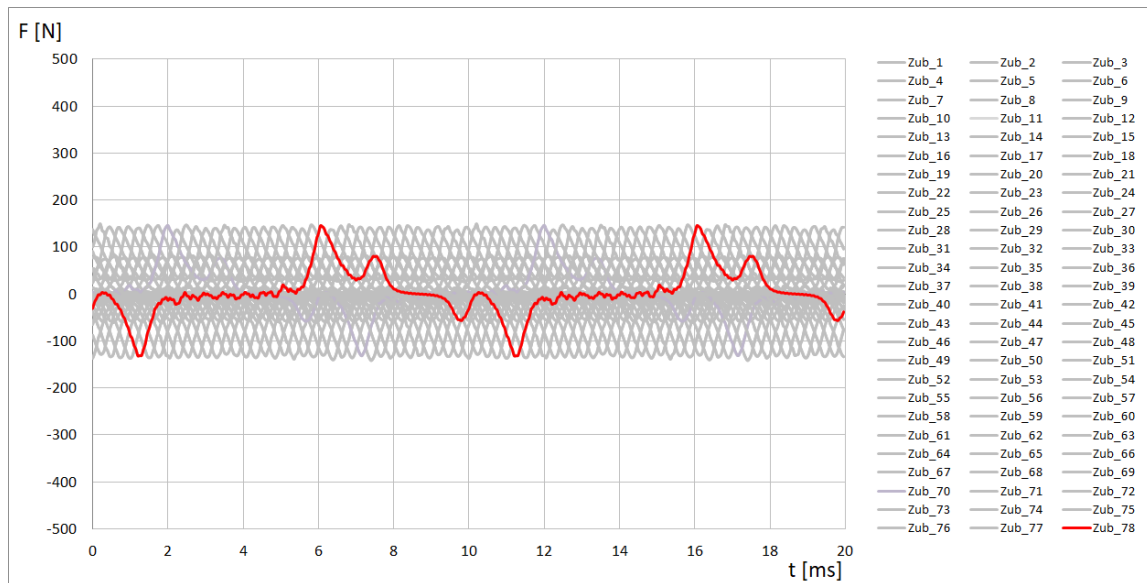
#### 4.2. Detekcija nesimetričnog opterećenja upotrebom mjernih svitaka

Za rad stroja je idealna situacija u kojoj vlada električna i mehanička simetrija. U takvom slučaju sile na sve zube generatora u praznom hodu istovjetnog su valnog oblika, a međusobno se razlikuju samo po faznom zakretu (slike 4.12 i 4.13). Fazna razlika sila između dva susjedna zuba  $\Delta\varphi_{Zub}$  ovisi o broju utora statora  $N_2$  i broju polova generatora  $2p$ , te se u električnim kutovima osnovnog harmonika može prikazati preko izraza:

$$\Delta\varphi_{Zub} = 360^\circ_{el} \cdot \frac{2p}{N_2} \quad (4.9)$$



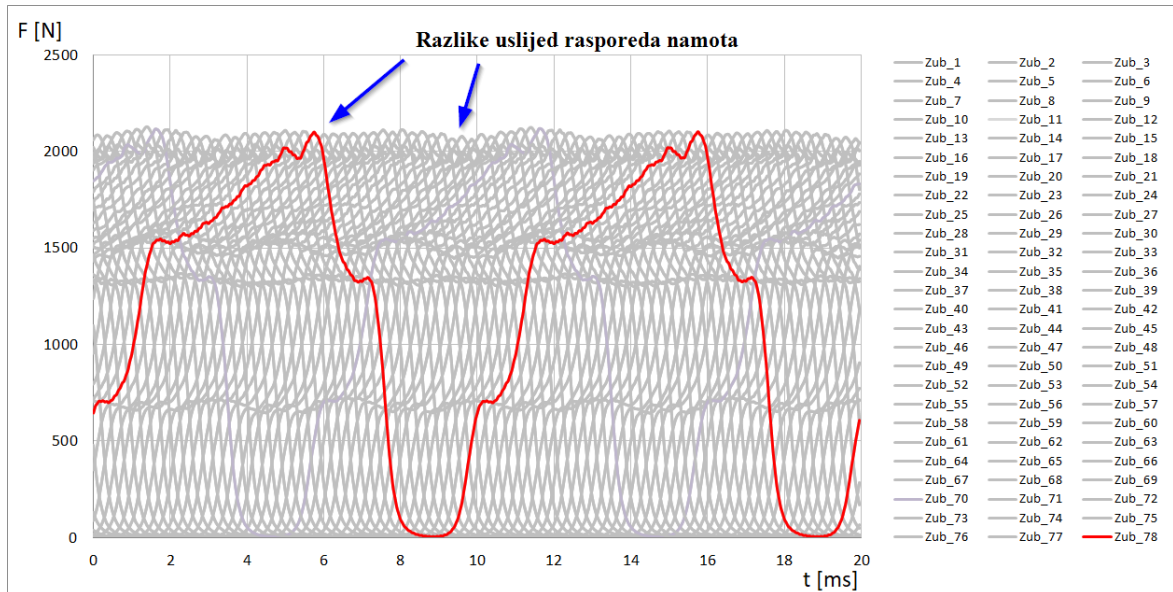
Slika 4.12 Ujedinjene radijalne sile po zubima za prazni hod mehanički simetričnog generatora



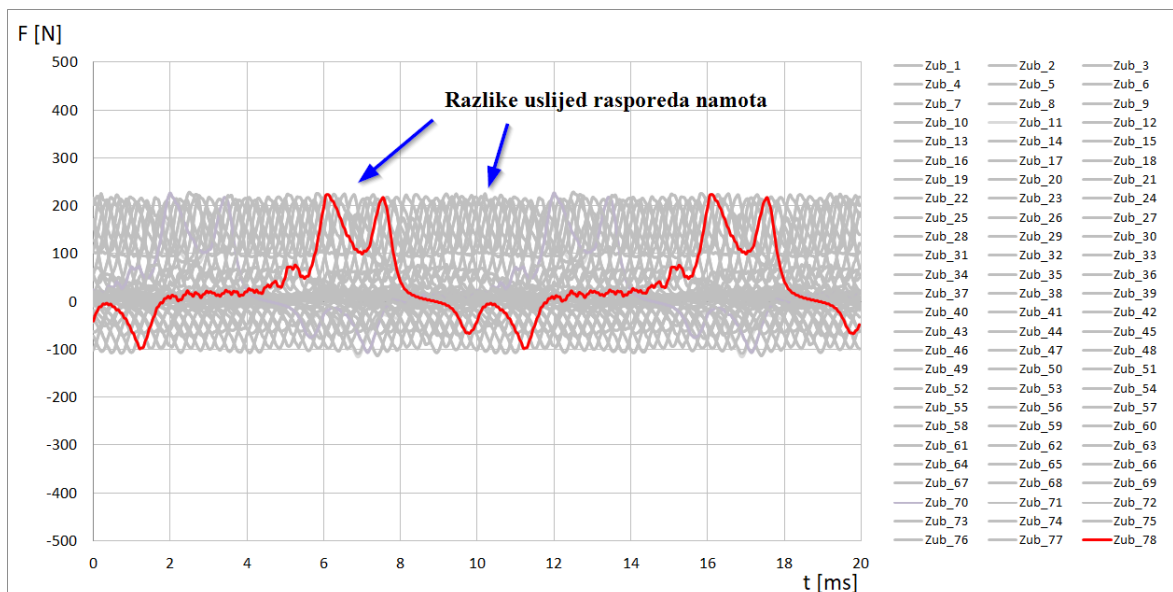
Slika 4.13 Ujedinjene tangencijalne sile po zubima za prazni hod mehanički simetričnog generatora



Kada kroz sve tri faze armaturnog namota električnog stroja teku sinusne struje iste amplitude i međusobno fazno pomaknute za  $120^\circ$ , sile na zube donekle se međusobno razlikuju u valnom obliku, uslijed rasporeda namota koji okružuje pojedini zub (slika 4.14 i 4.15).



Slika 4.14 Radikalne sile po zubima za simetrično opterećenje generatora



Slika 4.15 Tangencijalne sile po zubima za simetrično opterećenje generatora

U strojevima s faznim namotima projektiranim po uvjetima simetrije, elektromagnetska slika kružno se ponavlja duž oboda. Veličinu karakterističnog segmenta aktivnog dijela stroja, poznatog i pod nazivom prapol, moguće je odrediti na osnovi broja utora statora po polu i fazi  $q$ :

$$q = \frac{N_2}{2p \cdot m} = \frac{a}{b} \quad (4.10)$$

U navedenom izrazu s  $N_2$  je označen ukupni broj utora statora,  $2p$  je broj polova,  $m$  je broj faza, dok su s  $a$  i  $b$  označeni reducirani brojnik i nazivnik broja utora po polu i fazi  $q$ .

Najmanji cjelobrojni nazivnik broja utora po polu i fazi odgovara broju polova obuhvaćenih prapolom stroja. Kada je ovaj broj jednak jedinici ( $b = 1$ ) stroj ima cijeli broj utora po polu i fazi ( $q \in \mathbb{N}$ ), a magnetska slika stroja ponavlja se pod svakim polom. Kada je reducirani nazivnik broja  $q$  veći od jedinice, kažemo da stroj ima razlomljen namot. Izrazom 4.11 moguće je odrediti broj cirkularnih segmenata stroja s jednakom magnetskom slikom  $N_{prapol}$ :

$$N_{prapol} = \frac{2p}{b}. \quad (4.11)$$

Ovaj broj ujedno ukazuje koliko statorskih zubi stroja dijeli jednaku elektromagnetsku sliku. Međusobni razmak  $\Delta N_{zub\_pz}$  između zubi na koje djeluju jednake magnetske sile može se odrediti izrazom:

$$\Delta N_{zub\_pz} = \frac{N_2}{N_{prapol}}. \quad (4.12)$$

Najveći razmak dva zuba koji u stroju dijele jednaku elektromagnetsku sliku  $\Delta N_{zub\_pz\_maks}$  (zadovoljavaju izraz 4.12.) može se odrediti izrazom:

$$\Delta N_{zub\_pz\_maks} = \left\lfloor \frac{N_{prapol}}{2} \right\rfloor \cdot \Delta N_{zub\_pz}. \quad (4.13)$$

U navedenom izrazu ' $\lfloor \cdot \rfloor$ ' predstavlja matematički simbol zaokruživanja broja na najbližu nižu cjelobrojnu vrijednost.

Ako je broj prapolova neparan ( $N_{prapol}/2 \notin \mathbb{N}$ ,  $N_{prapol} > 1$ ), razmak među zubima statora za koji su ispunjeni navedeni uvjeti manji je od dijametralnog.

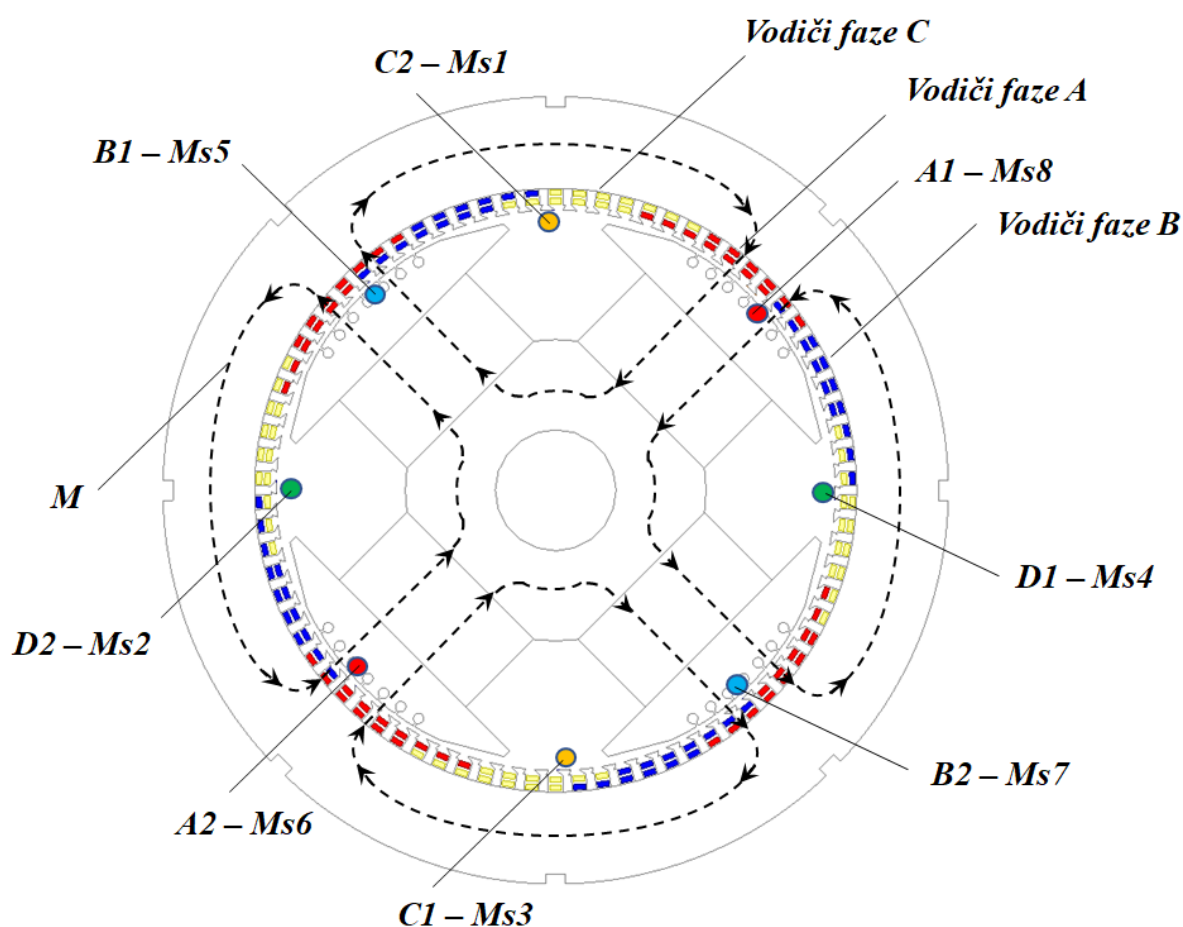
Ako je broj prapolova paran ( $N_{prapol}/2 \in \mathbb{N}$ ), kao što je slučaj kod analiziranog generatora, par statorskih zubi za koji su ispunjeni navedeni uvjeti (vrijedi jednakost magnetskih sila), dijametralno je razmaknut, tj. međusobno udaljen za  $N_2/2$  zubi. U mjernim svitcima ugrađenima na dijametralno postavljene zube ovakvog stroja inducirati će se stoga istovjetni naponi.

Slikom 4.16 prikazan je raspored namota po utorima statora na primjeru četveropolnog generatora s istaknutim polovima. Radi lakšeg raspoznavanja, vodiči različitih faza označeni su međusobno drugačijim bojama:

- vodiči faze *A* – crvena boja;
- vodiči faze *B* – plava boja;
- vodiči faze *C* – žuta boja.

Kružnim oznakama naznačene su lokacije četiri para dijametralno razmaknutih zubi, također međusobno označenih drugačijim bojama radi lakšeg raspoznavanja:

- par *A1-A2* – crvena boja;
- par *B1-B2* – plava boja;
- par *C1-C2* – žuta boja;
- par *D1-D2* – zelena boja.



Slika 4.16 Prikaz rasporeda razlomljenog namota i četiri para dijametralno razmaknutih zubi označenih točkama različitih boja

Sve istaknute lokacije označavaju zube koji se nalaze na granici dviju faznih zona:

- u utorima s jedne strane zuba smješteni su vodiči jedne faze (npr. faze *C* za lokacije *C1*, *C2*, *D1* i *D2*);
- u utorima s druge strane zuba smješteni su vodiči različitih faza (npr. faze *C* i *B* za lokacije *C1*, *C2*, *D1* i *D2*).

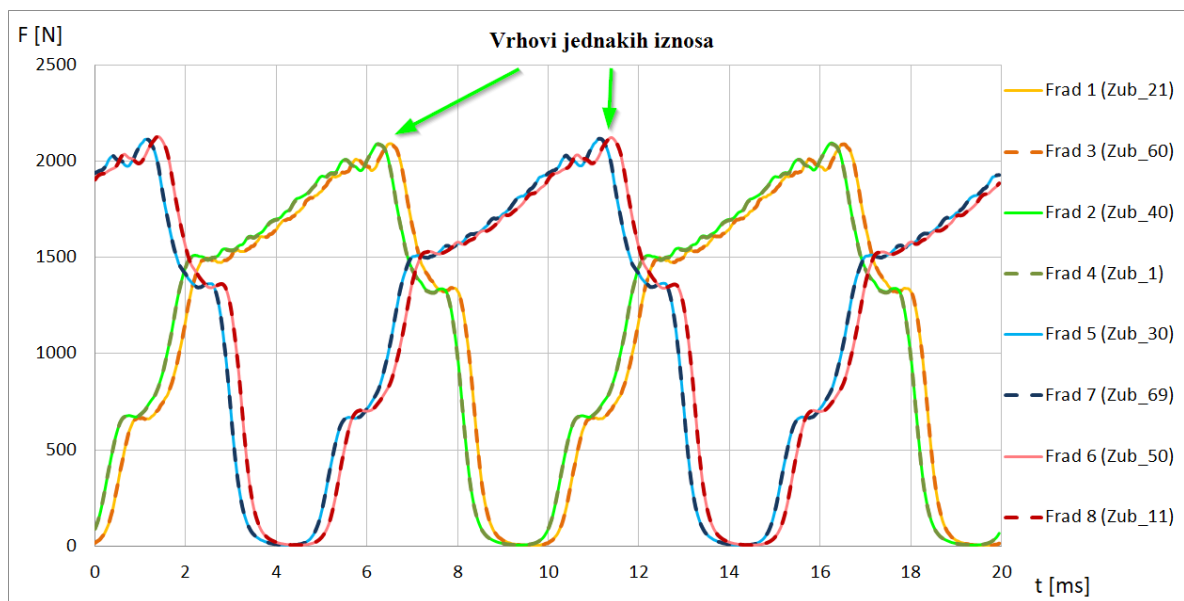
U prikazanom slučaju broj utora statora po polu i fazi *q* nije cijeli broj (4.14) :

$$q = \frac{N_2}{2p \cdot m} = \frac{78}{4 \cdot 3} = \frac{13}{2} = 6,5. \quad (4.14)$$

Uslijed ovako razlomljenog namota, parovi zubi *A-C* i *B-D* međusobno su razmaknuti za kut različit od polovice polnog koraka  $\tau_p$ , pa valni oblici ovih parova međusobno nisu u fazi (slika 4.17).

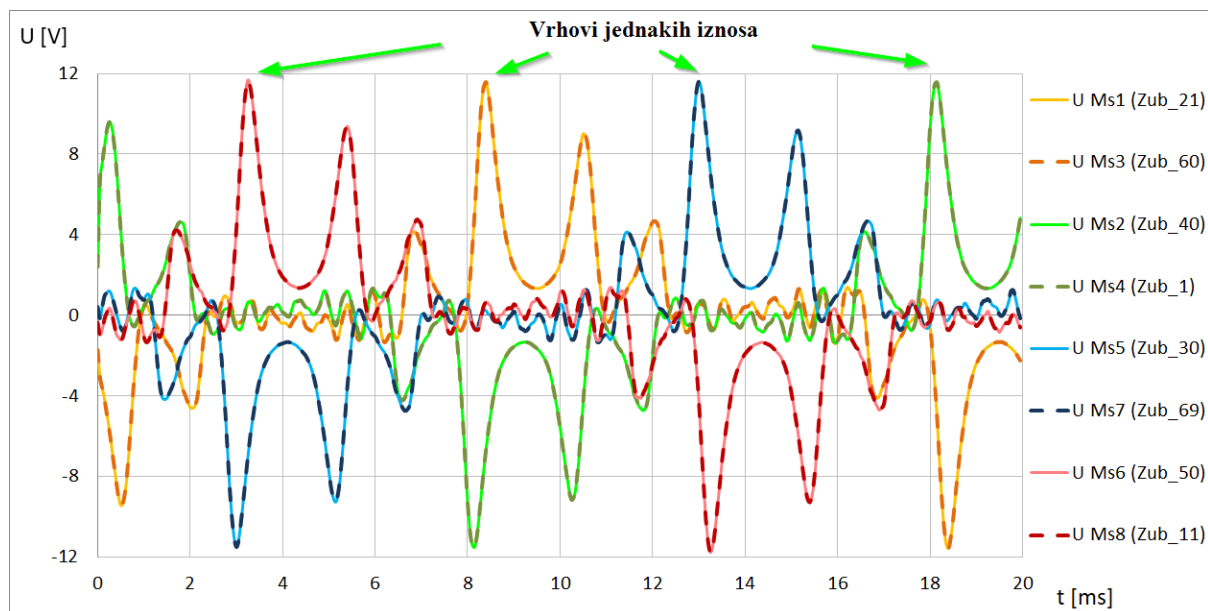
$$\tau_p = \frac{360}{2p} = \frac{360}{4} = 90^\circ. \quad (4.15)$$

Kako su lokacije svih razmatranih zubi slične s obzirom na raspored namota po susjednim utorima, u slučaju simetričnog opterećenja (simetričnih struja po fazama) na navedene zube djeluju sile jednakih valnih oblika, koje se međusobno poklapaju po vršnim i efektivnim vrijednostima, a razlikuju samo po faznom zakretu (slika 4.17).



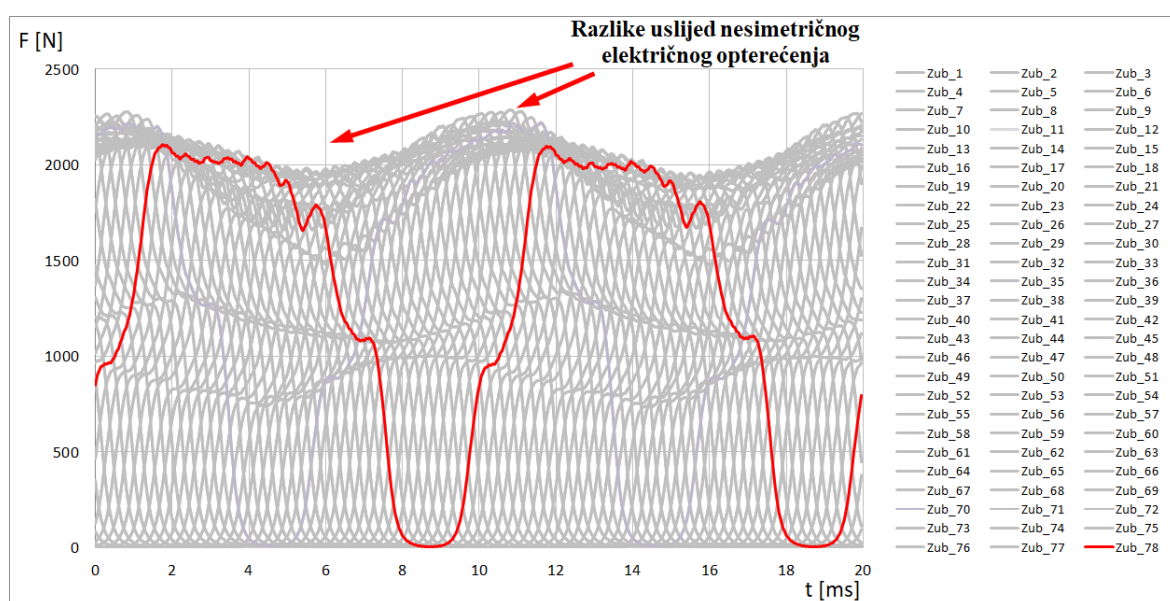
Slika 4.17 Radijalne sile na odabrane zube za simetrično opterećen generator

Ukoliko se na radijalne plohe zubi označenih točkama *A*, *B*, *C* i *D* postave mjerni svitci, valni oblici u njima induciranih napona također će biti istih vršnih i efektivnih vrijednosti (slika 4.18). Inducirani naponi dijametralno razmaknutih svitaka (prikazani punim i crtkanim linijama) međusobno će se poklapati.

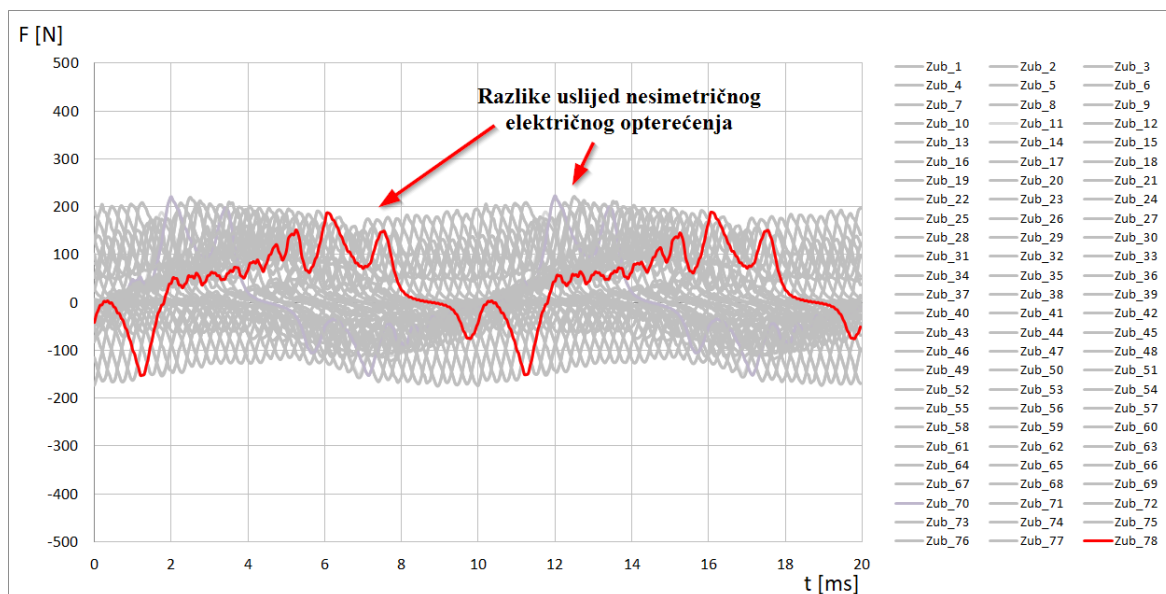


Slika 4.18 Inducirani naponi mjernih svitaka za simetrično opterećen generator

U slučaju nesimetričnog električnog opterećenja, kroz tri fazna namota ne teku struje jednakih amplituda. Uslijed nejednolikosti reakcije armature po obodu, u rezultirajućem magnetskom polju javlja se oscilirajuća komponenta, koja dovodi do nejednolikog rasporeda sila po zubima duž oboda stroja.

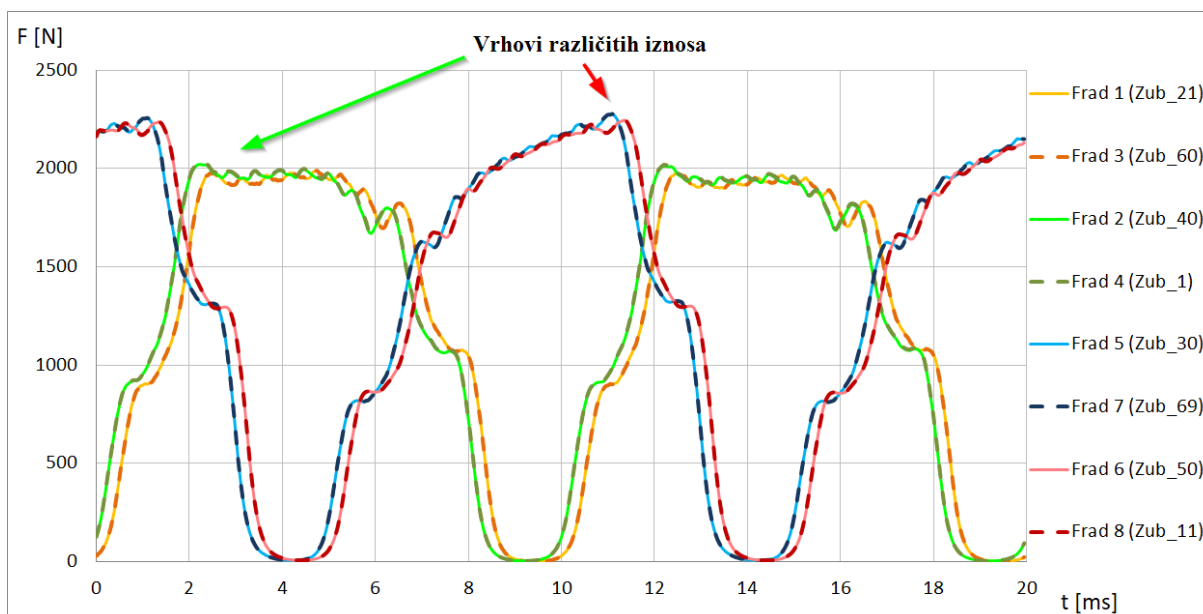


Slika 4.19 Radijalne sile na zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora

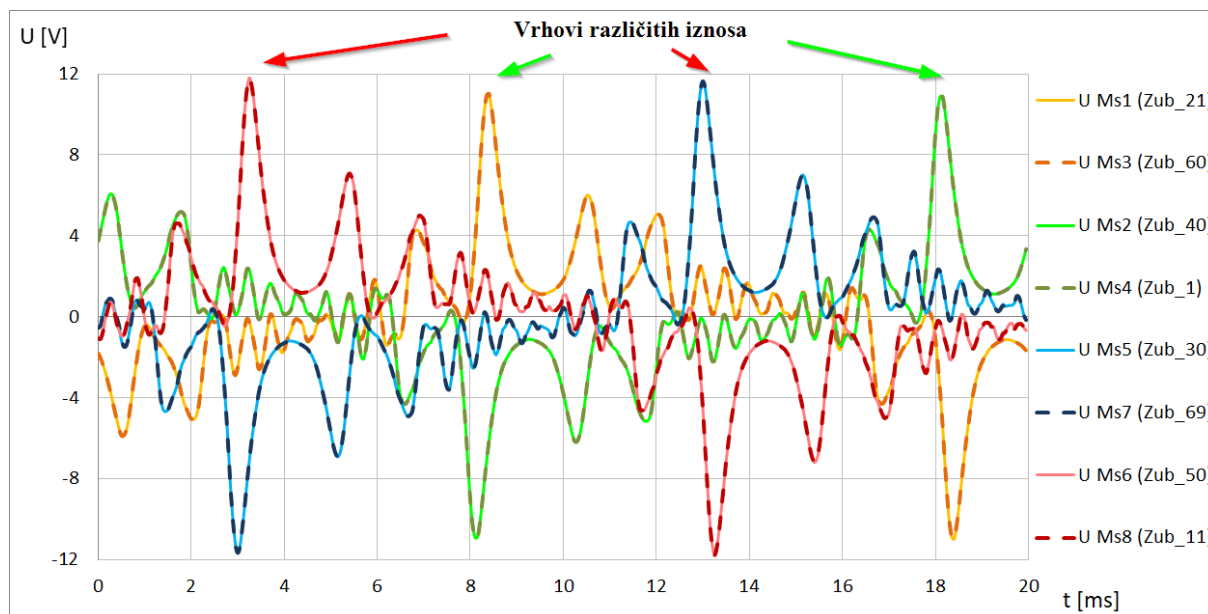


Slika 4.20 Tangencijalne sile na zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora

Zubi parova *A-B* i *C-D* nalaze se pod namotima različitih faza, pa se u slučaju nesimetričnog opterećenja međusobno razlikuju i sile koje na njih djeluju (slika 4.21). Isto tako međusobno se razlikuju i inducirani naponi mjernih svitaka postavljenih ispod ovih zuba (slika 4.22).



Slika 4.21 Radijalne sile na promatrane zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora

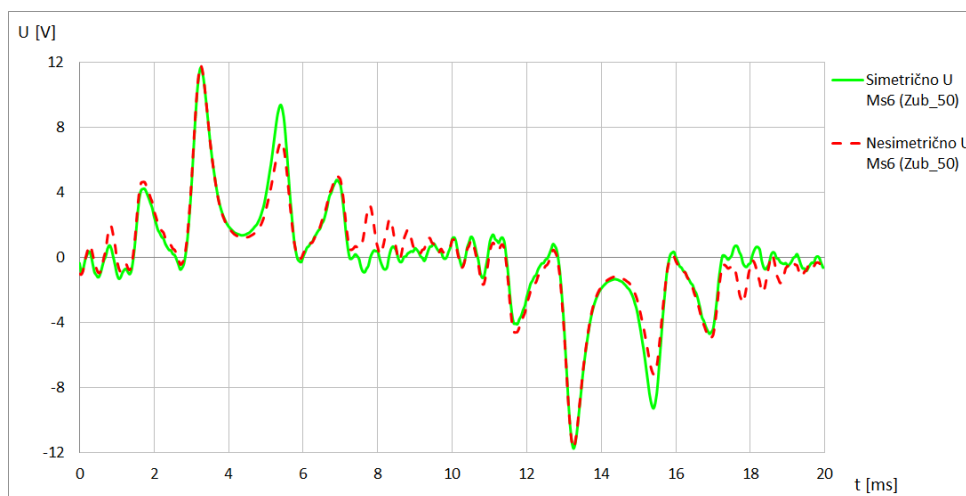


Slika 4.22 Inducirani naponi mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje po fazama generatora

Radi lakšeg uočavanja razlika uzrokovanih nesimetričnim opterećenjem, napone mjerene svitcima moguće je dodatno obraditi na način opisan izrazima (4.3), (4.5) i (4.8). Time se usporedba može svesti na analizu radijalnih sila koje djeluju na zube (slika 4.21.).

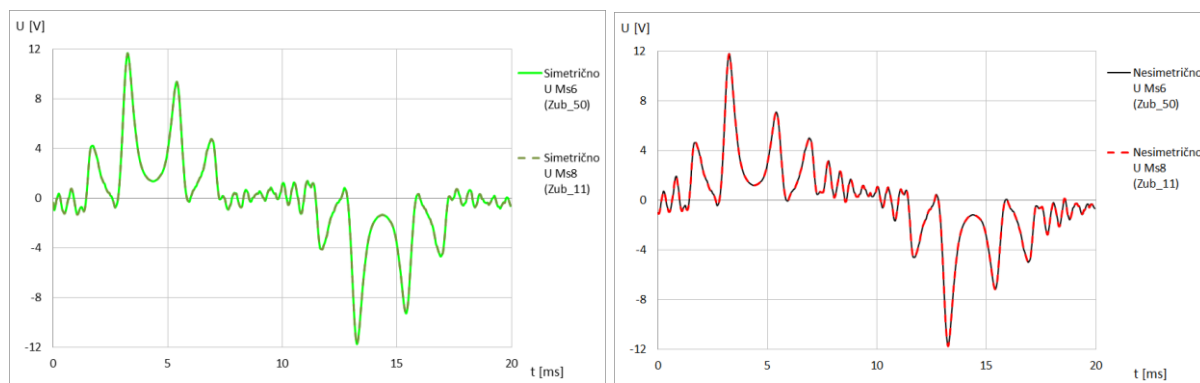
Na osnovi međusobnih razlika valnih oblika napona induciranih u mjernim svitcima (amplituda i efektivnih vrijednosti), moguće je razlikovati situacije simetričnog i električki nesimetričnog opterećenja.

Iako u slučaju električne nesimetrije inducirani napon mjernog svitka na pojedinom zubu ima drugačiji valni oblik nego kod simetričnog opterećenja (slika 4.23), kod dijametralno razmaknutih parova zubi (npr. A1-A2) i dalje će se međusobno poklapati valni oblici sila i induciranih napona u mjernim svitcima (slika 4.24).



Slika 4.23 Napon mjernog svitka za simetrično i električki nesimetrično opterećenje





Slika 4.24 Istovjetni naponi dijametralno postavljenih mjernih svitaka za slučajeve simetričnog (lijevo) i električki nesimetričnog (desno) opterećenja

Jednaki naponi dijametralno postavljenih svitaka situaciju nesimetričnog električnog opterećenja razlikuju od slučajeva ekscentričnosti rotora ili kvarova štapova, koji su razmatrani u [40, 41]. Tablicom 4.1 prikazan je sažet pregled razlika između spomenutih nesimetričnih stanja.

Tablica 4.1 Razlike u detekciji kvara namota rotora, mehaničke i električne nesimetrije

| Vrsta mjerenja                                                                                | Ispravno simetrično stanje | Kvar namota                                       | Ekscentričnost                                                              | Nesimetrično opterećenje                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Valni oblik sila određenih pomoću dijametralno postavljenih svitaka                           | Jednak                     | Različit                                          | Različit                                                                    | Jednak                                                                         |
| Vrsta razlike sila određenih pomoću dijametralno postavljenih svitaka                         | Nema                       | Periodička pojava izraženih vrhova u razlici sila | Razlika sila ima značajnu efektivnu vrijednost                              | Nema                                                                           |
| Valni oblik sila određenih pomoću svitaka smještenih pod različitim faznim zonama             | Jednak                     | Različit                                          | Različit                                                                    | Različit                                                                       |
| Vrsta međusobne razlike sila određenih pomoću svitaka smještenih pod različitim faznim zonama | Nema razlike               | Periodička pojava izraženih vrhova u razlici sila | Valni oblici sličnog harmonijskog sastava i različite efektivne vrijednosti | Valni oblici različitog harmonijskog sastava i različite efektivne vrijednosti |



## **5. Proračuni generatora metodom konačnih elemenata**

Prilikom dimenzioniranja magnetskih i električnih krugova električnih strojeva najčešće se primjenjuju analitički proračuni koji se zasnivaju na pretpostavkama i pojednostavljenjima kao što su: apsolutna simetričnost dizajna, jednaka raspodjela magnetske indukcije pod svim polovima, zanemaren ili pojednostavljen utjecaj lokalnih magnetskih zasićenja. Točnije određivanje karakteristika i ponašanja stroja moguće je korištenjem numeričkih metoda. Takvim metodama, moguće je detaljno proučavati utjecaj jednog ili više parametara na dinamičko ponašanje stroja. Pored toga, ovim metodama moguće je čak provesti analize specifičnih pojava u stroju, koje nije moguće ispitati u stvarnim pogonskim ili laboratorijskim uvjetima. Najrasprostranjenija numerička metoda, koja se primjenjuje u analizi rotacijskih električnih strojeva, je metoda konačnih elemenata (MKE). Ona se može primijeniti u rješavanju dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih problema kod elektromagnetskih polja i mehaničkih naprezanja, a rješenja se mogu dobiti za statičke, vremenski promjenjive i prijelazne pojave. U slučaju primjene MKE proračuna, posebna se pozornost posvećuje točnosti podataka o značajkama materijala konstrukcijskih dijelova stroja i dimenzijama konačnih elemenata pri generiranju mreže. Promjene magnetskog toka u zračnom rasporu i posljedično u zubima paketa statora odražavaju se na magnetske sile. Iz ovog razloga mreža čvorova u kojima se računa magnetsko polje upravo u tom području mora biti izrazito gusta te što pravilnije raspoređena. Time se ostvaruju točniji i pouzdaniji rezultati elektromagnetskih proračuna. Magnetske sile određene ovakvim elektromagnetskim proračunom, mogu se upotrijebiti kao ulazni podatak za mehanički MKE proračun. Da bi se sprežanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna izvelo na ispravan način, potrebno je obratiti pozornost i na gustoću mreže geometrijskih elemenata koje dijele oba proračunska modela. U slučaju izračuna vibracija statorskih dijelova električnog stroja, najveću pažnju treba pridati definiranju mreže zubi paketa statora, jer na ovaj dio statora djeluju vremenski promjenjive sile najvećeg iznosa. Često se analize magnetskih polja i mehaničkih naprezanja paketa statora električnih strojeva mogu predstaviti kao dvodimenzionalni problem. Međutim, valja imati na umu da se u stvarnosti radi o trodimenzionalnim problemima i da su rješenja dobivena analizom dvodimenzionalnog problema samo približno točna, jer primjerice ne uzimaju u obzir utjecaj čeonih zona stroja na elektromagnetska polja, te njima uzrokovane sile i vibracije.

### 5.1. Izrada simulacijskog modela

Danas se u projektiranju i modeliranju rotacijskih električnih strojeva koriste programski paketi koji upotrebom numeričke MKE metode, uz zadane početne i rubne uvjete, omogućuju točnije izračune elektromagnetskih i mehaničkih prilika za realne konstrukcije strojeva. Jedan od njih je i komercijalni programski paket *ANSYS*, koji je korišten za izradu 2D simulacijskih modela i proračune sinkronog generatora. Navedeni programski paket sastoji se od niza specijaliziranih programa za MKE izračune, od kojih je za rješavanje elektromagnetskih problema moguće koristiti *ANSYS Maxwell*, a za mehaničke probleme *ANSYS Mechanical*. Automatizirano povezivanje ovih programa moguće je provesti upotrebom programa *ANSYS Workbench*.

#### 5.1.1. Model za elektromagnetske proračune

Program *ANSYS Maxwell* omogućuje rješavanje elektromagnetskih problema uz simuliranje uvjeta različitih pogonskih stanja (uključujući i ona nesimetrična) za razne vrste električnih strojeva, aparata i uređaja. Na ovaj način moguće je izvršiti kontrolu provedenih mjerenja ili pak analitičkih proračuna i utvrditi područje odstupanja ulaznih podataka unutar kojih proračun ostaje dovoljno točan u usporedbi s mjerenjima.

Na osnovi projektnih podataka sinkronog generatora (tablica 3.1) i dimenzija konstrukcijskih dijelova provjerenih mjerenjem izrađen je 2D MKE model za izračun mehaničkog odziva paketa i kućišta generatora za različite slučajeve pobudnih sila, a koji su posljedica situacije simetričnih i nesimetričnih električnih opterećenja. Utjecaj pojedinog analiziranog pogonskog stanja generatora na inducirane napone u mjernim svitcima izračunat je primjenom MKE. Proračunskim modelom u obzir su uzeti nelinearnost materijala (željezna jezgra izrađena od dinamo limova) i stvarna geometrija stroja. MKE izračuni na modelu koji odgovara stvarnom stroju nužni su kako bi se provjerila odabrana metodologija za analizu nesimetričnih opterećenja.

Na slici 5.1 prikazan je 2D model sinkronog generatora pomoću kojeg su provedeni izračuni magnetskih indukcija, induciranih napona i magnetskih sila. Za provedbu proračuna korišten je programski modul "*Magnetic Transient*", koji omogućuje izračune uz simulaciju vrtnje rotora. Simulacijski proračuni provedeni su za napon 400 V, frekvencije 50 Hz (sinusno napajanje), kako bi bilo moguće rezultate dobivene MKE proračunom usporediti s rezultatima mjerenja provedenih u laboratoriju.

Mreža konačnih elemenata modela generatora prikazana je na slici 5.2, dok je slikama 5.3 i 5.4. prikazan statorski električni krug stroja za slučajeve simetričnog i nesimetričnog opterećenja.

Pomoću vanjskog električnog kruga fazni namoti statora spojeni su u zvijezdu. Efekti čeone zone generatora (otpor glava namota i rasipni magnetski tokovi) uzeti su u obzir dodavanjem otpora i induktiviteta u vanjski električki krug statorskog namota. Vrijednosti ovih veličina preuzete su iz analitičkog proračuna generatora. Štapovi prigušnog namota spojeni su međusobno u paralelu upotrebom *End Connection* modula [37]. Skošenje za jedan utorski korak statora modelirano je s 5 aksijalnih presjeka, upotrebom tzv. *Multi slice* metode ugrađene u programski paket [37]. Opterećenja generatora modelirana su upotrebom pasivnog trofaznog i jednofaznog tereta, s ciljem da se proračunska stanja približe mjerenima.

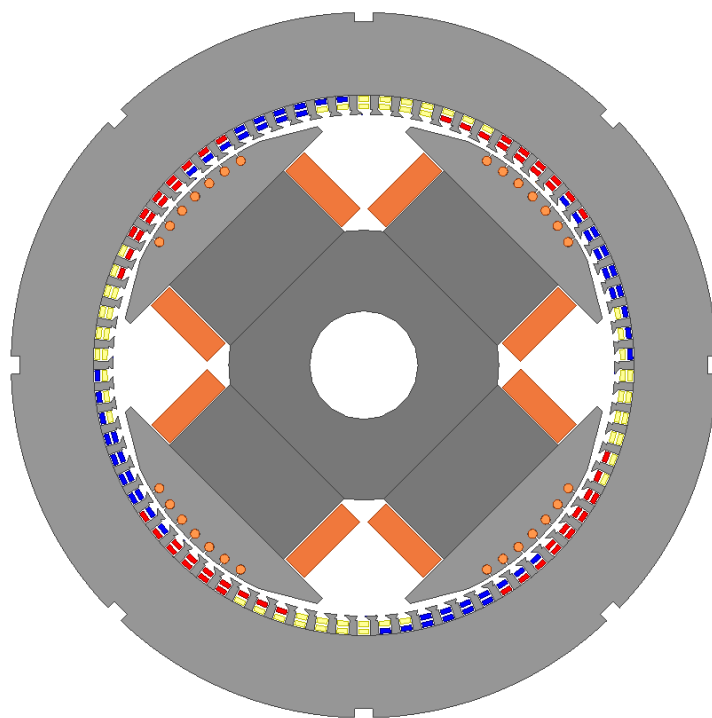
Uz veličinu konačnih elemenata odabranu po aktivnim dijelovima generatora na način prikazan tablicom 5.1, ukupna mreža modela sadrži 150000 elemenata. Proračuni su provedeni uz rješavanje diferencijalnih jednadžbi po vremenu primjenom *Backward-Euler* metode, uz iznos nelinearnog ostatka (greške u konvergenciji rješenja) manji od 0,0001. MKE proračuni provedeni su u dva koraka. Najprije je uz korak od 20 točaka po periodu izračunato početnih 5 perioda osnovnog harmonika napona radi postizanja ustaljenog stanja, a nakon toga dvije električne periode tj. puni okret rotora s korakom od 400 točaka po periodu. U tablici 5.2 navedeni su uvjeti simulacijskog proračuna gdje  $t_{sim}$  označava vrijeme trajanja simulacije, a  $t_{sim.kr.}$  vremenski korak simulacije.

Tablica 5.1 Veličina konačnih elemenata po dijelovima modela za EM proračune

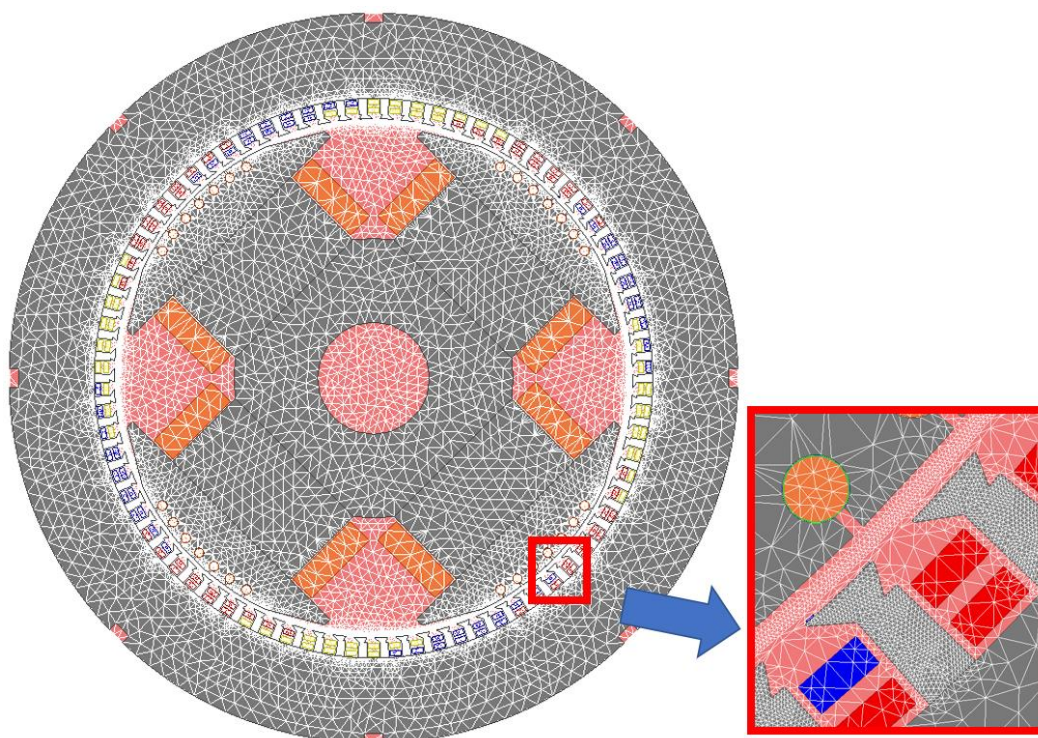
| Dio modela                 | Veličina konačnog elementa [mm] |
|----------------------------|---------------------------------|
| Stator jaram               | 20                              |
| Stator zubi                | 1                               |
| Zračni raspor (iznad pola) | 1                               |
| Zračni raspor (međupolno)  | 15                              |
| Štapovi prigušnog namota   | 3                               |
| Polna stopala              | 12                              |
| Polne jezgre               | 20                              |
| Jaram rotora               | 20                              |

Tablica 5.2 Uvjeti elektromagnetskog simulacijskog proračuna

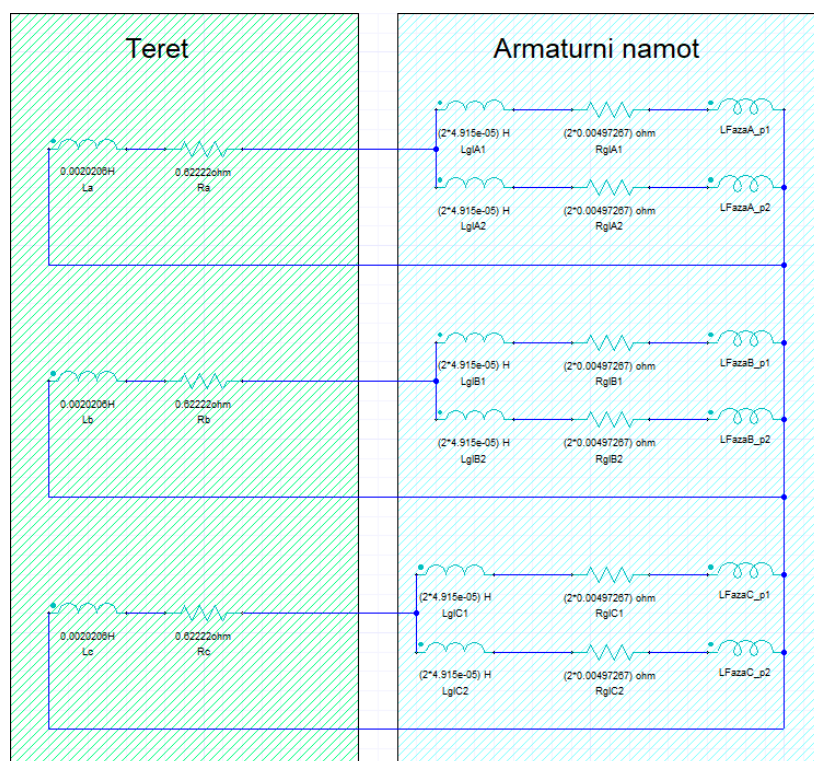
| $U$ [V] | $f$ [Hz] | $t_{sim\ 1}$ [ms] | $t_{sim.kr\ 1}$ [ms] | $t_{sim\ 2}$ [ms] | $t_{sim.kr\ 2}$ [ms] |
|---------|----------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 400     | 50       | 100               | 1                    | 40                | 0,05                 |



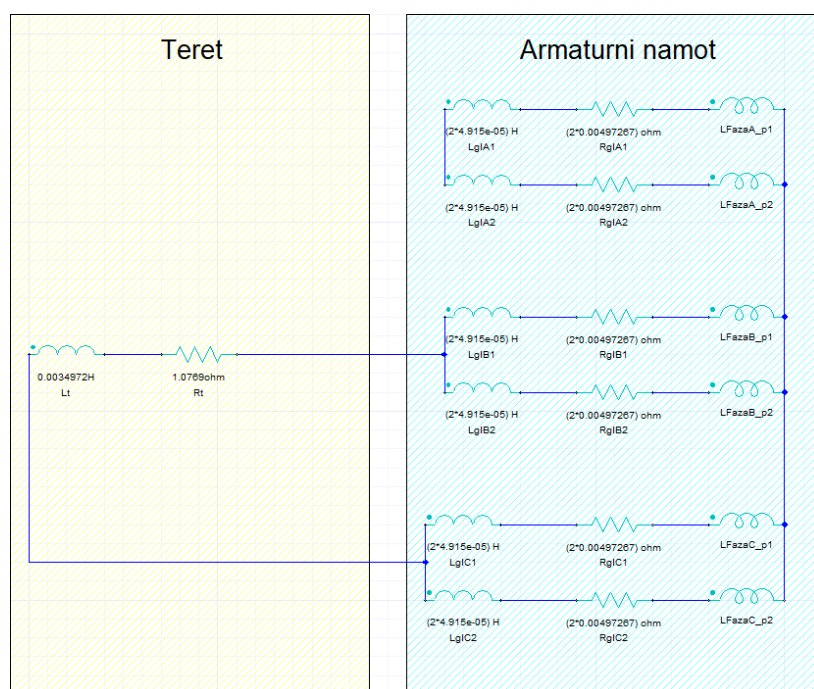
Slika 5.1 Dvodimenzionalni model generatora u programskom okruženju *ANSYS Maxwell*



Slika 5.2 Mreža konačnih elemenata MKE modela za elektromagnetske proračune



Slika 5.3 Vanjski električni krug MKE modela za simetrično opterećenje



Slika 5.4 Vanjski električni krug MKE modela za slučaj nesimetričnog opterećenja po fazama

### 5.1.2. Model za mehaničke proračune

Program *ANSYS Mechanical* omogućuje rješavanje mehaničkih problema uz simuliranje različitih pobudnih uvjeta (statičkih i vremenski promjenjivih sila), za razne vrste složenih geometrijskih struktura i konstrukcija. Ovakvim proračunom moguće je utvrditi mehaničke odzive neke konstrukcije i uočiti potencijalne mehaničke probleme prije fizičke izrade. Proračunskim simulacijama moguće je izvršiti i kontrolu provedenih mjerenja te utvrditi područje odstupanja ulaznih podataka unutar kojih proračun ostaje dovoljno točan u usporedbi s mjerenjima.

Na osnovi projektnih podataka (tablica 3.1) i izmjerenih dimenzija konstrukcijskih dijelova sinkronog generatora, izrađen je 2D MKE model za izračun mehaničkog odziva paketa i kućišta statora za različite slučajeve pobudnih sila, a koji su posljedica situacije simetričnih i nesimetričnih električnih opterećenja.

Slikom 5.5 prikazan je 2D model sinkronog generatora, pomoću kojeg su provedeni izračuni vibracijskih pomaka, brzine i akceleracije za različita pogonska stanja. Model je baziran na poprečnom presjeku centralnog dijela statora generatora, za koji postoji zrcalna simetrija oko vertikalne osi i na kojem je bilo moguće provesti mjerenja.

Dodirne plohe između sljedećih komponenti modela definirane su kao čvrsti spoj:

- letve s paketom i plaštem kućišta (koji je izveden zavarom);
- utorske izolacije, vodiča, utorskih klinova i unutarnje plohe utora (fiksirani su impregnacijskom smolom);
- jarma statora i zubi, koji u modelu postoji samo radi točnijeg preslikavanja sila iz elektromagnetskog proračuna (u stvarnosti je poprečni presjek cijelog paketa statora izrađen od jednog lima).

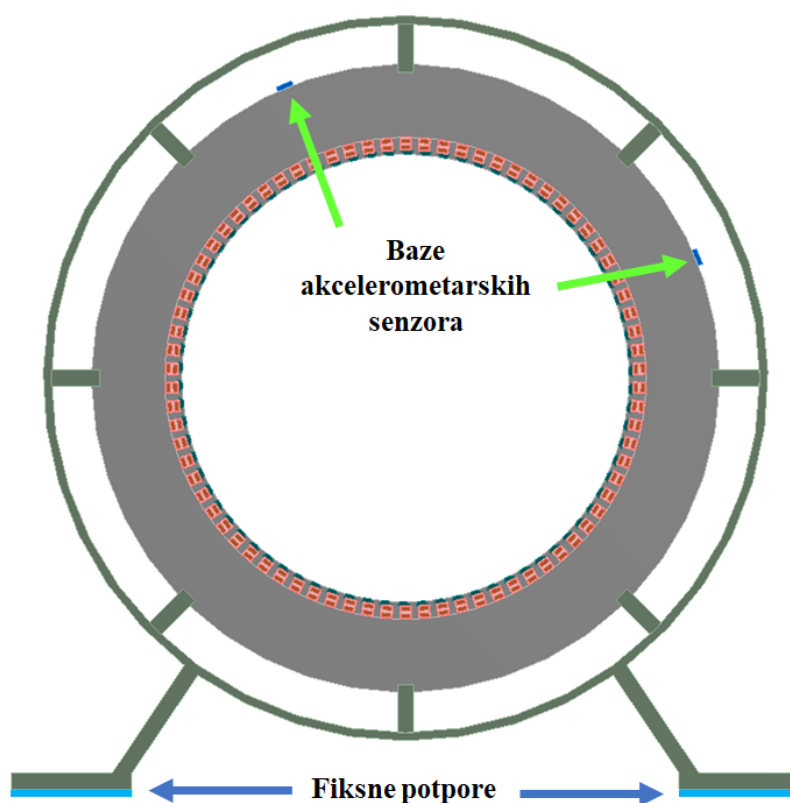
Učvršćenje generatora na postolje (temeljnu ploču) modelirano je pomoću fiksnih potpora nogu kućišta.

Masa glava namota u čeonim dijelovima stroja uzeta je u obzir povećanjem specifične gustoće vodiča smještenih u utore 2D modela.

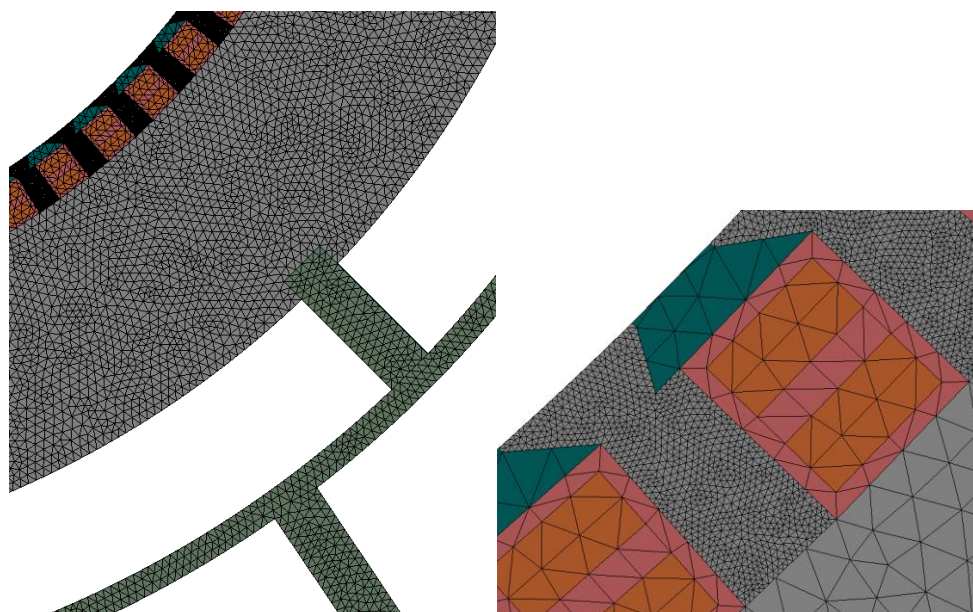
Mreža konačnih elemenata modela prikazana je na slici 5.6. Većini komponenti modela definirana je maksimalna veličina trokutastih elemenata od 3 mm, osim za zube statora gdje je mreža izrađena s elementima veličine 0,5 mm. Uz ovakve postavke, ukupna mreža modela sadrži 184000 elemenata.



Analize su provedene pomoću *Plane Stress* 2D računskog modela, upotrebom programskog modula “*Modal*” za izračun vlastitih frekvencija i modula “*Harmonic Response*” za izračun ukupnog odziva na periodičku pobudu, metodom superpozicije harmonika. U tablici 5.3 navedeni su osnovni uvjeti simulacijskog proračuna.



Slika 5.5 Dvodimenzionalni model generatora u programskom okruženju *ANSYS Mechanical*



Slika 5.6 Mreža konačnih elemenata MKE modela za mehaničke proračune

Tablica 5.3 Uvjeti mehaničkog simulacijskog proračuna

| Uvjet                                            | Oznaka               | Iznos      |
|--------------------------------------------------|----------------------|------------|
| Raspon analiziranih vlastitih frekvencija        | $f_{vl\ raspon}$     | 0-13000 Hz |
| Frekvencijski raspon pobudne sile                | $f_{pobuda\ raspon}$ | 0-10000 Hz |
| Frekvencijski raspon računatog mehaničkog odziva | $f_{odziv\ raspon}$  | 0-6000 Hz  |

### 5.1.3. Povezivanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna

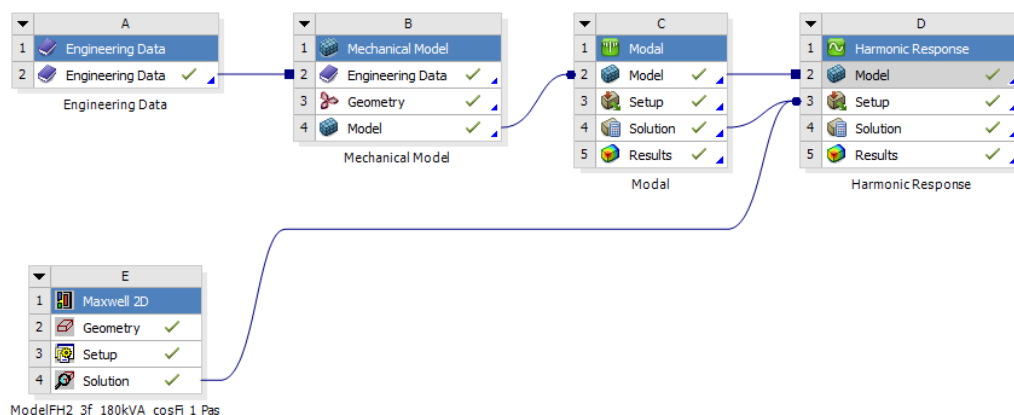
Povezivanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna provedeno je u frekvencijskoj domeni upotrebom alata *ANSYS Workbench* (slika 5.7).

Da bi se uspješno povezali proračuni programa *ANSYS Maxwell* i *ANSYS Mechanical* te spregnutom metodom izračunale vrijednosti vibracija paketa statora električnog stroja, potrebno je ispuniti sljedeće uvjete:

- geometrija paketa statora mora se poklapati u oba proračuna;
- u elektromagnetskom proračunu potrebno je aktivirati izračun sila po zubima;
- mreža konačnih elemenata u zoni zubi mora biti dovoljno gusta da se sile na ispravan način izračunaju i prenesu iz elektromagnetskog u mehanički proračun;
- broj simulacijskih točaka unutar jedne periode osnovnog harmonika sile mora biti oko 10 puta veći od željenog broja pouzdano izračunatih harmonika;
- frekvencija najvišeg izračunatog harmonika sile trebala bi se poklapati ili biti veća od reda najvišeg analiziranog harmonika vibracijskog pomaka.

Uz odabrani broj simulacijskih točaka ( $N_t = 400$  po periodu) elektromagnetskog proračuna, upotrebom brze *Fourierove* transformacije u automatiziranom algoritmu programa *ANSYS Maxwell* rastavlja se valni oblik sile na  $N_t / 2 = 200$  harmoničkih članova (raspon 0-10000 Hz) i ovi članovi automatizirano se prenose u *ANSYS Mechanical*.





Slika 5.7 Povezivanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna upotrebom *ANSYS Workbench* programskog alata

Kod električnih rotacijskih strojeva, najveće promjene magnetskih sila javljaju se u zoni zračnog raspora i zubi statora. Magnetske sile na zube glavna su pobuda za proračun mehaničkog odziva statora električnog stroja, pa je važno ispravno odrediti gustoću mreže u ovoj zoni za oba proračuna. Gustoću mreže moguće je podesiti na temelju izvještaja o uspješnosti preslikavanja sila iz elektromagnetskog u mehanički proračun, koji je dostupan preko sučelja programa *ANSYS Mechanical* (slika 5.8).

Exporting Volume Force Density Without Scaling...

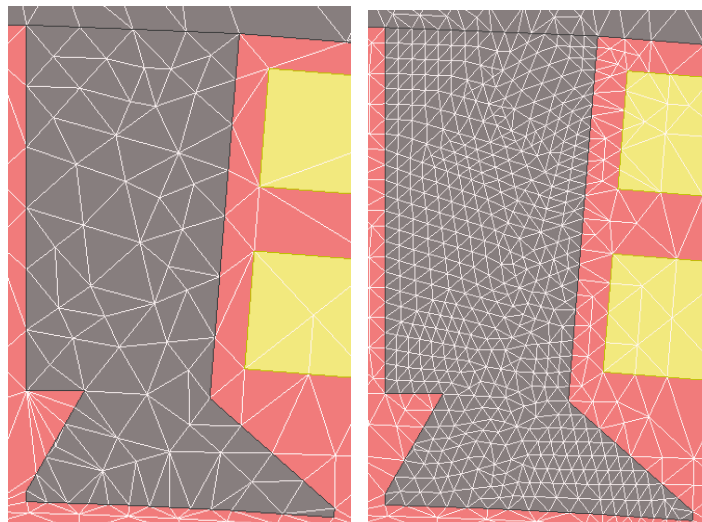
| Object | Total Force From Maxwell 2D | Total Force Mapped         | Ratio    |
|--------|-----------------------------|----------------------------|----------|
| Zub    | (-253.323N, -39.7738N, 0N)  | (-290.759N, -53.8912N, 0N) | 0.867152 |
| Zub_1  | (-14.3314N, -7.43465N, 0N)  | (-16.6234N, -9.49511N, 0N) | 0.843349 |
| Zub_2  | (-4.02054N, 1.35191N, 0N)   | (-3.96854N, 0.774949N, 0N) | 1.04003  |
| Zub_3  | (-125.658N, 2.68952N, 0N)   | (-115.139N, 1.26878N, 0N)  | 1.09154  |
| Zub_4  | (-1172.63N, -238.09N, 0N)   | (-1141.08N, -259.986N, 0N) | 1.02242  |
| Zub_5  | (-1694.1N, -619.593N, 0N)   | (-1683.04N, -604.442N, 0N) | 1.0087   |
| Zub_6  | (-2344.45N, -939.014N, 0N)  | (-2261.14N, -992.906N, 0N) | 1.02266  |
| Zub_7  | (-3668.27N, -2000.59N, 0N)  | (-3427.05N, -2015N, 0N)    | 1.05101  |
| Zub_8  | (-3441.08N, -2584.28N, 0N)  | (-3086.86N, -2270.53N, 0N) | 1.12303  |
| Zub_9  | (-3228.29N, -2893.57N, 0N)  | (-3138.63N, -2820.31N, 0N) | 1.02741  |
| Zub_10 | (-2957.11N, -3189.21N, 0N)  | (-2696.72N, -3277.9N, 0N)  | 1.02463  |
| Zub_11 | (-2706.94N, -3363.14N, 0N)  | (-2437.54N, -3032.38N, 0N) | 1.10964  |
| Zub_12 | (-2453.93N, -3580.65N, 0N)  | (-2423.14N, -3488.92N, 0N) | 1.02189  |
| Zub_13 | (-2158N, -3766.25N, 0N)     | (-2051.83N, -3675.37N, 0N) | 1.03121  |
| Zub_14 | (-1827.04N, -3924.12N, 0N)  | (-1979.59N, -4137.63N, 0N) | 0.943708 |
| Zub_15 | (-1498.49N, -4069.31N, 0N)  | (-1541.98N, -3841.34N, 0N) | 1.04763  |
| Zub_16 | (-690.35N, -3685.73N, 0N)   | (-713.176N, -3709.92N, 0N) | 0.992584 |
| Zub_17 | (-346.083N, -2229.82N, 0N)  | (-261.177N, -2202.29N, 0N) | 1.01749  |

Odstupanja u preslikavanju sila

Slika 5.8 Izvještaj o uspješnosti preslikavanja sila iz elektromagnetskog u mehanički proračun dostupan kroz sučelje programa *ANSYS Mechanical*

Navedene razlike nastaju zbog toga što elektromagnetski i mehanički program koriste zasebne alate za izradu mreže konačnih elemenata. Izrađene mreže nemaju savršeno preklapanje, pa se sile izračunate po elementima elektromagnetskog proračuna interpolacijskim algoritmom preslikavaju na mrežu mehaničkog proračuna (tzv. *Force Mapping*).

Da bi se za potrebe analiza spregnutim proračunima greška u prenosu sile iz elektromagnetskog u mehanički proračun svela na  $< 5 \%$ , gustoća mreže zuba povećana je 3 puta (na 10 - 15 čvorova po širini zuba) u odnosu na slučaj za standardne elektromagnetske proračune (4 - 5 čvorova po širini zuba). Ova razlika prikazana je slikom 5.8.



Slika 5.9 Mreža prikladna za standardne elektromagnetske proračune (lijevo) i mreža povećane gustoće za potrebe spregnutih numeričkih proračuna (desno)

Ukoliko se žele analizirati sile na pojedine zube, potrebno je svaki zub definirati kao zasebni element modela. Ovakav način modeliranja nije nužan za sprežanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna, ali je poželjan. Naime, ako su zubi i jaram statora modelirani kao jedna komponenta modela, tada za cijeli paket statora mora biti definirana gušća mreža konačnih elemenata, a ovo može značajno povećati potrebne računske resurse i usporiti proračune.

Izračuni napona mjernih svitaka, magnetskih sila koje djeluju na zube i vibracija statora, provedeni su za odabrana pogonska stanja, koja se međusobno razlikuju po izlaznoj snazi, faktoru snage, broju uključenih faza i iznosu fazne struje. Za simetrična i nesimetrična opterećenja navedena u tablici 5.4 provedena su i mjerenja, radi kasnije usporedbe rezultata. Kolonama u tablici prikazane su sljedeće veličine:

$S$  – prividna izlazna snaga generatora;

$\cos\varphi$  – faktor snage;

$P$  – radna izlazna snaga generatora;

$Q$  – reaktivna (jalova) izlazna snaga generatora;

$I$  – efektivna vrijednost fazne struje;

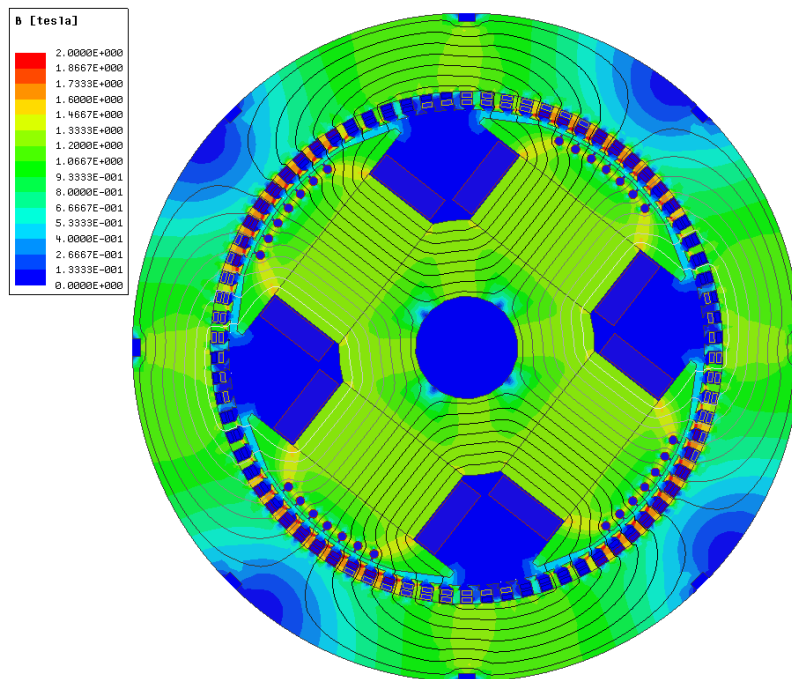
$U$  – linijski napon.

Tablica 5.4 Pregled računatih simetričnih i električki nesimetričnih pogonskih stanja generatora

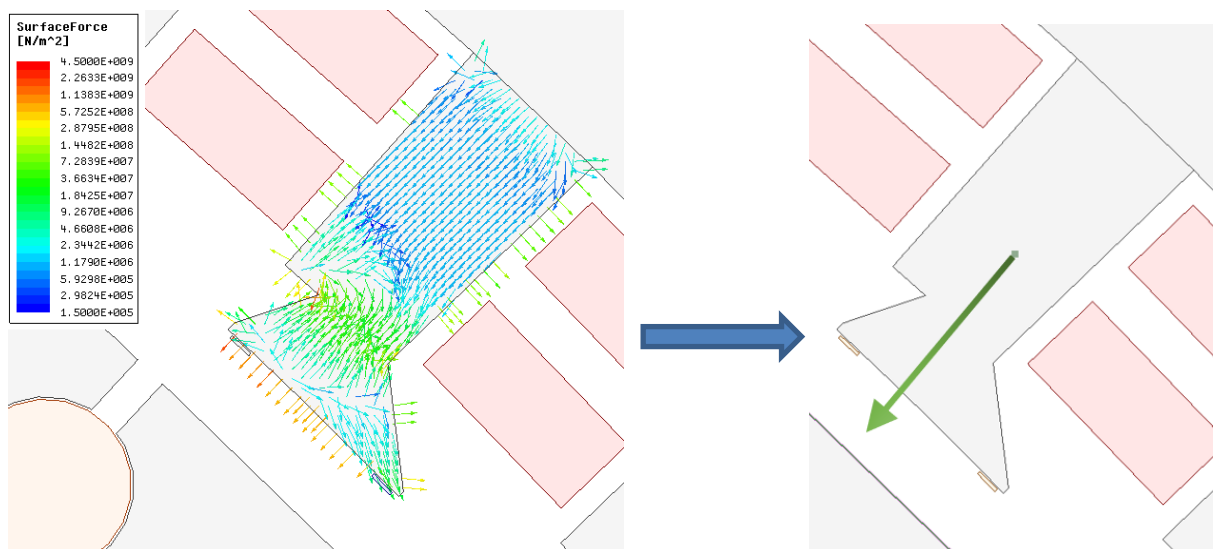
| Stanje praznog hoda                           |           |                   |          |            |         |         |
|-----------------------------------------------|-----------|-------------------|----------|------------|---------|---------|
| Red br.                                       | $S$ [kVA] | $\cos\varphi$ [-] | $P$ [kW] | $Q$ [kVAr] | $I$ [A] | $U$ [V] |
| 0.1.                                          | 0         | 0                 | 0        | 0          | 0       | 200     |
| 0.2.                                          | 0         | 0                 | 0        | 0          | 0       | 400     |
| Simetrična opterećenja                        |           |                   |          |            |         |         |
| Red br.                                       | $S$ [kVA] | $\cos\varphi$ [-] | $P$ [kW] | $Q$ [kVAr] | $I$ [A] | $U$ [V] |
| 1.1.                                          | 90        | 1,0               | 90       | 0          | 130     | 400     |
| 1.2.                                          | 90        | 0,7               | 68       | 69         | 130     | 400     |
| 1.3.                                          | 90        | 0,08              | 7,2      | 91         | 130     | 400     |
| 1.4.                                          | 180       | 1,0               | 180      | 0          | 260     | 400     |
| 1.5.                                          | 180       | 0,7               | 129      | 131        | 260     | 400     |
| 1.6.                                          | 180       | 0,08              | 15,9     | 180        | 260     | 400     |
| Električki nesimetrična opterećenja po fazama |           |                   |          |            |         |         |
| Red br.                                       | $S$ [kVA] | $\cos\varphi$ [-] | $P$ [kW] | $Q$ [kVAr] | $I$ [A] | $U$ [V] |
| 2.1.                                          | 52        | 1,0               | 52       | 0          | 130     | 400     |
| 2.2.                                          | 52        | 0,7               | 36,4     | 37,1       | 130     | 400     |
| 2.3.                                          | 52        | 0,0               | 0        | 52         | 130     | 400     |
| 2.4.                                          | 90        | 0,7               | 63       | 64         | 225     | 400     |
| 2.5.                                          | 104       | 1,0               | 104      | 0          | 260     | 400     |
| 2.6.                                          | 104       | 0,7               | 73       | 74         | 260     | 400     |
| 2.7.                                          | 104       | 0,0               | 0        | 104        | 260     | 400     |

## 5.2. Rezultati elektromagnetskih proračuna za simetrično opterećenje

Osim numeričkih izlaznih rezultata, programski paket *ANSYS Maxwell* omogućuje i grafički prikaz magnetskog polja u stroju za određeni trenutak. Slika 5.10 prikazuje raspodjelu gustoće magnetskog toka (magnetske indukcije) u 2D modelu za stanje praznog hoda generatora, uz vrijednost linijskog napona  $U = 400$  V, u vremenskom trenutku  $t = 140$  ms, kad je završen simulacijski proračun, a slika 5.11 raspodjelu sila koje djeluju na jedan zub. Osim raspodjele sila po čvorovima, programom je moguće odrediti i rezultatni vektor sile na zub, zajedno s koordinatama njegovog ishodišta.

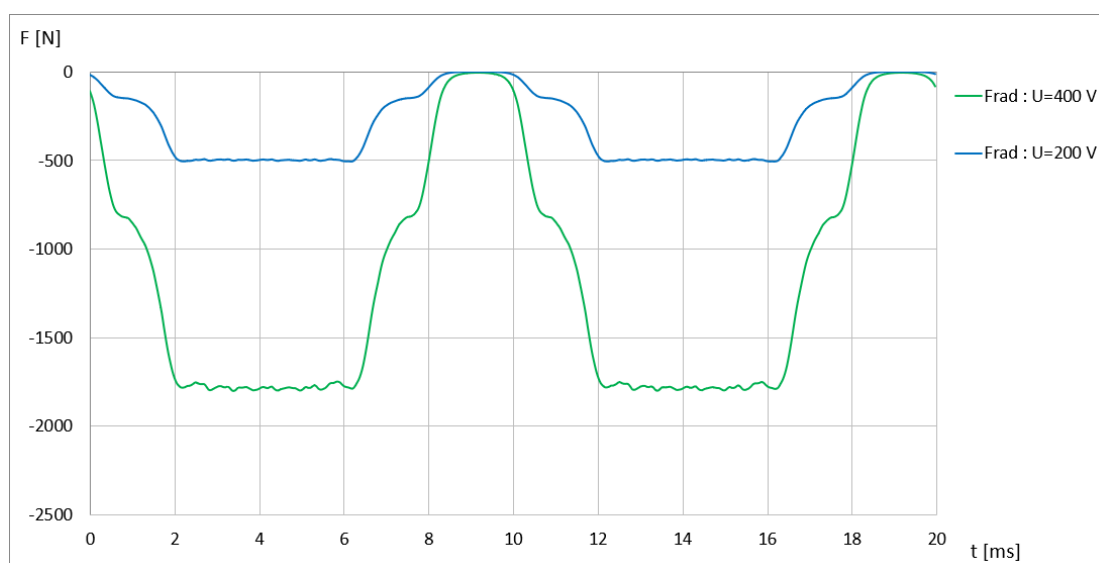


Slika 5.10 Raspodjela gustoće magnetskog toka sinkronog generatora u praznom hodu

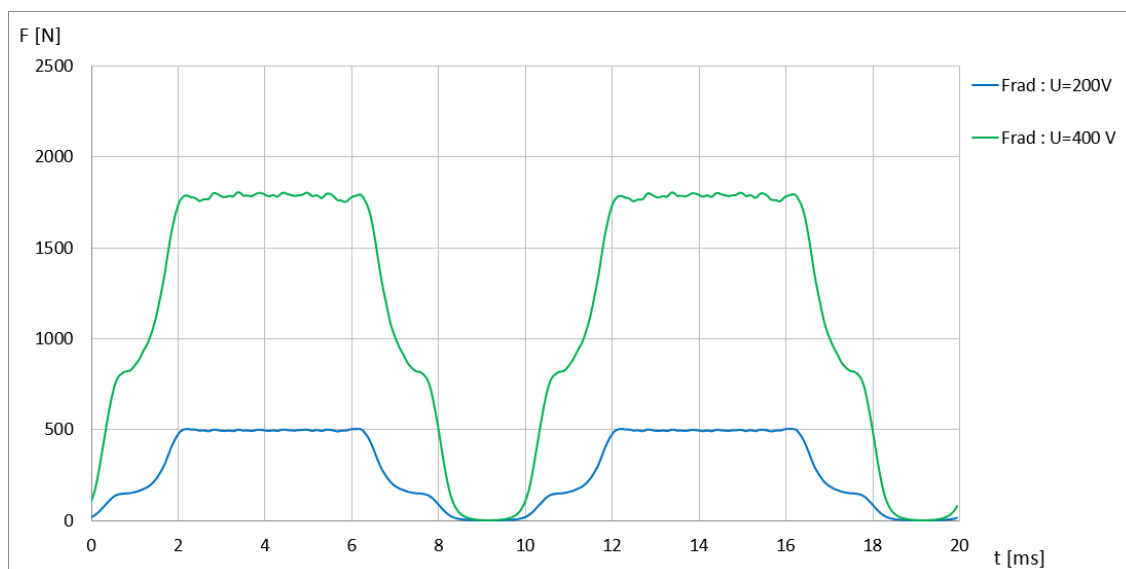


Slika 5.11 Sile izračunate po elementima zuba (lijevo) i pretvorba u rezultatni vektor (desno)

U uzbuđenom generatoru magnetske sile privlače zube prema polovima rotora, tj. u smjeru suprotnom od radijalne osi cilindričnog koordinatnog sustava (slika 5.11). Slikom 5.12 prikazana je vremenska promjena radijalne sile na jedan zub tijekom jedne periode osnovnog harmonika napona ( $t=20$  ms), u navedenom koordinatnom sustavu. Na slici su usporedno prikazani valni oblici radijalne sile za prazni hod generatora uz vrijednosti linijskog napona 200 V i 400 V. Radi prirodnije grafičke vizualizacije, podudarnosti pojmova veće=više i lakšeg objašnjavanja fizikalnih pojava, u nastavku rada prikazane su apsolutne vrijednosti radijalne sile (slika 5.13).

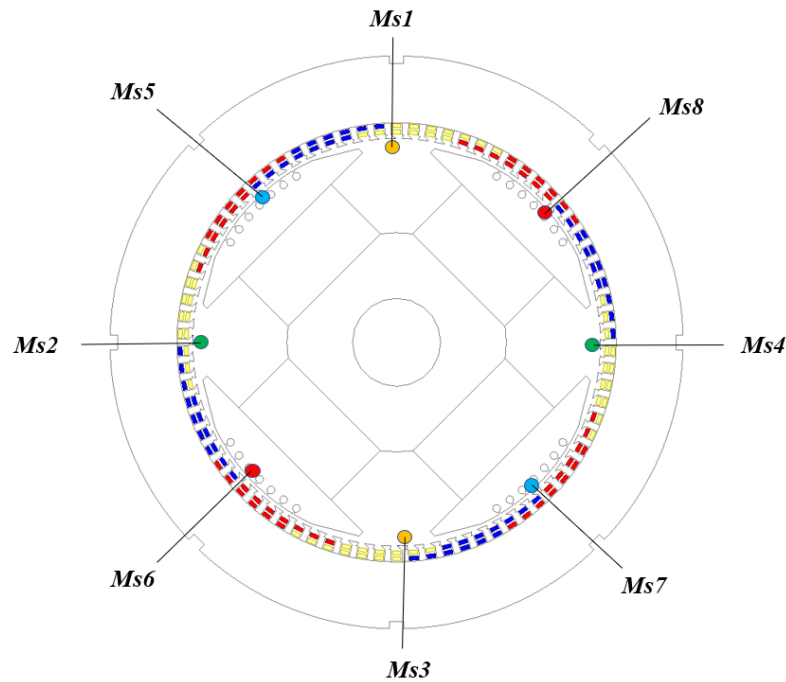


Slika 5.12 Radijalna sila na zub statora za slučajeve praznog hoda s linijskim naponom iznosa 200 i 400 V



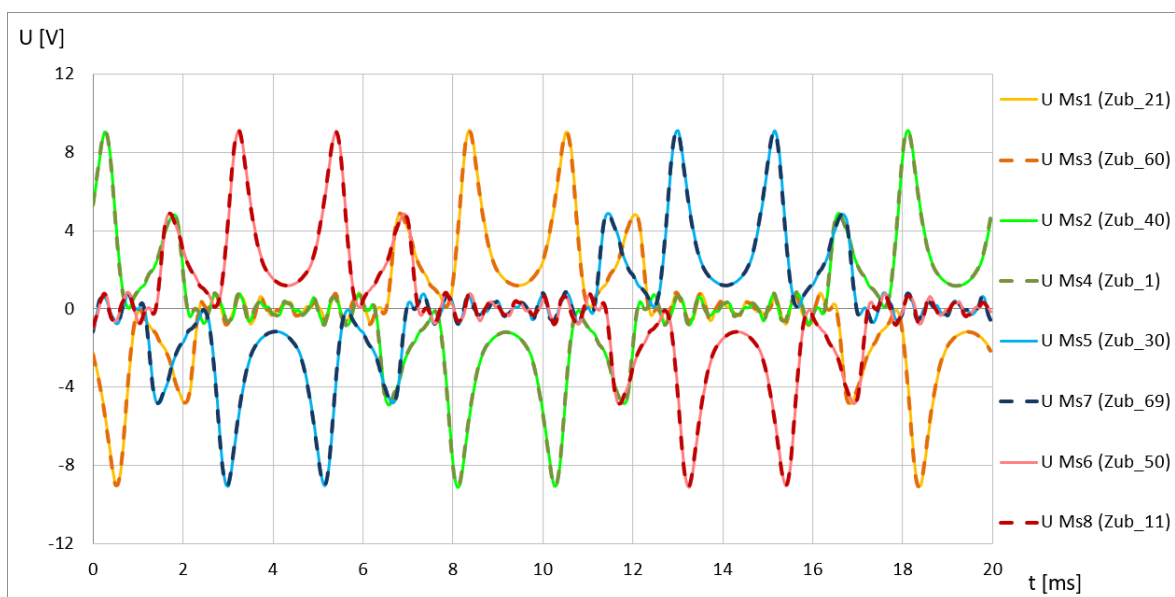
Slika 5.13 Apsolutna vrijednost radijalne sile na zub za slučajeve praznog hoda s linijskim naponom iznosa 200 i 400 V

U 2D modelu generatora za svaki zub statora moguće je odrediti vremensku promjenu sile kroz jednu periodu osnovnog harmonika napona. Na mjestima gdje su modelirani mjerni svitci za analizu magnetskog polja (pozicije mjernih svitaka u proračunskom modelu stroja prikazane su na slici 5.14), moguće je odrediti i vremensku promjenu induciranih napona tijekom vrtnje rotora.

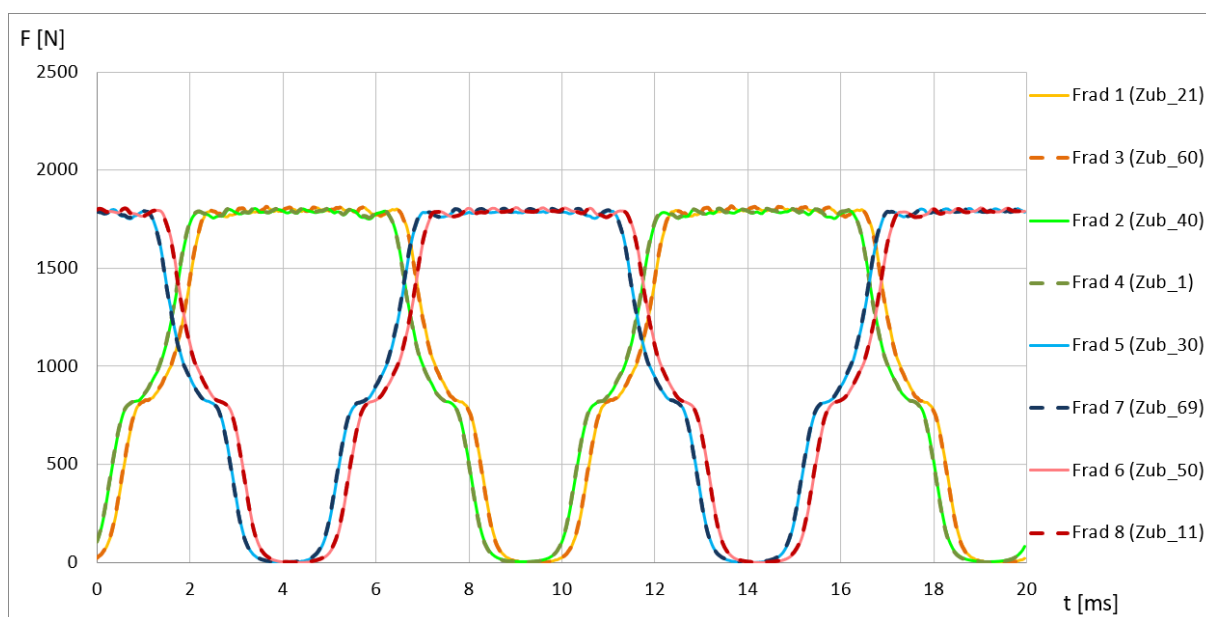


Slika 5.14 Pozicije mjernih svitaka *Ms1-Ms8* u proračunskom modelu generatora

Slika 5.15. prikazuje napone inducirane u mjernim svitcima, a slika 5.16 valne oblike radijalnih sila na zube ispod kojih se ti svitci nalaze.



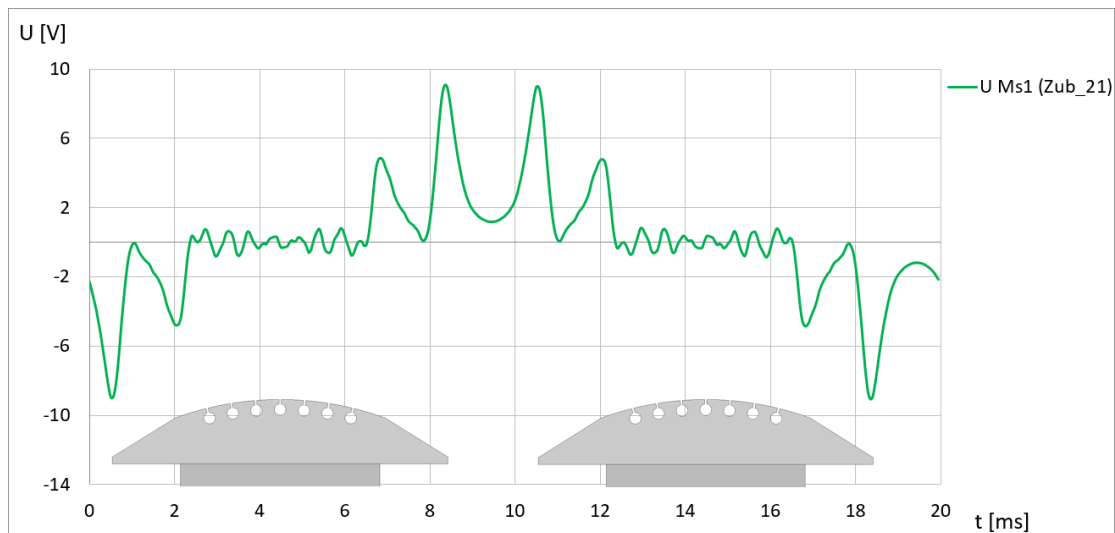
Slika 5.15 Inducirani naponi na pozicijama mjernih svitaka *Ms1-Ms8*

Slika 5.16 Radijalne sile na pozicijama mjernih svitaka  $Ms1$ - $Ms8$ 

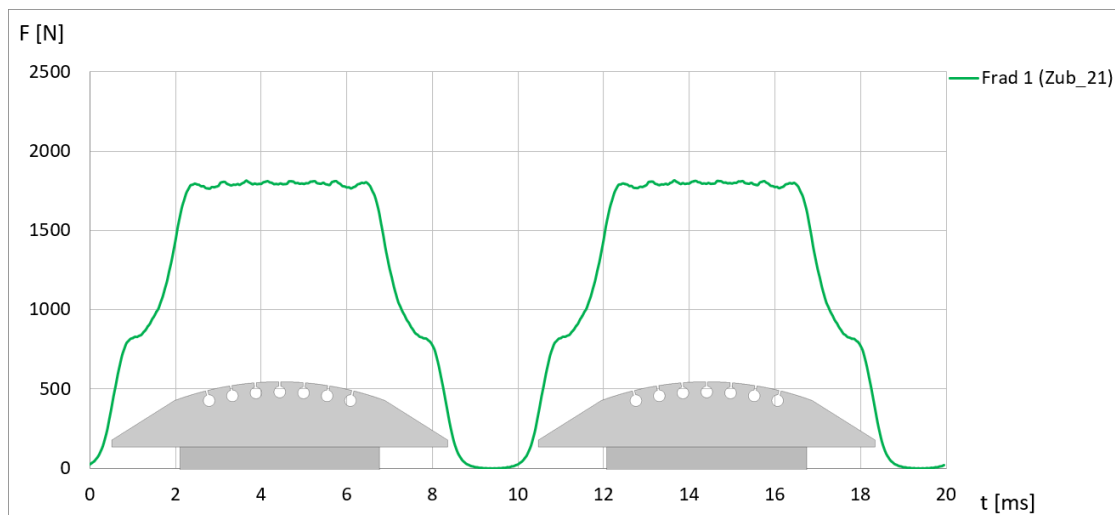
Kako bi se objasnili valni oblici napona induciranih u mjernim svitcima i sila na zube, potrebno je poznavati fizikalnu sliku stroja, ali i utjecaj aktivnih dijelova generatora na njihov oblik. Za osnovno razumijevanje valnih oblika ovih veličina, dovoljno je proučiti situaciju za jedan odabrani zub.

Slikom 5.18 prikazana je vremenska promjena iznosa radijalne sile zuba iznad mjernog svitka oznake  $Ms1$  (pozicija u modelu generatora prema slici 5.14) za prazni hod generatora. Na istoj slici prikazana je korelacija pozicije i oblika polova rotora s valnim oblikom sile. Prikazana polna papuča tzv. trapeznog oblika može se podijeliti na tri segmenta: Središnji lučni dio iznad kojeg je udaljenost između pola i unutarnjeg promjera statora konstantna i dva rubna segmenta kod kojih se postepeno povećava zračni raspor prema statoru.

Kad nakon međupolnog prostora u zonu promatranog zuba nailazi trapezni dio polne papuče, smanjuje se zračni raspor između tog zuba i rotora. Uslijed toga povećavaju se iznosi magnetske indukcije zuba i magnetske sile koja djeluje na promatrani zub statora. Dok se ispod zuba nalazi centralni dio polne papuče, iznos sile na zub dostiže najveću vrijednost, a manje oscilacije su posljedica djelovanja prigušnog namota smještenog u utore na centralnom dijelu polne papuče. Izlazom centralnog dijela polne papuče iz zone promatranog zuba sila se počne smanjivati, sve do nulte vrijednosti u trenutku kad ispod zuba prolazi simetrala međupolnog prostora. Prikazani valni oblik sile simetričan je u odnosu na centralnu os pola. Ovo je u skladu sa simetričnom raspodjelom magnetskog polja na oba kraja polne papuče u praznom hodu (slika 5.10).



Slika 5.17 Vremenska promjena napona mjernog svitka u praznom hodu generatora



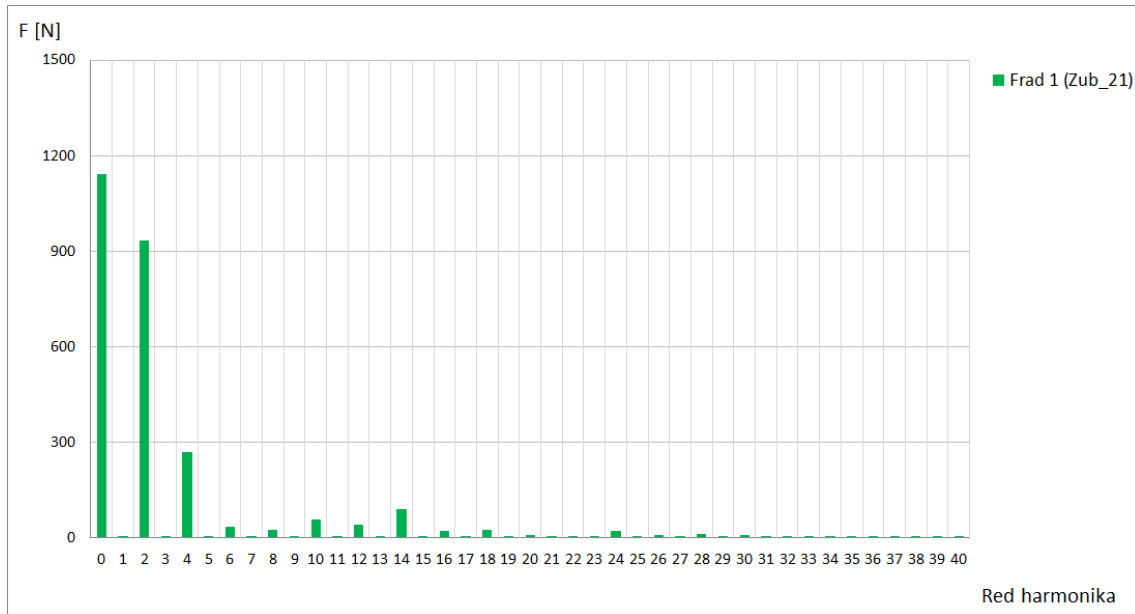
Slika 5.18 Vremenska promjena sile na jedan zub u praznom hodu

Ako se promotri naponski odziv svitka  $MsI$ , u valnom obliku induciranog napona mogu se uočiti nagli porasti i propadi. Napon u svitku inducira se uslijed promjene njime obuhvaćenog magnetskog toka. Najveća promjena napona javlja se u trenutku kada rub polne papuče nailazi na ili izlazi iz zone zuba. Drugi značajno istaknuti vrh u valnom obliku napona pojavljuje se kad ispod zuba polna papuča prelazi iz trapeznog u lučni segment. Dok se ispod zuba nalazi centralni dio polne papuče, nema veće promjene toka pa ni značajnijeg napona u svitku. U ovoj zoni uočljivi manji vrhovi napona javljaju se uslijed prolaza štapova prigušnog namota ispod promatranog zuba.

Magnetski tokovi u zubima ispod susjednih polova međusobno su suprotnog magnetskog polariteta. Do promjene smjera magnetskog toka kroz zub dolazi kada se ispod zuba nalazi međupolni prostor.



Upotrebom brze *Fourierove* transformacije moguće je odrediti spektar frekvencija valnog oblika radijalne sile koja djeluje na zub. Na slici 5.19 red harmonika definiran je preko višekratnika osnovne frekvencije od 50 Hz.



Slika 5.19 Frekvencijski spektar valnog oblika radijalne sile na zub u praznom hodu

U harmonijskom sastavu radijalne sile uz srednju vrijednost (0. harmonik) uočavaju se sljedeći istaknuti harmonici:

- 2. – definiran osnovnim harmonikom magnetske indukcije;
- 4. – definiran omjerom širine lučnog dijela polne papuče i dva polna koraka  $2 \cdot \tau_p$ ;
- 6. – definiran omjerom širine zone štapova prigušnih namota i dva polna koraka  $2 \cdot \tau_p$ ;
- 8. – definiran omjerom širine međupolnog prostora i dva polna koraka  $2 \cdot \tau_p$ ;
- 10. – definiran omjerom trapeznog dijela polne papuče i dva polna koraka  $2 \cdot \tau_p$ ;
- 12. i 14. – utorski harmonici prigušnog namota 1. reda:

$$h_{pn1} = 1 \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{360^\circ}{\tau_{pn} \cdot 2p} \pm 1 \right) \quad (5.1)$$

- 16. – definiran širinom međupolnog prostora na kojem je vrijednost sile bliska nuli;
- 18. – definiran razmakom krajnjeg utora prigušnog namota od trapeznog brida papuče;
- 24. i 28. – utorski harmonici prigušnog namota 2. reda:

$$h_{pn2} = 2 \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{360^\circ}{\tau_{pn} \cdot 2p} \pm 1 \right) \quad (5.2)$$

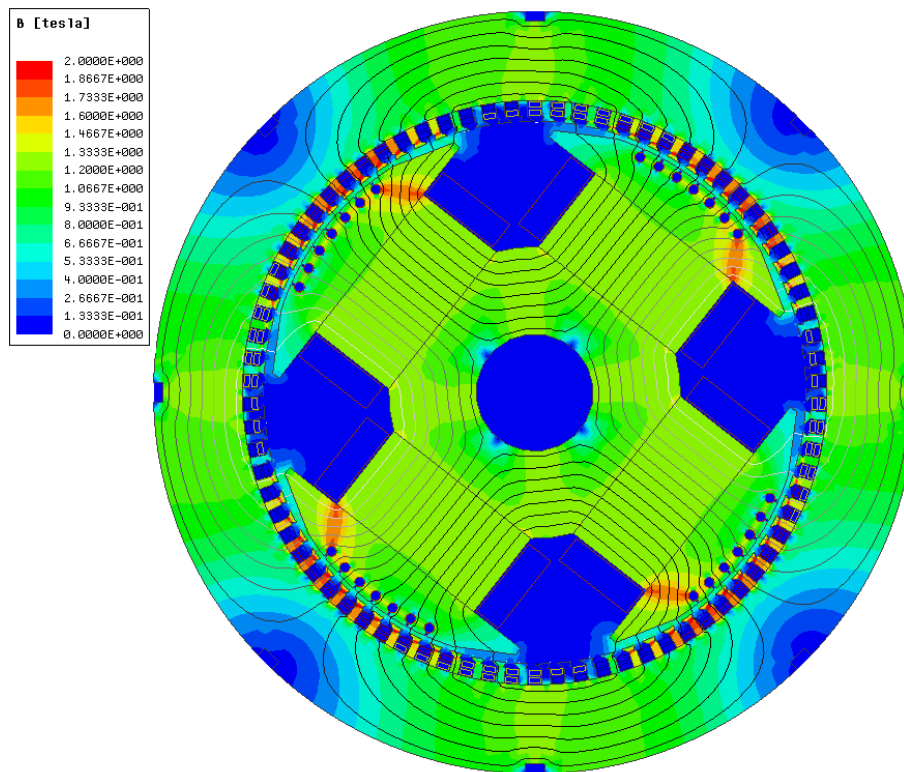
Korak prigušnog namota kod analiziranog generatora jednak je koraku utora statora:

$$\tau_{pn} = \tau_s = \frac{360^\circ}{N_2} = \frac{360^\circ}{78}. \quad (5.3)$$

### 5.2.1. Utjecaj povećanja snage na magnetske sile

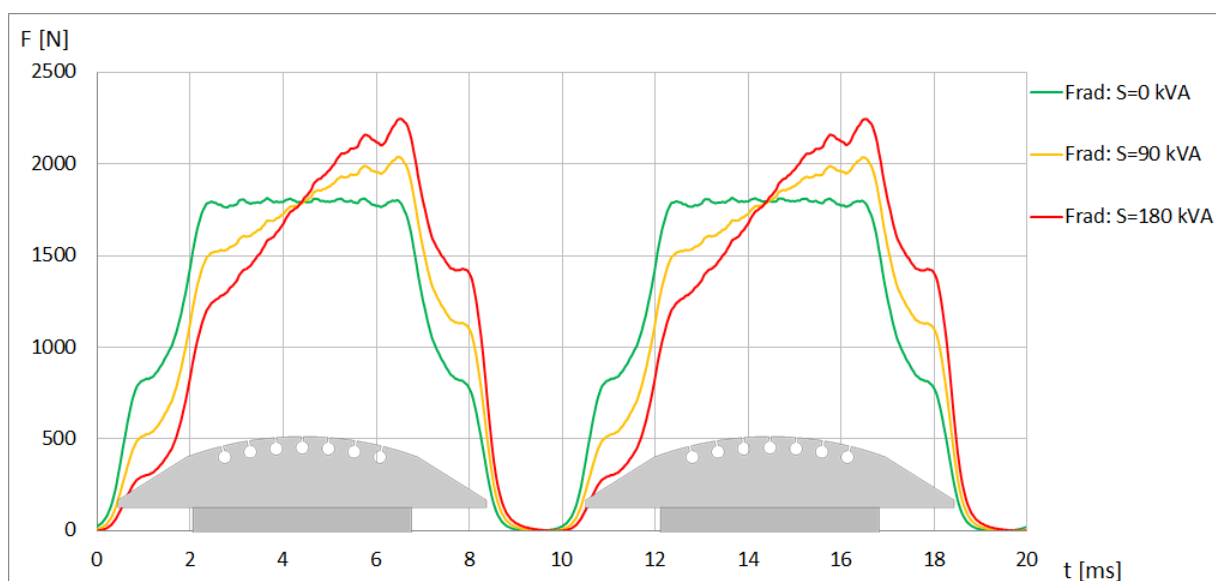
Magnetska slika opterećenog stroja (slika 5.20) može se značajno razlikovati od one u praznom hodu. Slikom 5.20 prikazana je slika raspodjele gustoće magnetskog toka za slučaj opterećenja uz jedinični faktor snage, pri smjeru vrtnje suprotnom od kazaljke na satu.

U slučaju opterećenja, struje armaturnog namota stvaraju vlastito magnetsko polje, koje međudjeluje s magnetskim poljem rotora. Ovo dovodi do promjena magnetskog toka unutar stroja pa time i do promjena sila koje djeluju na zube.

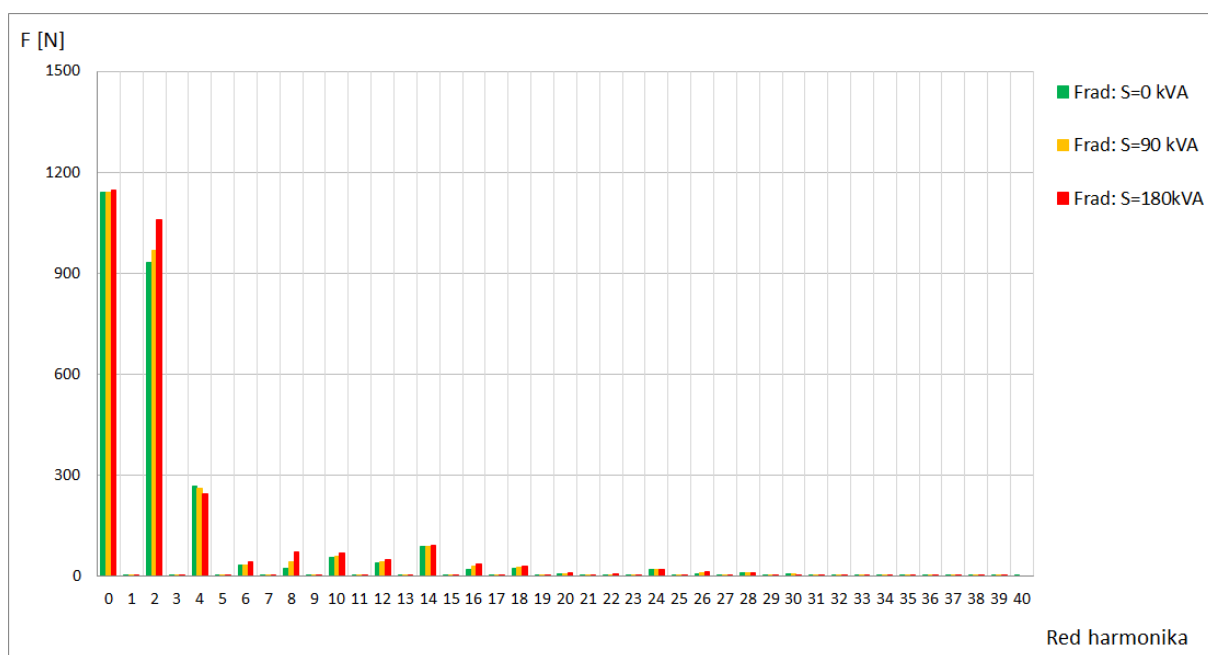


Slika 5.20 Raspodjela gustoće magnetskog toka sinkronog generatora za simetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=180\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$

Slikom 5.21 usporedno su prikazani valni oblici radijalne sile jednog zuba za slučajeve praznog hoda, opterećenja iznosa  $S=90\text{ kVA}$  i  $S=180\text{ kVA}$  uz nazivni napon  $U=400\text{ V}$  i jedinični faktor snage  $\cos\varphi=1$ . Moguće je uočiti da su valni oblici sile na zub za razmatrana opterećenja značajno drugačiji nego u praznom hodu. S povećanjem snage, povećava se i maksimalna vršna vrijednost sile koja djeluje na zub. Kod približno radnog opterećenja (faktor snage  $\cos\varphi=1$ ), glavno magnetsko polje zaostaje za polovima, tj. njegov maksimum pomaknut je od simetrale pola suprotno smjeru rotacije. U takvom slučaju iznos radijalne sile najveći je upravo kada završni dio lučnog dijela pola prolazi ispod zuba.

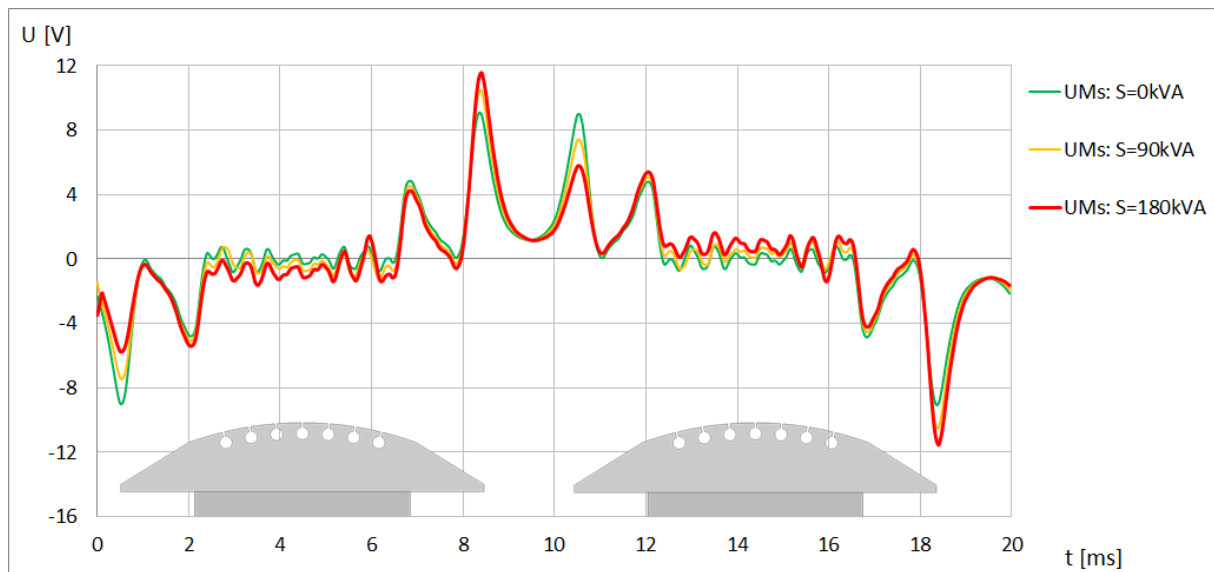


Slika 5.21 Utjecaj povećanja snage na valni oblik radijalne sile na zub za slučaj jediničnog faktora snage  $\cos\varphi = 1$ .



Slika 5.22 Utjecaj povećanja snage na harmonike radijalne sile na zub za slučaj jediničnog faktora snage  $\cos\varphi = 1$ .

Slikom 5.22 prikazana je promjena harmonika radijalne sile s povećanjem snage uz faktor  $\cos\varphi = 1$ . Moguće je vidjeti da u ovom slučaju srednja vrijednost magnetske sile (0. harmonik) ostaje neizmijenjenog iznosa, dok se porast bilježi kod harmonika 2., 6., 8., 10., 12. i 16. reda. Zanimljivo je primijetiti kako se iznos 4. harmonika smanjuje s povećanjem opterećenja.

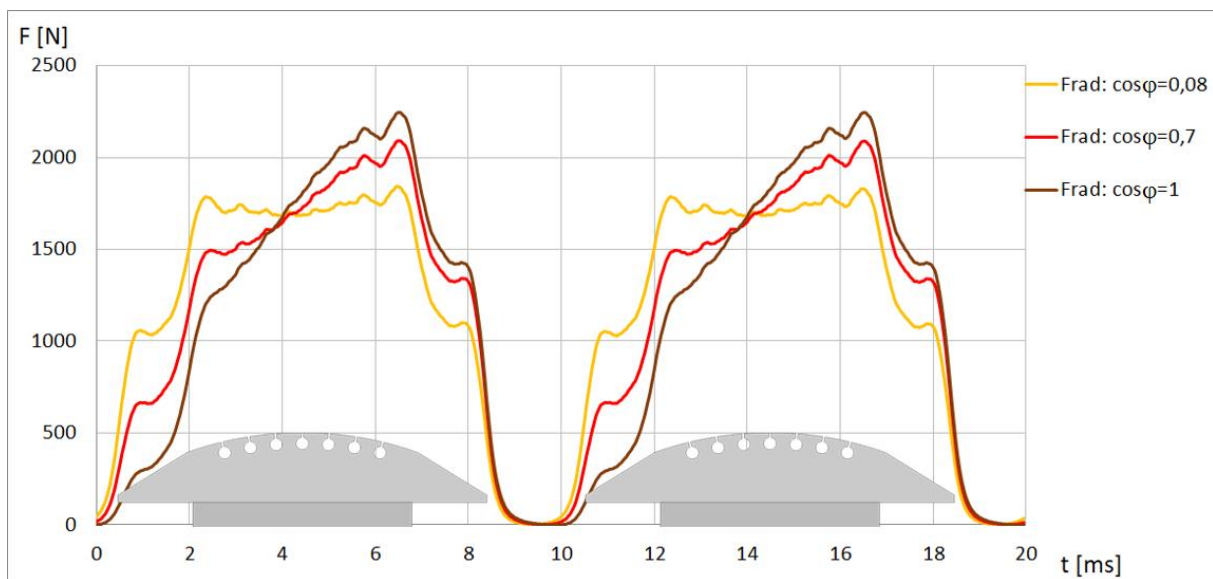


Slika 5.23 Utjecaj povećanja snage na valni oblik napona mjernog svitka

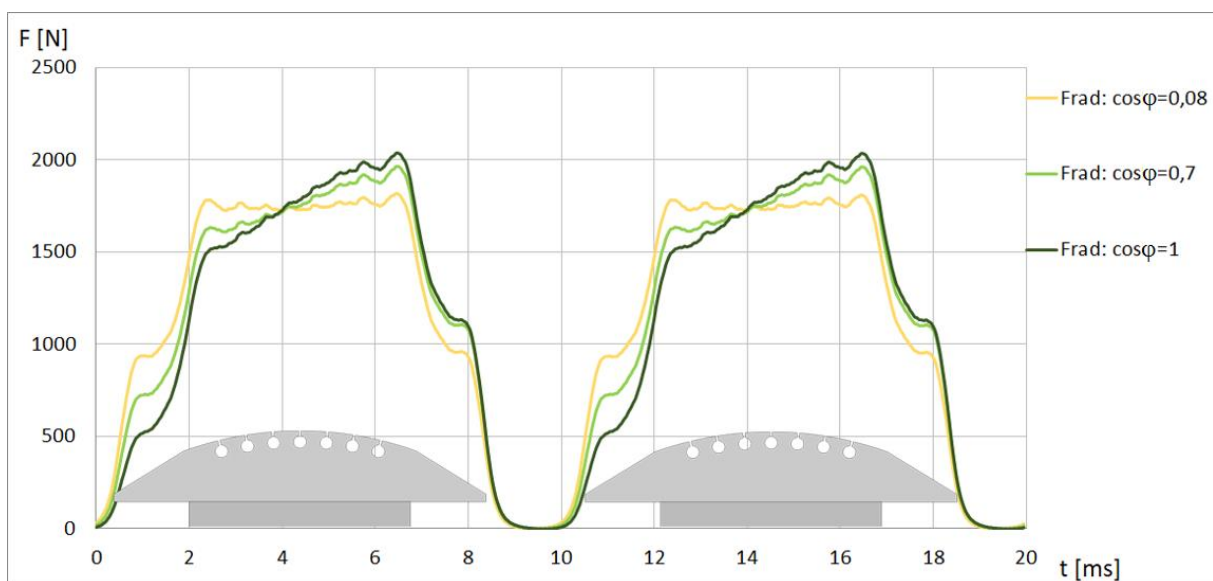
Povećanje snage dovodi i do promjene valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku (slika 5.23). I ovdje valni oblik prestaje biti simetričan, tj. sve se više izobličuje s porastom snage. Ovo je očekivana pojava, budući da je u slučaju jediničnog faktora snage magnetski tok nesimetrično raspoređen po obodu polne papuče. Na strani polne papuče gdje pol nailazi ispod zone promatranog zuba, smanjuje se iznos vrhova u valnom obliku induciranog napona. Na izlazu polne papuče iz prostora zuba, javlja se recipročno povećan vrh u induciranom naponu svitka. Tijekom prolaska centralnog dijela polne papuče ispod mjernog svitka, magnetski tok svitka povećava se približno linearno, uslijed čega se u induciranom naponu pojavljuje istosmjerna komponenta. Što je opterećenje veće, to je na ovom dijelu krivulje veće odstupanje induciranog napona od nulte vrijednosti.

### 5.2.2. Utjecaj promjene faktora snage na magnetske sile

Električni generatori kojima je primarna svrha proizvodnja električne energije, većinom rade s radno-induktivnim faktorom snage koji se nalazi unutar granica  $0,7 \leq \cos \varphi \leq 1$ . Međutim, postoje i strojevi specijalne namjene kao što su generatori za ispitne stanice transformatora, koji rade u tzv. induktivnom (naduzbuđenom) radu s faktorom snage bliskim nuli ( $\cos \varphi \approx 0$ ). Radi utvrđivanja kako sila na zub ovisi s promjenom faktora snage provedeni su usporedni proračuni za tri različita iznosa faktora snage:  $\cos \varphi = 1$ ;  $\cos \varphi = 0,7$  i  $\cos \varphi = 0,08$ . Slikom 5.24 usporedno su prikazane sile za ova tri slučaja, uz prividnu snagu  $S = 180$  kVA, a slikom 5.25 za prividnu snagu dvostruko manjeg iznosa  $S = 90$  kVA.

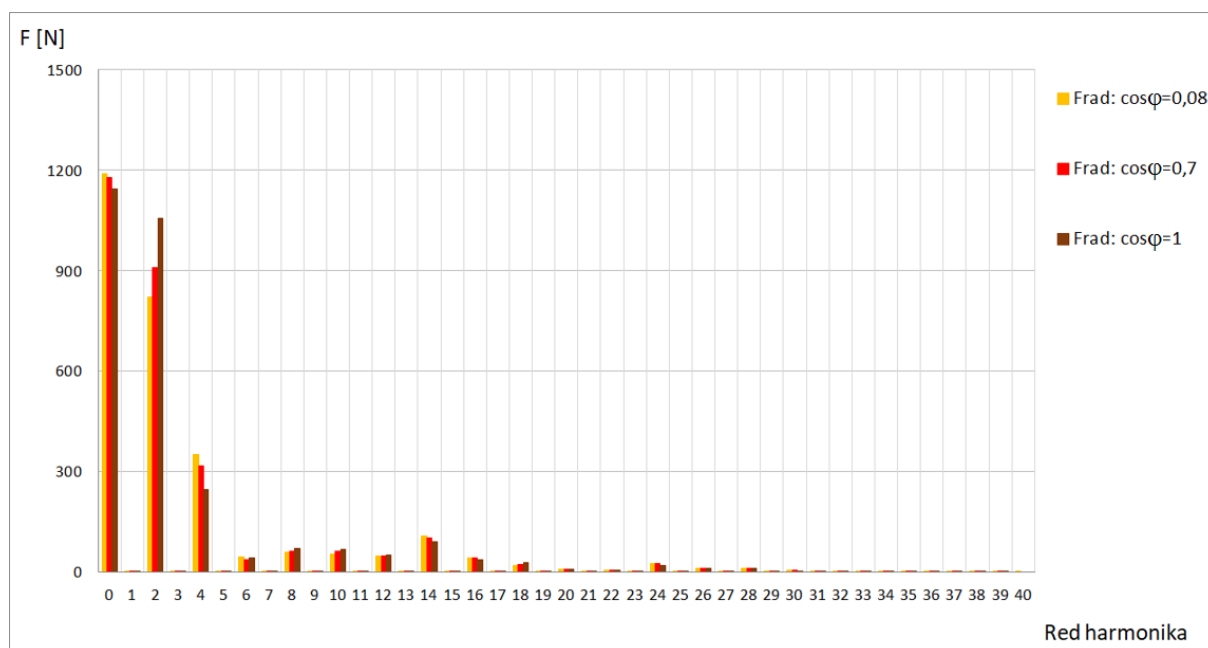


Slika 5.24 Utjecaj promjene faktora  $\cos \varphi$  pri  $S = 180$  kVA na valni oblik radijalne sile zuba

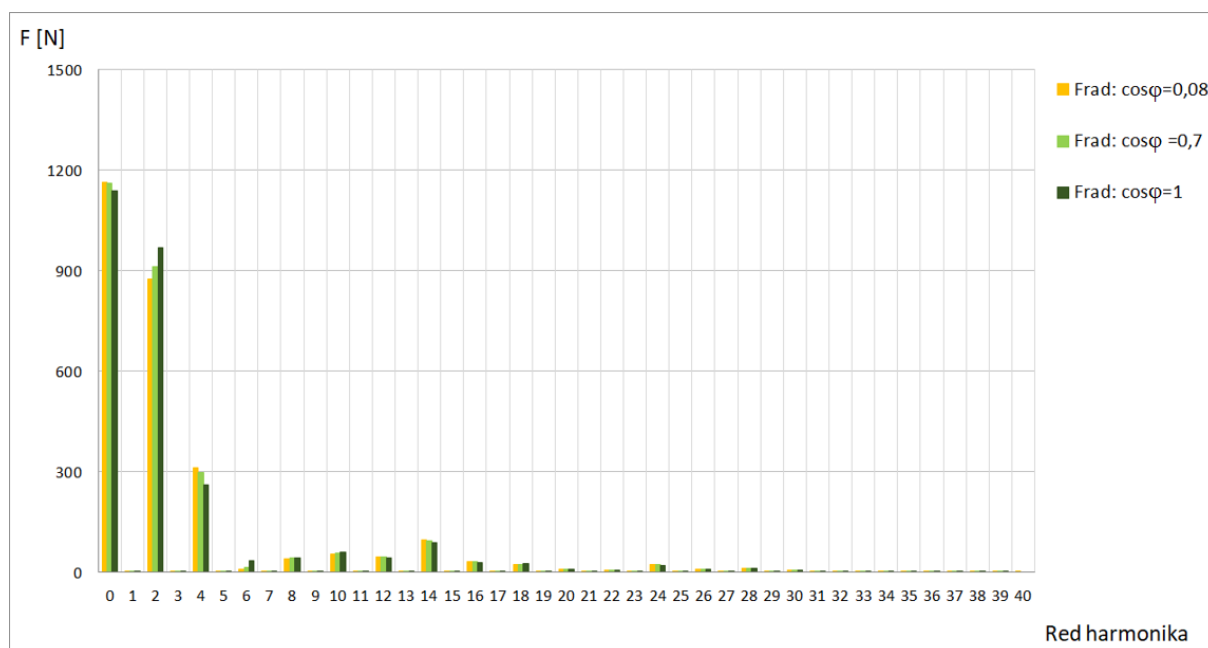


Slika 5.25 Utjecaj promjene faktora  $\cos \varphi$  pri  $S = 90$  kVA na valni oblik radijalne sile zuba

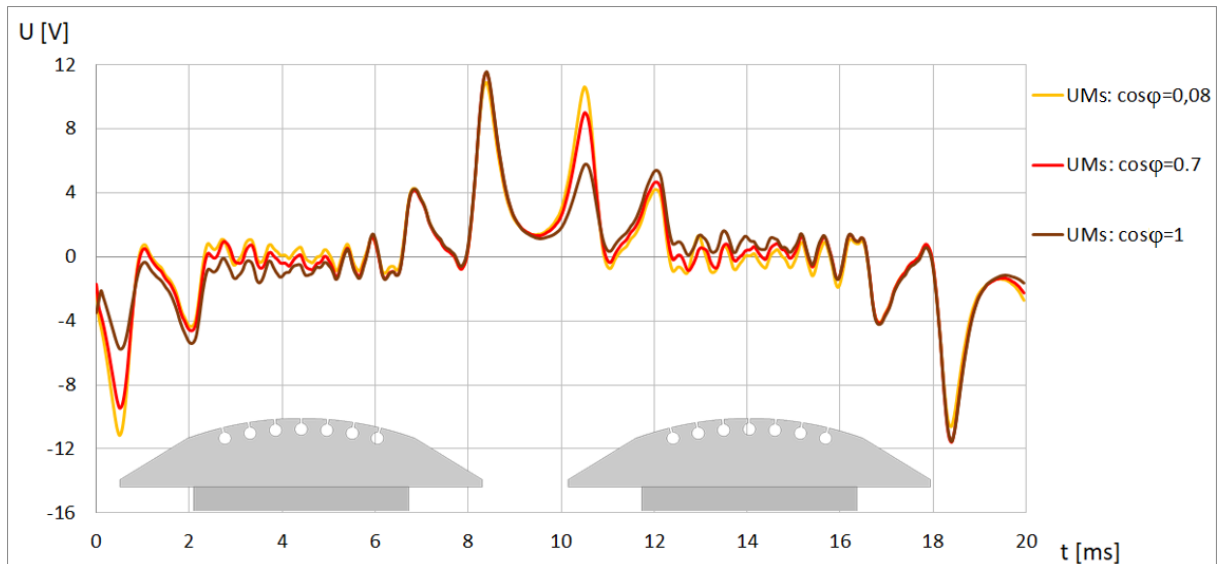
Usporedbom valnih oblika moguće je uočiti kako unutar raspona faktora snage uobičajenih za generatore namijenjene proizvodnji električne energije ( $0,7 \leq \cos\varphi \leq 1$ ), sile na zub imaju karakteristike slične prikazanima u prethodnom poglavlju. Uočljivo je da se s padom faktora snage smanjuje maksimalna vršna vrijednost sile dok se nagib njenog porasta tijekom prolaska polne papuče ispod zuba ublažava. Za slučaj rada s faktorom snage bliskim nuli, valni oblik sile postaje sličan onome u praznom hodu. U frekvencijskom spektru najveće promjene uočljive su na 2. i 4. harmoniku, no zamjećuje se i razlika srednje vrijednosti sile (0. harmonik).



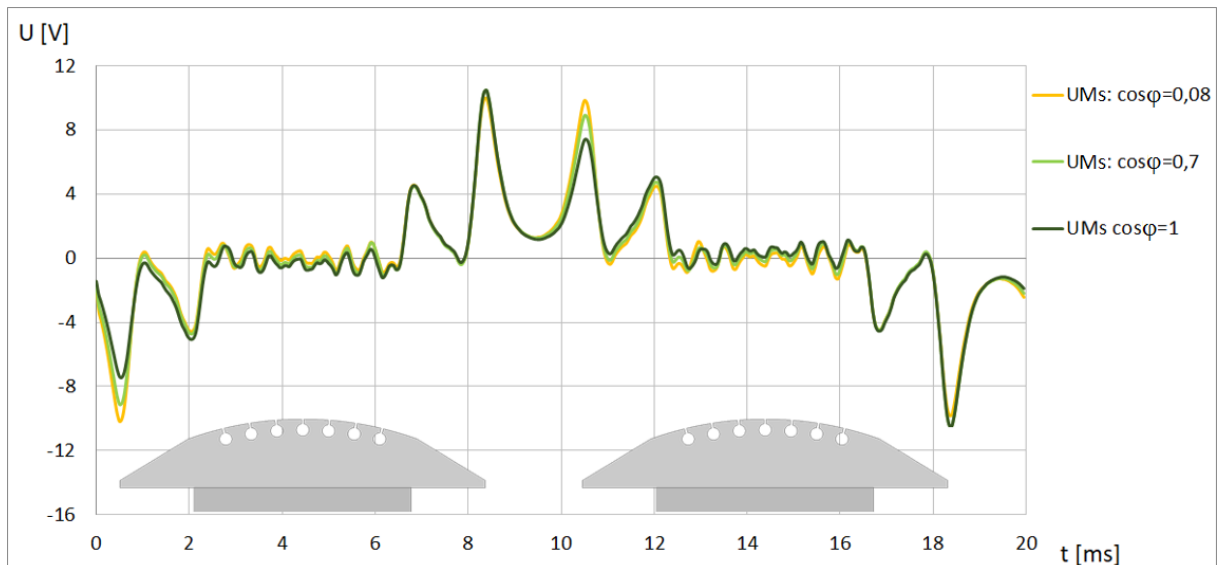
Slika 5.26 Utjecaj promjene faktora  $\cos\varphi$  pri  $S=180$  kVA na harmonike radijalne sile



Slika 5.27 Utjecaj promjene faktora  $\cos\varphi$  pri  $S=90$  kVA na harmonike radijalne sile zuba



Slika 5.28 Utjecaj promjene faktora snage  $\cos\varphi$  pri  $S=180$  kVA na napon mjernog svitka

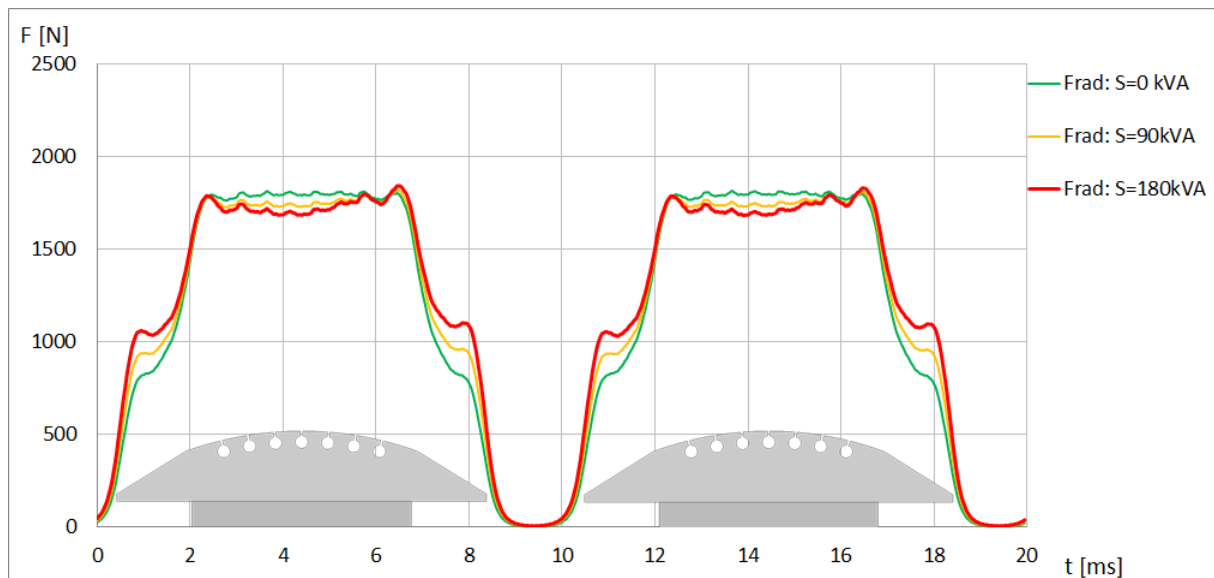


Slika 5.29 Utjecaj promjene faktora  $\cos\varphi$  pri  $S=90$  kVA na napon mjernog svitka

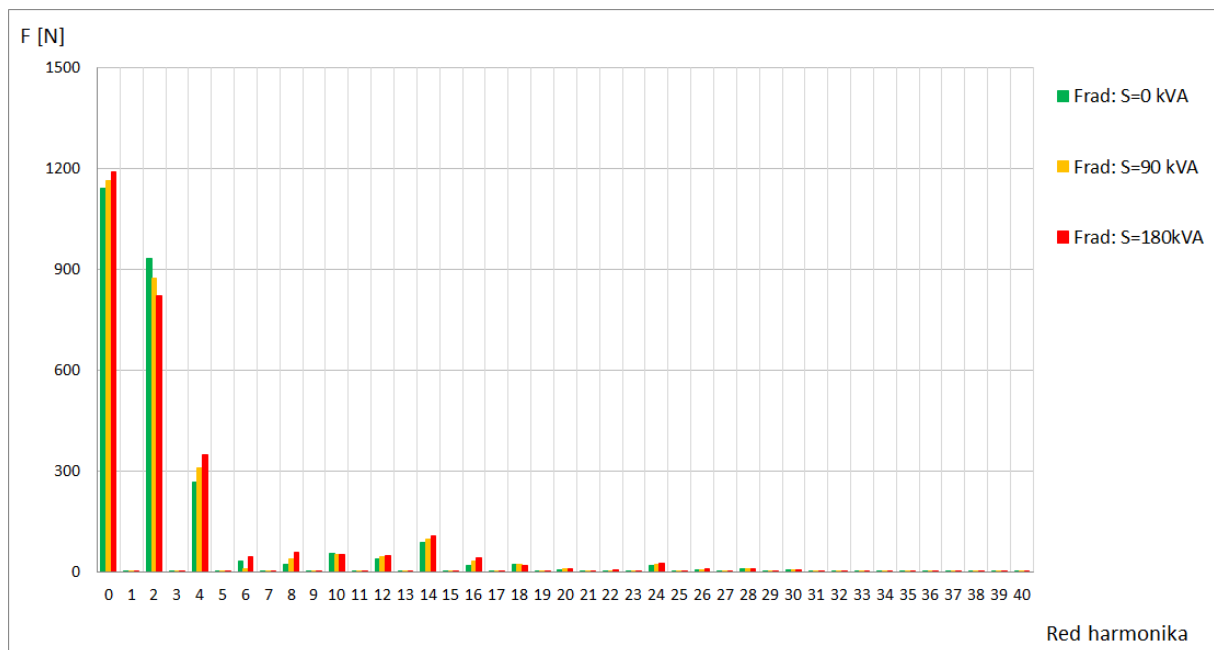
Proučavanjem napona mjernog svitka, moguće je zamijetiti kako promjena faktora snage ima najveći utjecaj na napon koji se u svitku inducira pri nailasku polne papuče pod promatrani zub. Zanimljivo je uočiti i da situacija pri izlazu pola iz prostora promatranog zuba praktički ne ovisi o faktoru snage. Što je faktor snage niži, to je valni oblik simetričniji i više podsjeća na valni oblik sile u praznom hodu.

Razlike između situacije praznog hoda i opterećenja uz faktor snage blizak nuli prikazane su slikama 5.30, 5.31 i 5.32.

Usporedbom valnih oblika radijalne sile koja djeluje na zub pri faktoru snage  $\cos\varphi=0,08$  (slika 5.30), moguće je uočiti kako s porastom opterećenja dolazi do sedlastog pada iznosa sile u zoni koja odgovara prolazu centralnog dijela polne papuče ispod zuba. Razlika se uočava i na dijelovima krivulje koji odgovaraju prolasku trapeznog dijela polne papuče ispod zuba, gdje raste vrijednost sile s porastom opterećenja. S porastom snage povećavaju se 4. i 14. harmonik te srednja vrijednost sile, dok se 2. harmonik sile smanjuje.



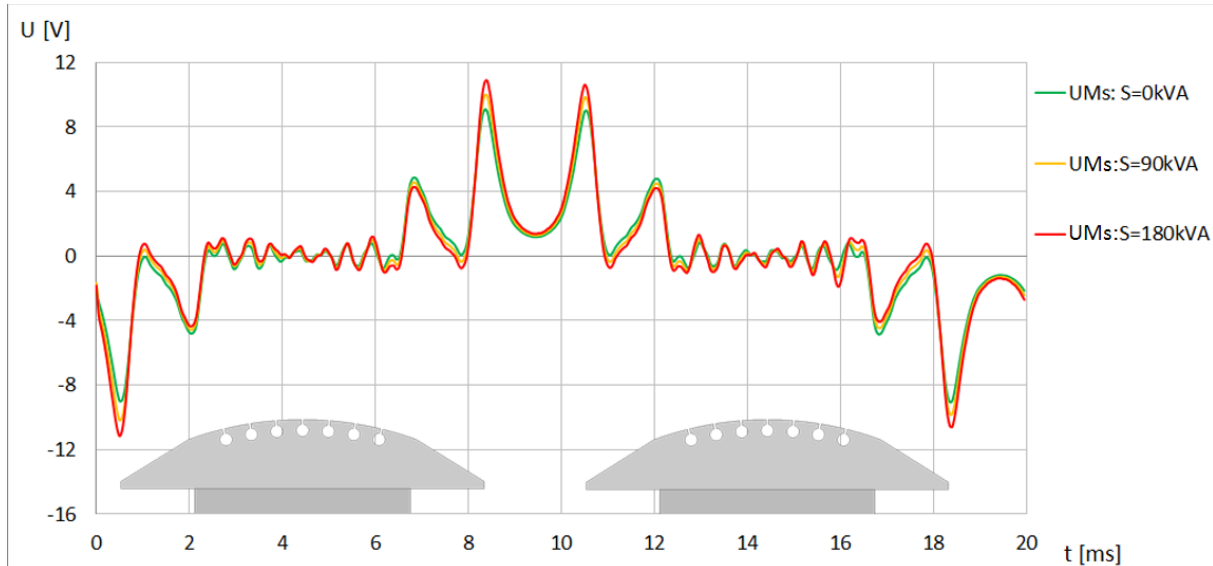
Slika 5.30 Utjecaj povećanja snage na valni oblik radijalne sile koja djeluje na zub za slučaj izrazito induktivnog faktora snage  $\cos\varphi=0,08$



Slika 5.31 Utjecaj povećanja snage na frekvencijski spektar radijalne sile na zub za slučaj izrazito induktivnog faktora snage  $\cos\varphi=0,08$



Naponi inducirani u mjernim svitcima, za analizirana tri pogonska stanja s faktorom snage bliskim nuli, vrlo su slični. Razlikuju se samo u amplitudama vršnih vrijednosti, koje odgovaraju pojavi krajnjeg ruba i ruba trapeznog dijela polne papuče ispod zuba. Što je opterećenje veće, to su veći i iznosi vršnih vrijednosti napona.



Slika 5.32 Utjecaj promjene prividne snage  $S$  na napon mjernog svitka

Tablicom 5.6 usporedno su prikazani iznosi efektivnih i vršnih vrijednosti induciranih napona za analizirana simetrična pogonska stanja generatora

Tablica 5.5 Efektivne i vršne vrijednosti napona mjernih svitaka međusobno razmaknutih za  $\frac{1}{2}\tau_p$  pri različitim simetričnim opterećenjima

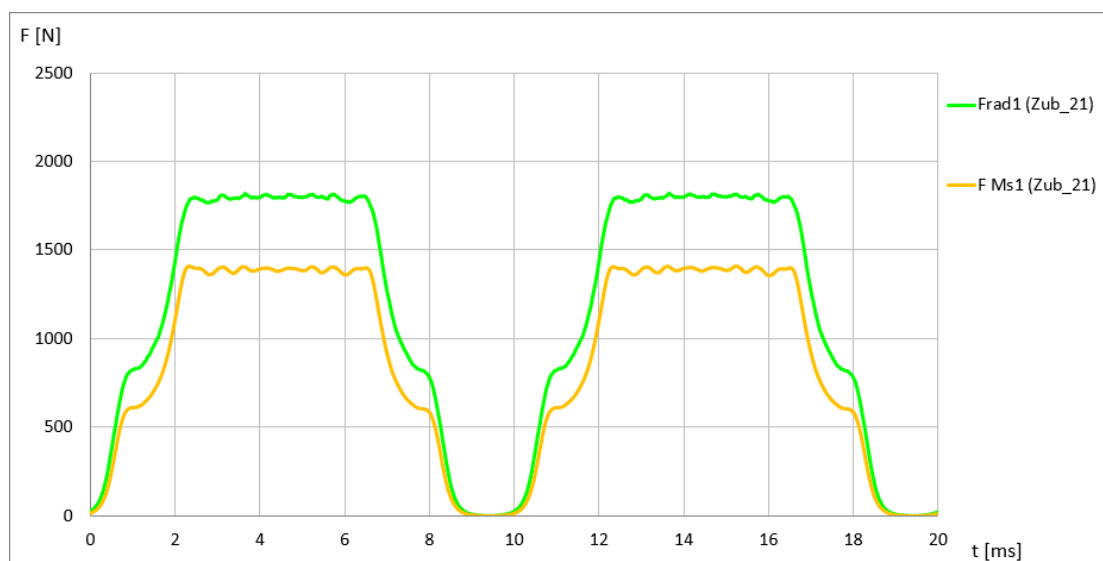
| Red.br. | Pogonsko stanje |              |                      | Vršna vrijednost      |                       |                          | Efektivna vrijednost |                     |                        |
|---------|-----------------|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
|         | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $U_{Ms1 maks}$<br>[V] | $U_{Ms5 maks}$<br>[V] | $\Delta U_{maks}$<br>[%] | $U_{Ms1 ef}$<br>[V]  | $U_{Ms5 ef}$<br>[V] | $\Delta U_{ef}$<br>[%] |
| 1.      | 200             | 0            | -                    | 3,82                  | 3,83                  | 0,26                     | 1,53                 | 1,53                | 0,01                   |
| 2.      | 400             | 0            | -                    | 9,05                  | 9,11                  | 0,66                     | 3,01                 | 3,02                | 0,33                   |
| 3.      | 400             | 90           | 0,08                 | 9,99                  | 10,09                 | 0,99                     | 3,18                 | 3,20                | 0,63                   |
| 4.      | 400             | 90           | 0,70                 | 10,49                 | 10,63                 | 1,32                     | 3,15                 | 3,18                | 0,94                   |
| 5.      | 400             | 90           | 1,00                 | 10,48                 | 10,72                 | 2,24                     | 3,03                 | 3,07                | 1,30                   |
| 6.      | 400             | 180          | 0,08                 | 10,91                 | 10,93                 | 0,18                     | 3,37                 | 3,40                | 0,88                   |
| 7.      | 400             | 180          | 0,70                 | 11,57                 | 11,68                 | 0,94                     | 3,30                 | 3,33                | 0,90                   |
| 8.      | 400             | 180          | 1,00                 | 11,54                 | 11,87                 | 2,78                     | 3,09                 | 3,14                | 1,59                   |

### 5.2.3. Odnos između magnetske sile i napona mjernog svitka

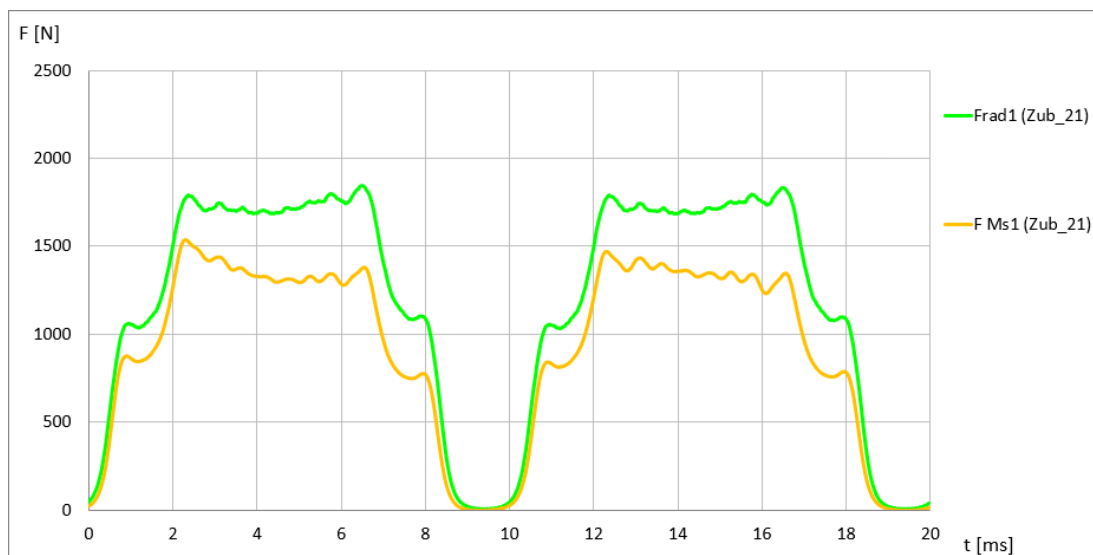
Provedenim analizama ustanovljeno je da valni oblici radijalne sile na zub i induciranih napona u mjernom svitku ovise o pogonskom stanju generatora. Također je zamijećeno da su ove razlike lakše uočljive u valnim oblicima sile nego u valnim oblicima napona mjernih svitaka. Za promatrane zube određeni su iznosi sile  $F_{Ms}$  temeljem analize napona mjernih svitaka modela  $U_{Ms}$ , dok je radijalna sila  $F_{rad}$  određena za svaki zub. Radi mogućnosti proširenja analiza podataka prikupljenih mjerenjem, navedene vrijednosti sile određene su za svako analizirano pogonsko stanje. Određivanje sile provedeno je na način opisan u poglavlju 4.1. Pri tome su za izračun korištene geometrijske veličine prikazane tablicom 5.6. Slikama u nastavku usporedno su prikazani valni oblici ukupne radijalne sile dobivene MKE proračunom i sile određene temeljem napona mjernog svitka za nekoliko pogonskih stanja generatora.

Tablica 5.6 Geometrijske veličine korištene pri određivanju odnosa  $U_{Ms} - F_{rad}$

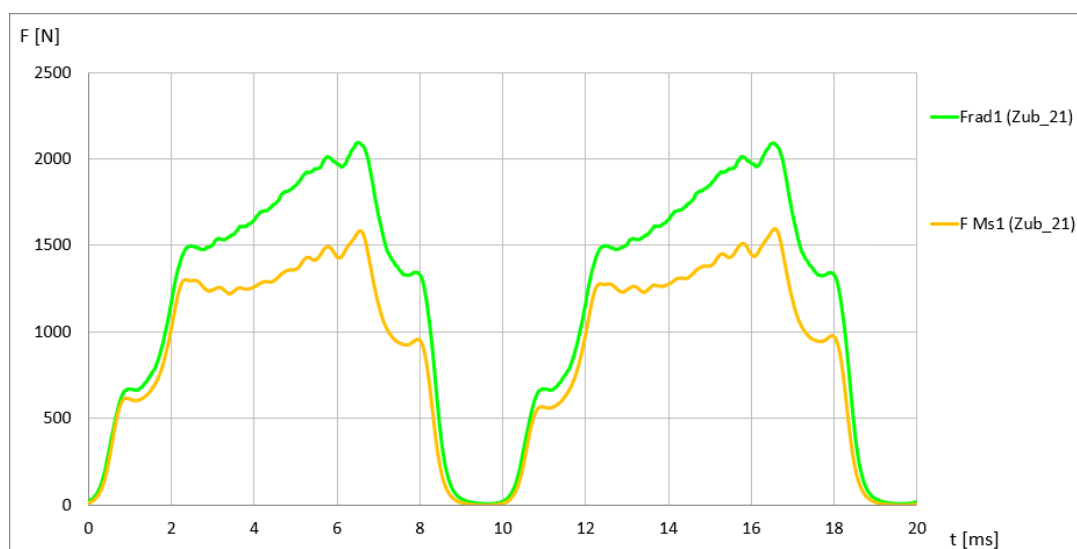
| Veličina                              | Oznaka    | Iznos                    |
|---------------------------------------|-----------|--------------------------|
| Broj zavoja mjernog svitka            | $N_{sv}$  | 5                        |
| Srednja širina zavoja mjernog svitka  | $b_{sv}$  | 11,5 mm                  |
| Srednja duljina zavoja mjernog svitka | $L_{sv}$  | 198 mm                   |
| Širina zuba na promjeru provrta       | $b_z$     | 13,85 mm                 |
| Idealna duljina zuba                  | $L_i$     | 402 mm                   |
| Površina omeđena mjernim svitkom      | $S_{sv}$  | 0,002277 m <sup>2</sup>  |
| Površina radijalne plohe zuba         | $S_{Zub}$ | 0,0055677 m <sup>2</sup> |



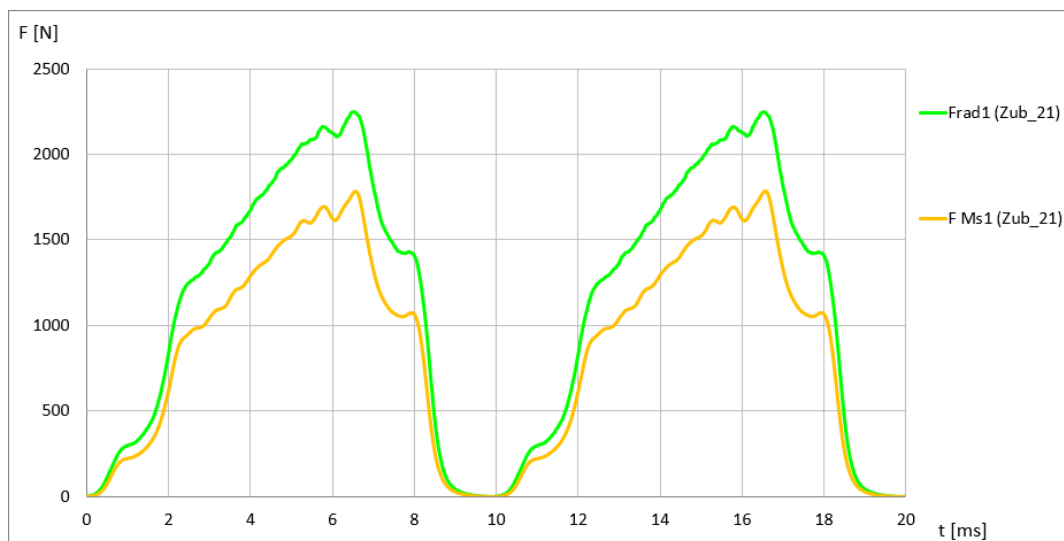
Slika 5.33 Izračun sile preko napona mjernog svitka za prazni hod pri  $U = 400$  V



Slika 5.34 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=0,08$



Slika 5.35 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=0,7$



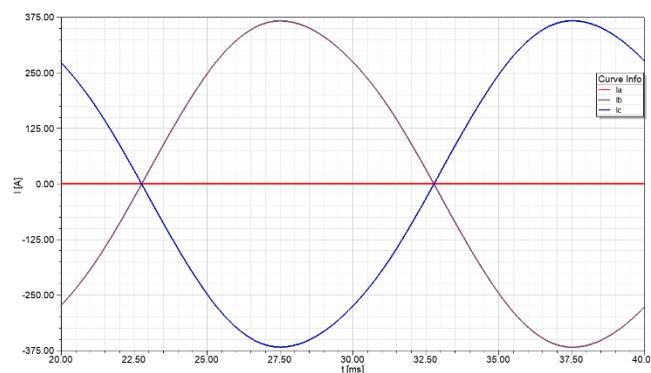
Slika 5.36 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$

Provedenim proračunima za simetrična pogonska stanja utvrđeno je da:

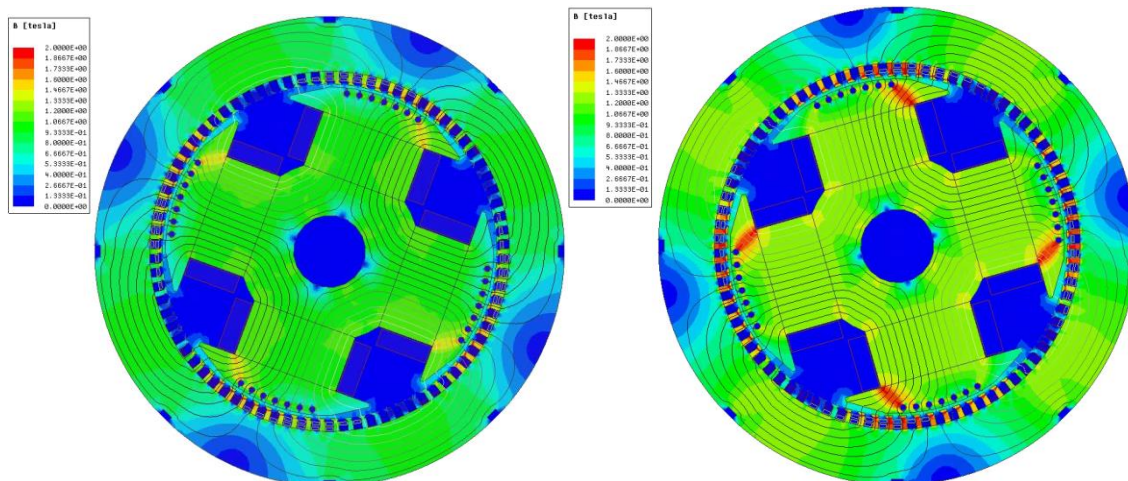
- pri simetričnom električnom opterećenju na zube statora generatora djeluju podjednake sile;
- maksimalna vrijednost sile koja djeluje na zub raste s povećanjem snage  $S$  ;
- maksimalna vrijednost sile na zub raste s povećanjem faktora snage  $\cos \varphi$  ;
- analizom napona mjernih svitaka moguće je utvrditi valni oblik sile koji korelira s valnim oblikom ukupne radijalne sile zuba određene metodom virtualnog rada;
- temeljem napona induciranog u mjernom svitku, koji je uži od utorskog koraka statora (poglavlje 4.1), dobiva se sila na zub manjeg iznosa od ukupne radijalne sile dobivene metodom virtualnog rada;
- međusobno odstupanje valnog oblika ukupne radijalne sile na zub i radijalne sile određene putem mjernog svitka užeg od utorskog koraka statora ovisi o faktoru snage, tako da raste s njegovim smanjenjem.

### 5.3. Analiza utjecaja električki nesimetričnog opterećenja na magnetske sile i inducirane napone u mjernim svitcima određene numeričkim proračunima

U ovom dijelu prikazani su rezultati simulacijskih proračuna dobiveni za situaciju nesimetričnog električnog opterećenja sinkronog generatora. Analiziran je utjecaj rada generatora s jednofaznim teretom (prikazanog slikom 5.4) na radialne sile zubi i napone inducirane u mjernim svitcima. Ukoliko je armaturni namot stroja spojen u zvijezdu, pri ovakvom opterećenju kroz dvije faze armaturnog namota teče struja jednake amplitude no suprotnog predznaka, dok je struja treće faze jednaka nuli. U slučaju ovakvog rada javljaju se oscilacije magnetskog polja rotora s periodom dvostruko veće frekvencije od napona mreže.



Slika 5.37 Struje faznih namota pri radu na jednofazni teret



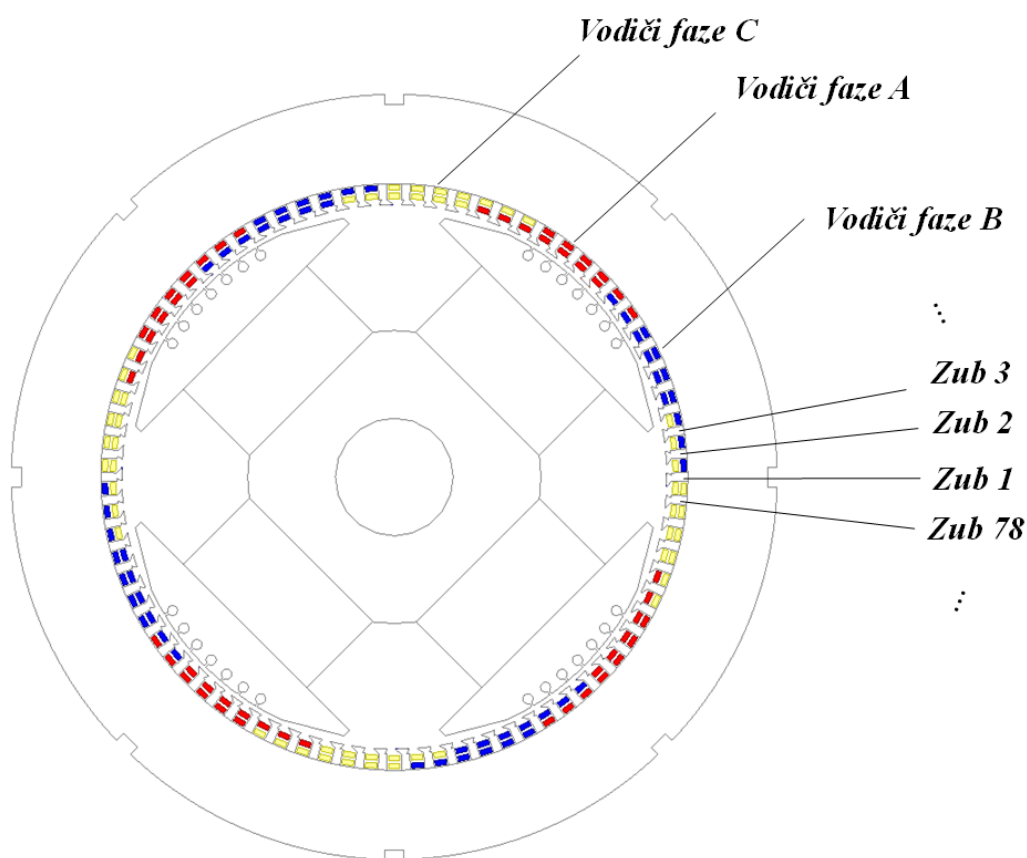
Slika 5.38 Oscilacije magnetskog polja rotora prisutne pri nesimetričnom opterećenju

Kao što je prethodno navedeno u tablici 5.4, na MKE modelu stroja provedena je analiza nesimetričnog opterećenja za sljedeća pogonska stanja:

- tri iznosa prividne snage:  $S = 52 \text{ kVA}$ ,  $90 \text{ kVA}$  i  $104 \text{ kVA}$ ;
- tri faktora snage:  $\cos\varphi = 0,08$ ;  $0,7$  i  $1$ ;
- nesimetrični rad za tri kombinacije aktivnih (strujom protjecanih) faza:  $A-B$ ,  $A-C$  i  $B-C$ .

### 5.3.1. Utjecaj povećanja snage na sile zubi pri nesimetričnom opterećenju

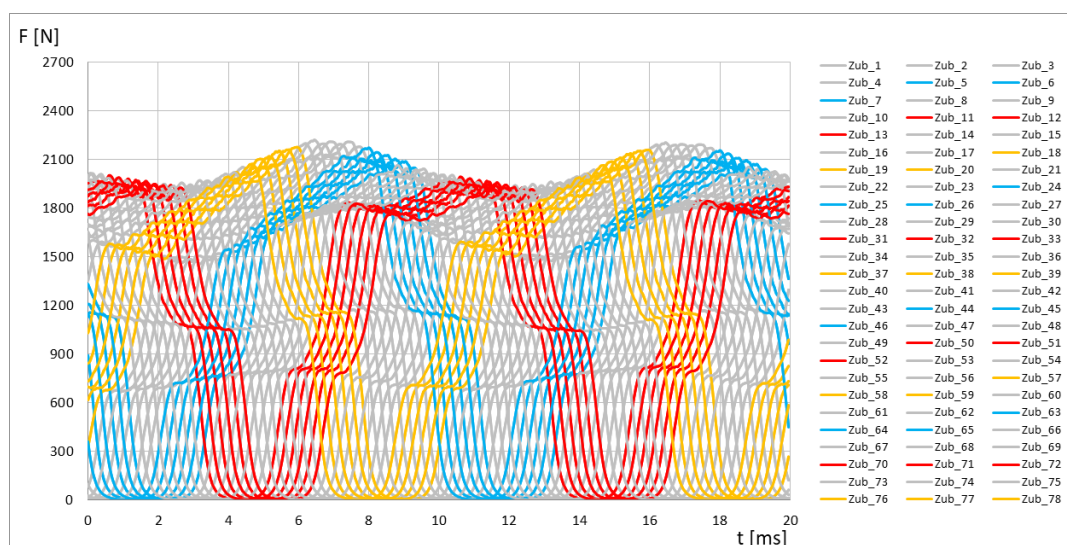
Pulsacije magnetskog polja prisutne u slučaju nesimetričnog opterećenja uzrokuju nejednakost sile po zubima statora. Referentne oznake zubi i faza prikazane su slikom 5.39. Utjecaj nesimetrije faznih struja na radijalne sile svih zubi prikazan je za tri električki nesimetrična opterećenja ( $S = 52 \text{ kVA}$ ,  $90 \text{ kVA}$  i  $104 \text{ kVA}$ , uz faktor snage  $\cos \varphi = 0,7$  i nazivnu vrijednost linijskog napona  $U = 400 \text{ V}$ ) slikama 5.40 do 5.42. U prikazanom slučaju teret je spojen na faze  $A$ - $B$ , dok kroz fazu  $C$  namota ne teče struja. Na dotičnim grafovima, sile na zube okružene vodičima faze  $A$  istaknute su crvenom bojom, sile na zube okružene vodičima faze  $B$  plavom bojom a sile na zube okružene vodičima faze  $C$  žutom bojom.



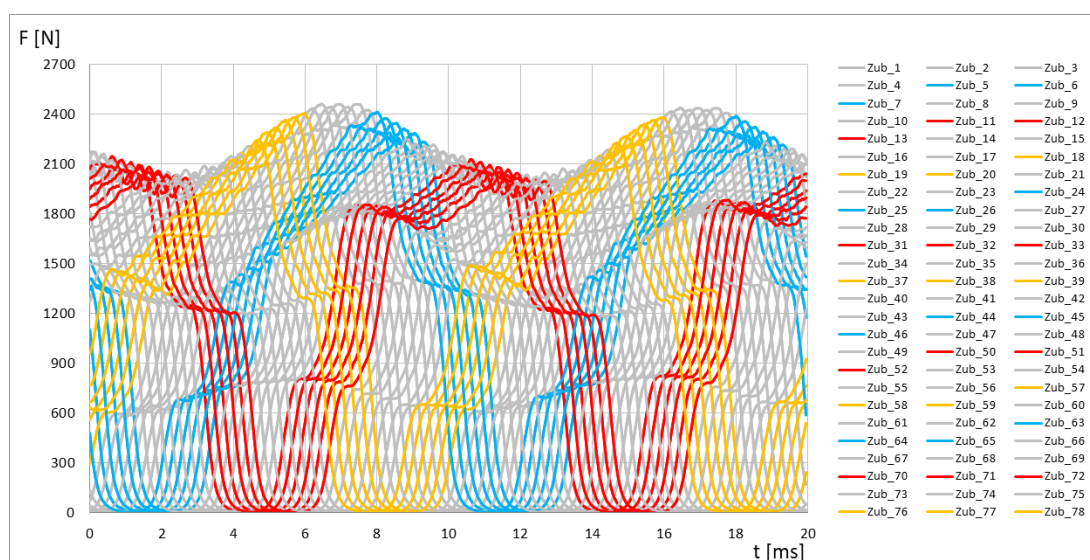
Slika 5.39 Referentne oznake zubi i faznih namota

Moguće je uočiti kako se u prikazanom slučaju sile najveće vršne vrijednosti javljaju na zubima koji se nalaze između faza  $B$  i  $C$ , a sile najmanje amplitude između faza  $A$  i  $C$ . Lokacija maksimalne i minimalne vrijednosti sile prostorno je razmaknuta za polovicu polnog koraka ( $\frac{1}{2} \tau_p$ ), odnosno za 90 električnih stupnjeva. U slučaju rada pri frekvenciji osnovnog harmonika napona od  $50 \text{ Hz}$  (perioda  $20 \text{ milisekundi}$ ) to odgovara vremenskom razmaku od  $5 \text{ milisekundi}$ .

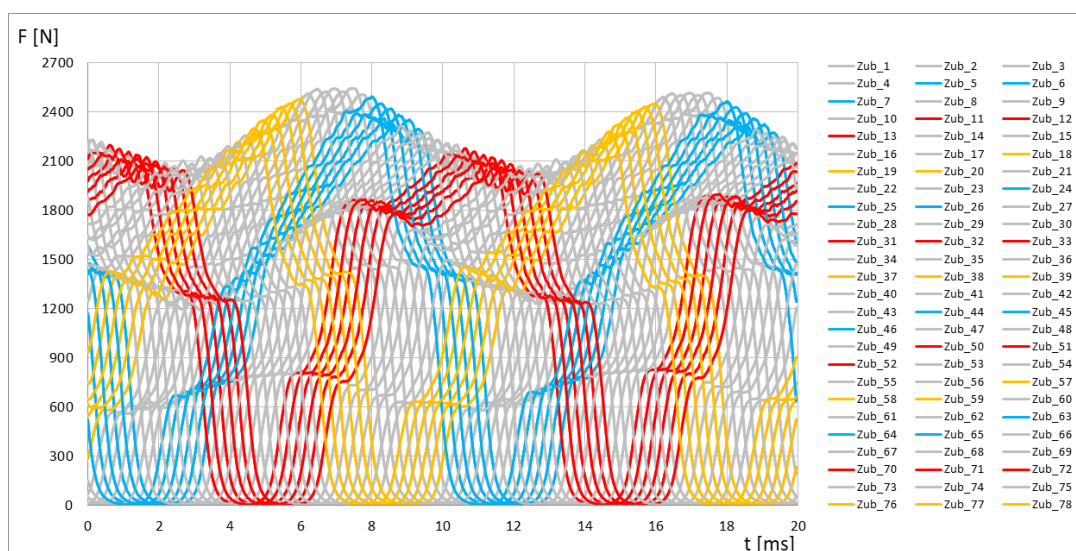




Slika 5.40 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S = 52 \text{ kVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,7$

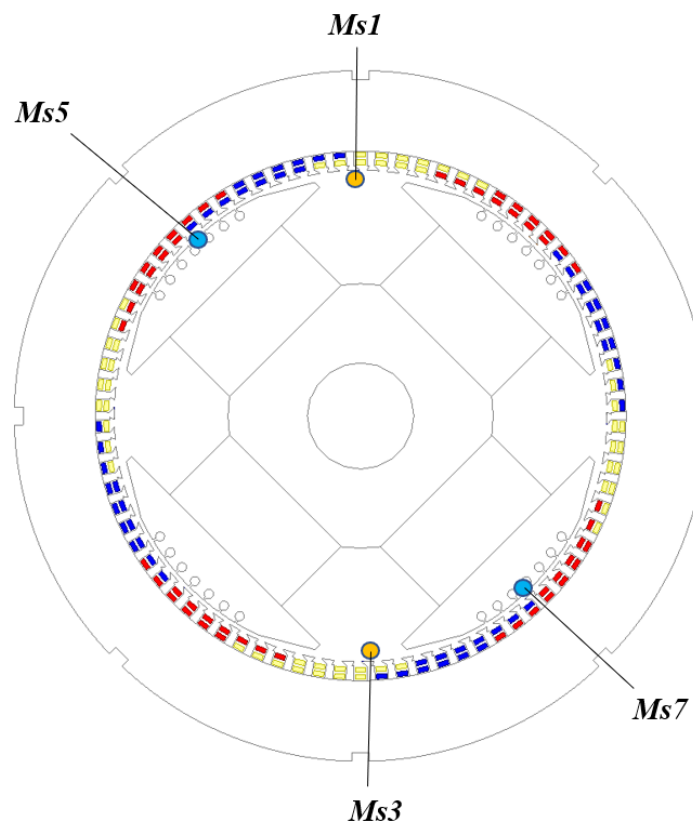


Slika 5.41 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S = 90 \text{ kVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,7$

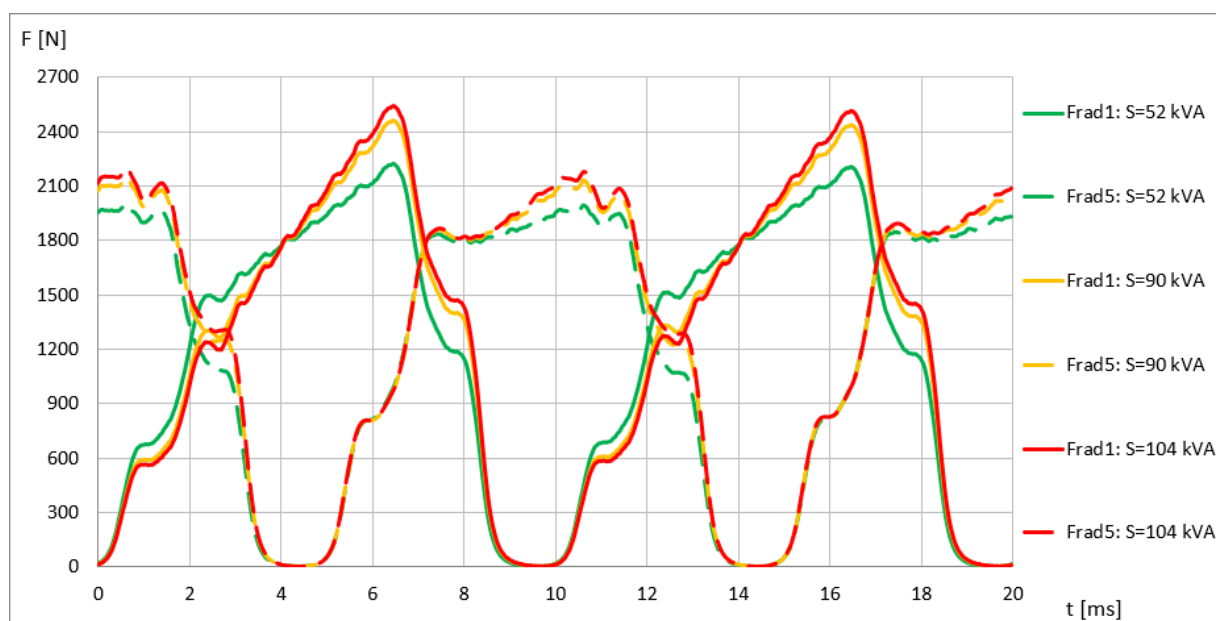


Slika 5.42 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S = 104 \text{ kVA}$ ,  $\cos \varphi = 0,7$

Slikom 5.43 prikazani su zubi ispod kojih su smješteni mjerni svitci, a koji se nalaze između zona faznih namota. Slikom 5.44 usporedno su prikazane radijalne sile na navedene zube, za tri analizirana slučaja opterećenja.



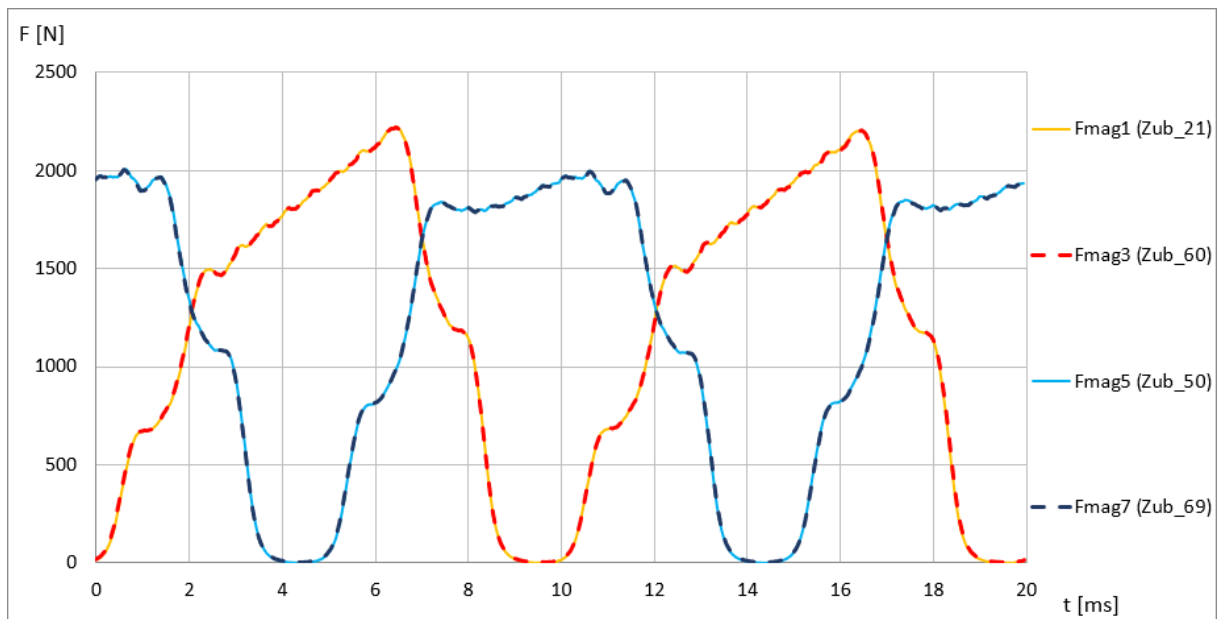
Slika 5.43 Referentne oznake mjernih svitaka ispod zubi za analizu sila



Slika 5.44 Radijalne sile po zubima na kojima se nalaze mjerni svitci *Ms1* i *Ms5* pri nesimetričnom opterećenju za različite iznose prividne snage uz  $\cos \varphi = 0,7$



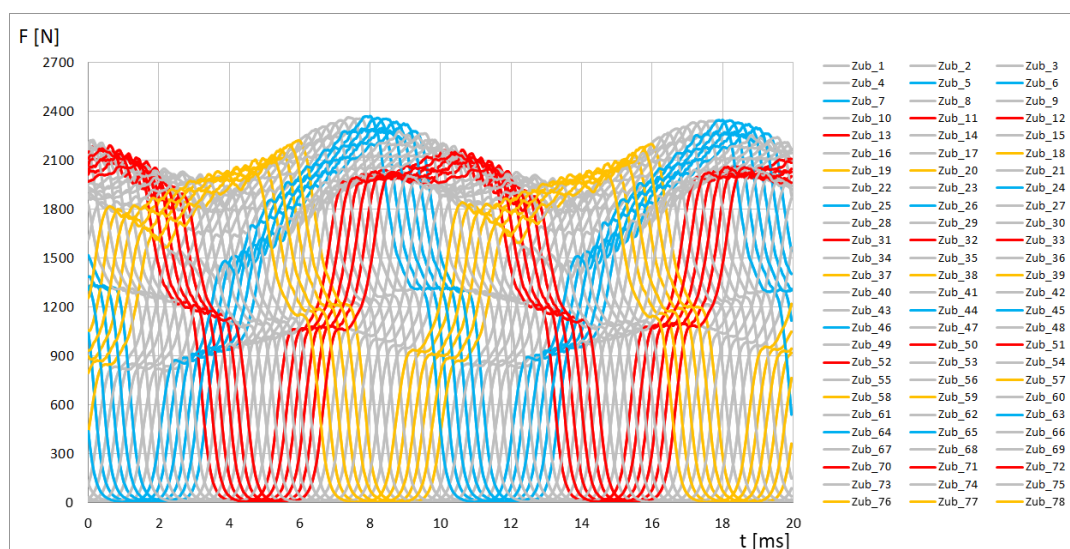
Slika 5.44 ukazuje kako s povećanjem snage rastu sile na zube, te se povećavaju razlike između maksimalne i minimalne vršne vrijednosti sile promatranih zubi. Zanimljivo je primijetiti kako sile dijametralno razmaknutih zubi imaju jednak valni oblik (slika 5.45).



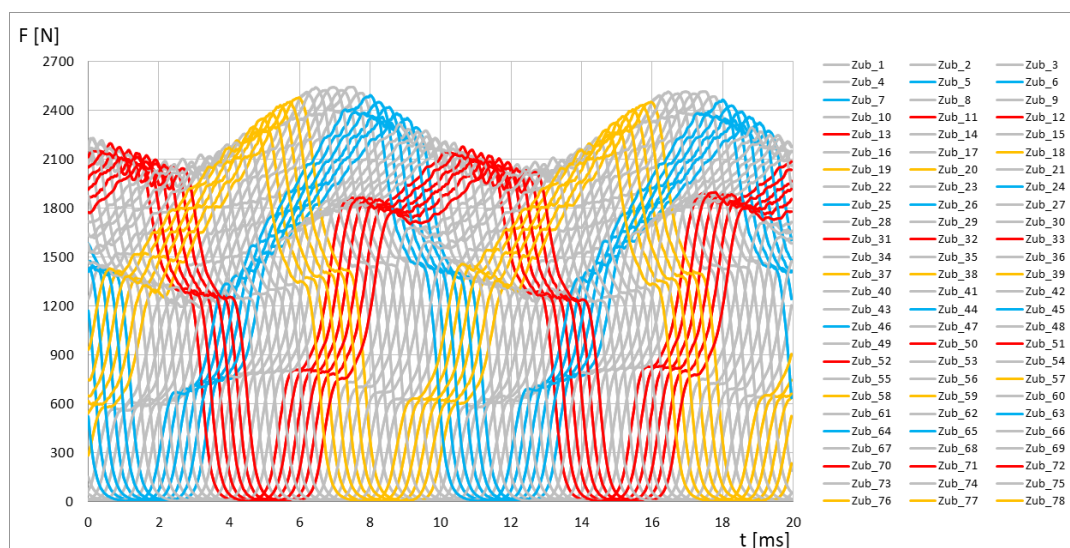
Slika 5.45 Poklapanje valnih oblika radijalnih sila dijametralno razmaknutih parova mjernih svitaka *Ms1-Ms3* i *Ms5-Ms7* u slučaju nesimetričnog opterećenja po fazama

### 5.3.2. Utjecaj promjene faktora snage na iznos sile

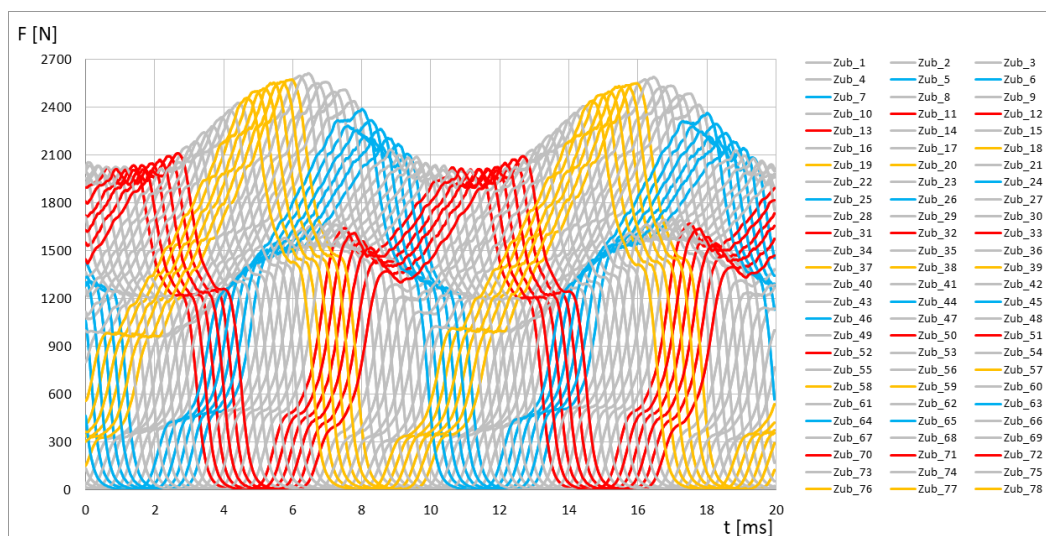
Utjecaj promjene faktora snage na valne oblike radijalne sile svih zubi prikazan je slikama 5.46 do 5.48 za slučaj iznosa prividne snage  $S=104$  kVA, nazivnog napona  $U=400$  V i nesimetričnog opterećenja kod kojeg kroz namot faze *C* ne teče struja. Prikazani slučajevi odgovaraju iznosima faktora snage od  $\cos\varphi=0,08$ ;  $\cos\varphi=0,7$  i  $\cos\varphi=1$ , dok su slikom 5.49 usporedno prikazani valni oblici sile za zube ispod kojih se nalaze mjerni svitci.



Slika 5.46 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=0,08$

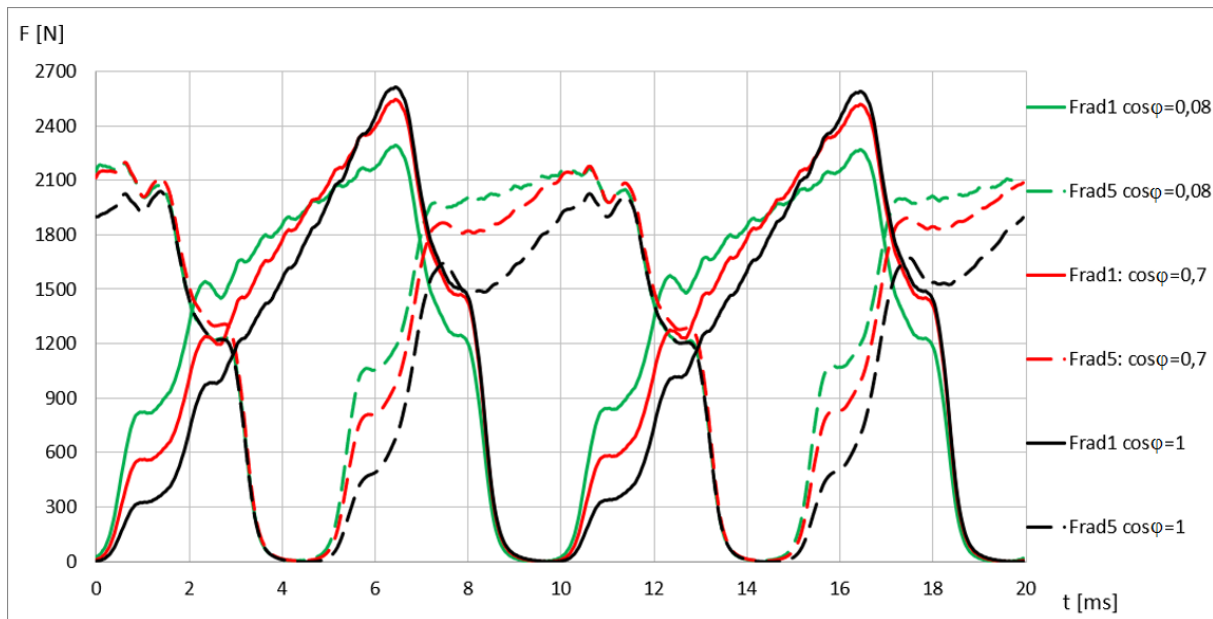


Slika 5.47 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=0,7$



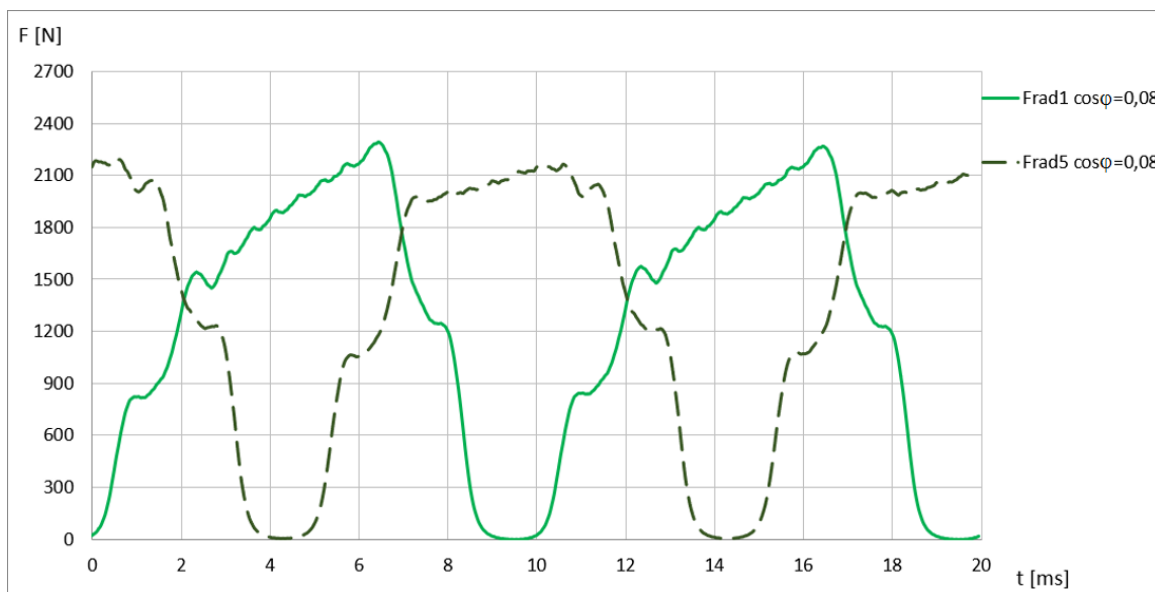
Slika 5.48 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$

Usporedbom valnih oblika za sve tri situacije vidi se kako s porastom faktora snage dolazi do povećanja maksimalne vršne vrijednosti i razlike između maksimalne i minimalne vršne vrijednosti sila po zubima. Također je moguće uočiti kako se s promjenom faktora snage mijenjaju zubi na koje djeluje maksimalna sila. U slučaju induktivnog faktora snage ( $\cos\varphi=0,08$ ) maksimalne vršne vrijednosti postižu se kod zubi koji se nalaze bliže zoni vodiča faze B, dok su kod radnog opterećenja ( $\cos\varphi=1$ ) to zubi bliži zoni faze C.

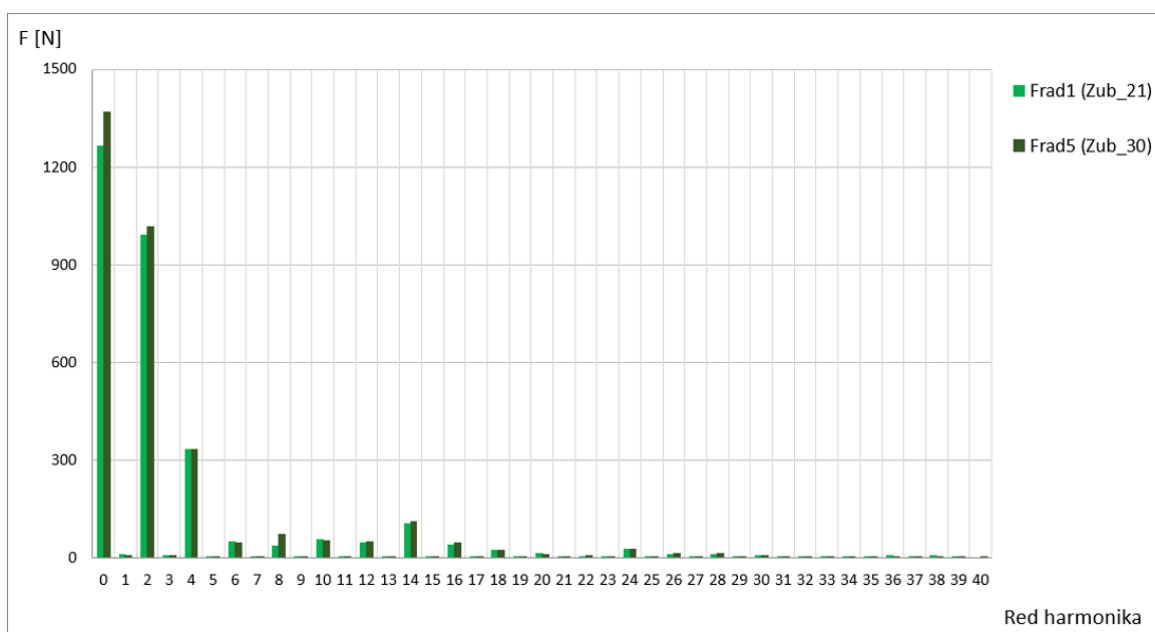


Slika 5.49 Radijalne sile po zubima na kojima se nalaze mjerni svitci  $Ms1$  i  $Ms5$  pri nesimetričnom opterećenju faza A-B za različite faktore snage pri  $S=104$  kVA

Prikaz sila za dva karakteristična zuba s ugrađenim mjernim svitcima potvrđuje pravilnosti uočene na cjelokupnoj raspodjeli sila po zubima. Najveće razlike sila na dva promatrana zuba uočljive su pri jediničnom faktoru snage (čisto radnom opterećenju). Kod izrazito induktivnog opterećenja ( $\cos\varphi=0,08$ ) sile na promatrana dva zuba imaju vrlo blisku vršnu vrijednost, no značajno različit valni oblik (slika 5.50). Iz ovog razloga vrijedi razmotriti razliku u frekvencijskom spektru sila između ova dva valna oblika (5.51).



Slika 5.50 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  pri nesimetričnom opterećenju faza A-B uz  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=0,08$

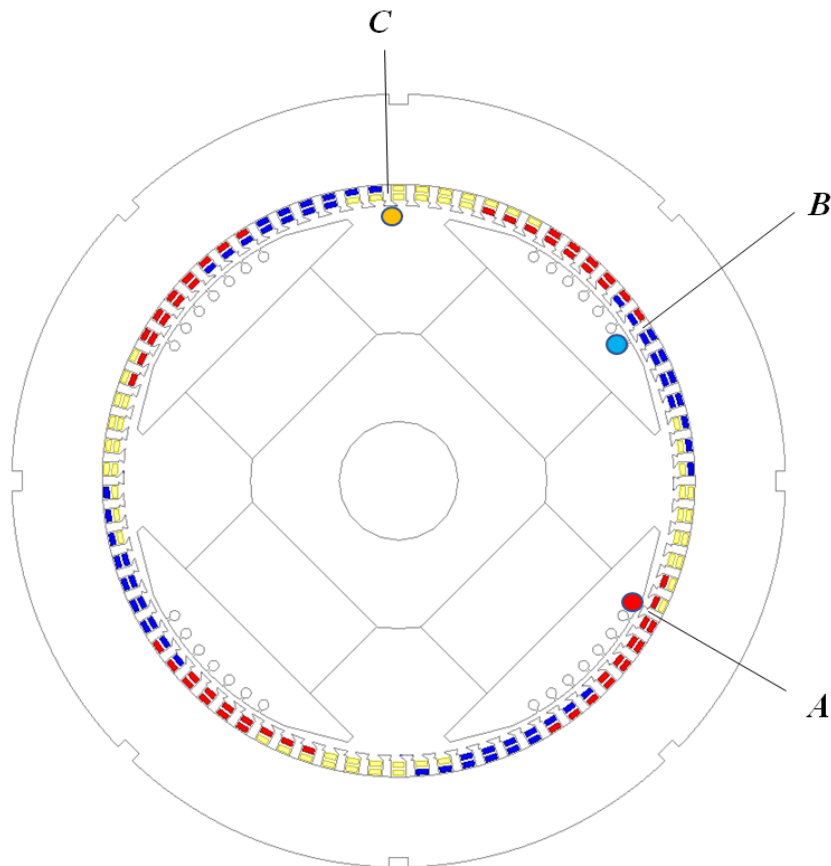


Slika 5.51 Frekvencijski spektar radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  pri nesimetričnom opterećenju faza A-B uz  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=0,08$

Pregledom harmonijskog sastava sila koje djeluju na dva promatrana zuba (slika 5.51), najveće razlike sila pri nesimetričnom električnom opterećenju uočljive su u iznosima srednje vrijednosti (harmonik 0. reda) i harmonika 2. reda, koji su posljedica osnovnog harmonika magnetskog polja. Budući da ovakve razlike između sila dotičnih zubi ne postoje u slučaju simetričnog opterećenja, nesimetrično opterećenje moguće je prepoznati utvrđivanjem razlike između srednje ili efektivne vrijednosti sila koje djeluje na dva promatrana zuba.

### 5.3.3. Utjecaj promjene aktivnih faza na raspored sile po zubima

Analizirani tip nesimetričnog opterećenja moguće je ostvariti uz tri kombinacije aktivnih faza:  $A-B$ ,  $A-C$  ili  $B-C$ . U svrhu analize Ovih nesimetričnih opterećenja, radi prostorne simetrije poželjno je usporedno prikazati valni oblik sile za tri zuba, koji su međusobno razmaknuti za po 120 električnih stupnjeva. Kod četveropolnog stroja ovaj električni kut odgovara geometrijskom kutu od  $60^\circ$ , što odgovara razmaku od 13 zubi (slika 5.52).



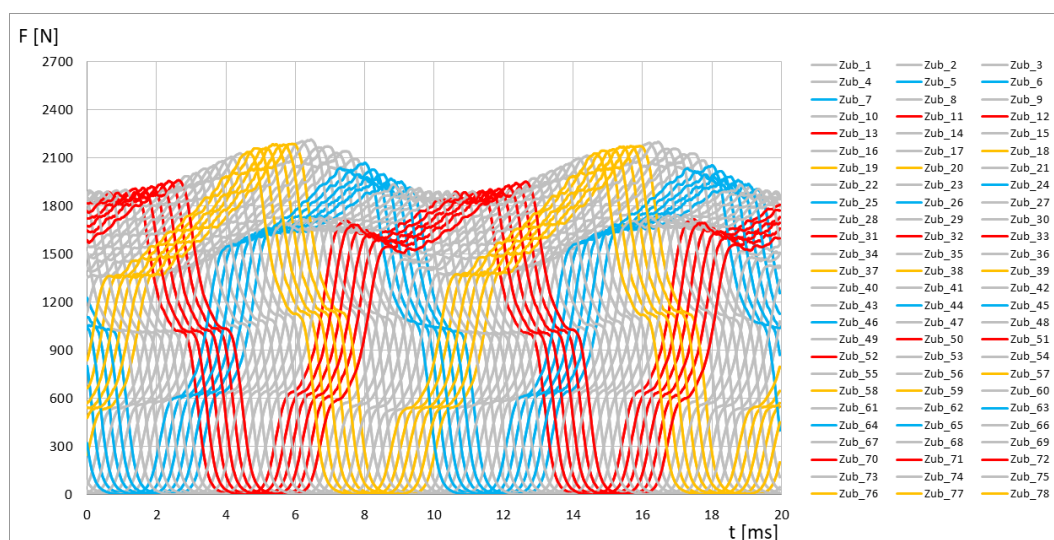
Slika 5.52 Prostorna raspodjela tri zuba odabrana za analizu sile

Utjecaj promjene faza kroz koje teče struja na valne oblike radijalne sile svih zubi prikazan je slikama 5.53 do 5.55 za slučaj iznosa prividne snage  $S=52$  kVA, uz nazivni napon  $U=400$  V i faktor snage  $\cos\varphi=1$ .

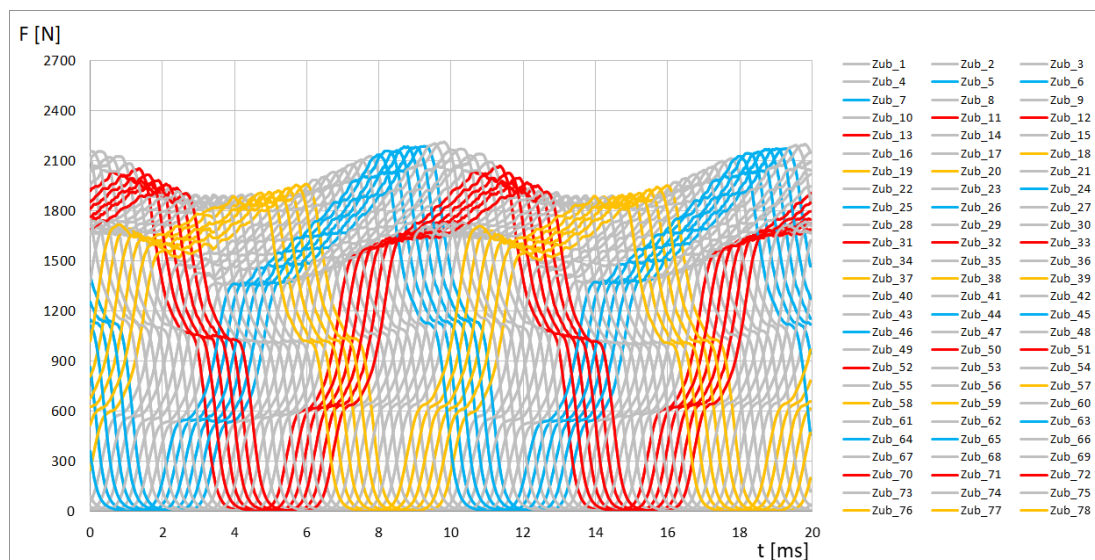
Proučavanjem valnih oblika prikazanih ovim slikama, moguće je uočiti kako se maksimalna vrijednost sile pojavljuje u blizini, tj. neposredno nakon zubi isključene faze:

- Struja protječe fazama  $A-B$ : Maksimum sile djeluje na zub iza zone faze  $C$ ;
- Struja protječe fazama  $A-C$ : Maksimum sile djeluje na zub iza zone faze  $B$ ;
- Struja protječe fazama  $B-C$ : Maksimum sile djeluje na zub iza zone faze  $A$ ;

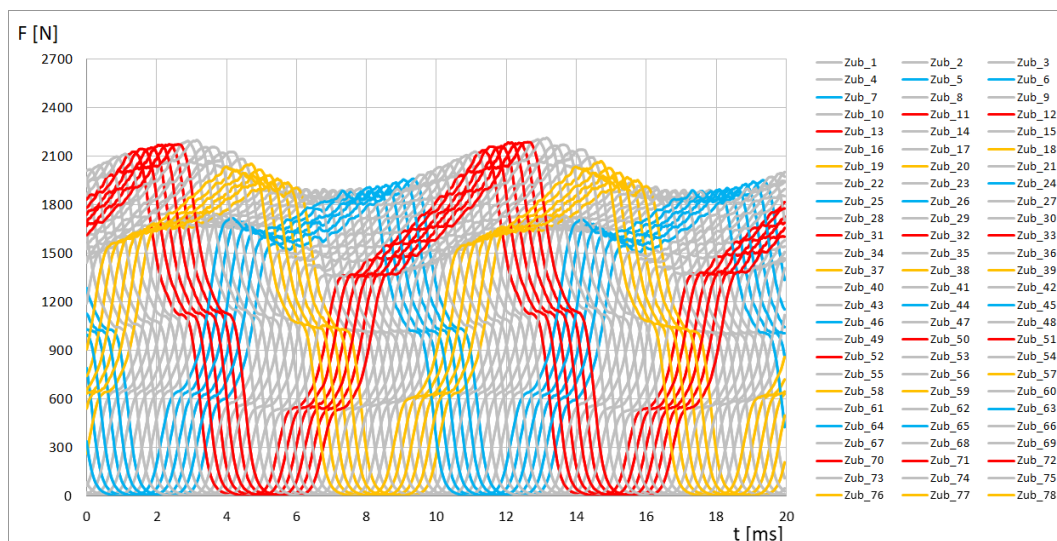




Slika 5.53 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze  $A-B$  protjecane strujom



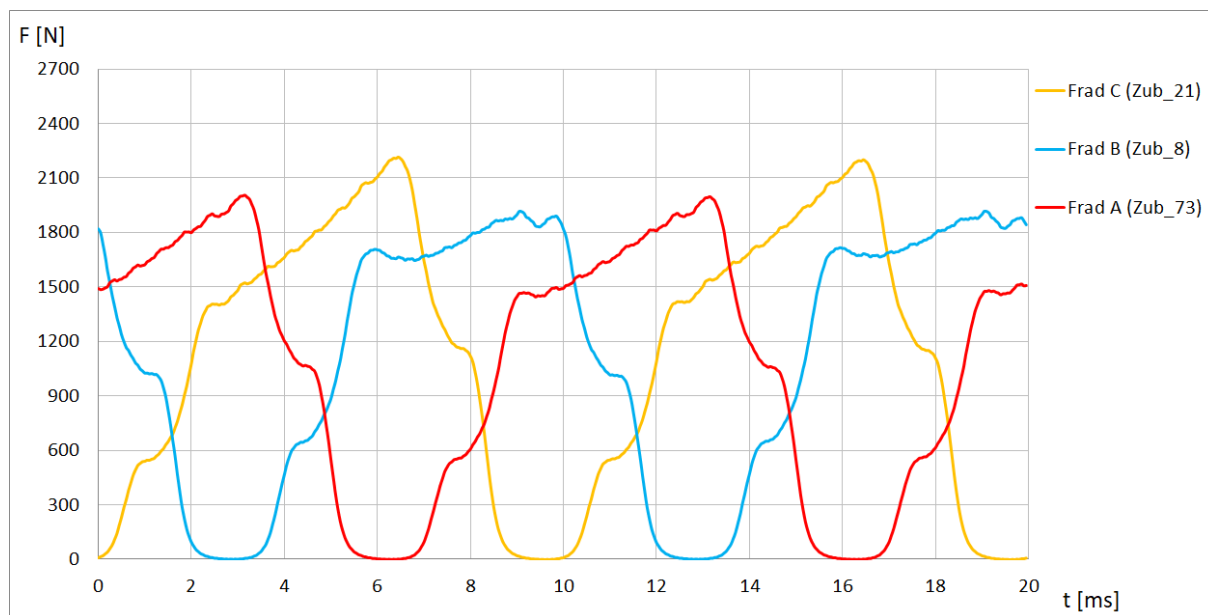
Slika 5.54 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze  $A-C$  protjecane strujom



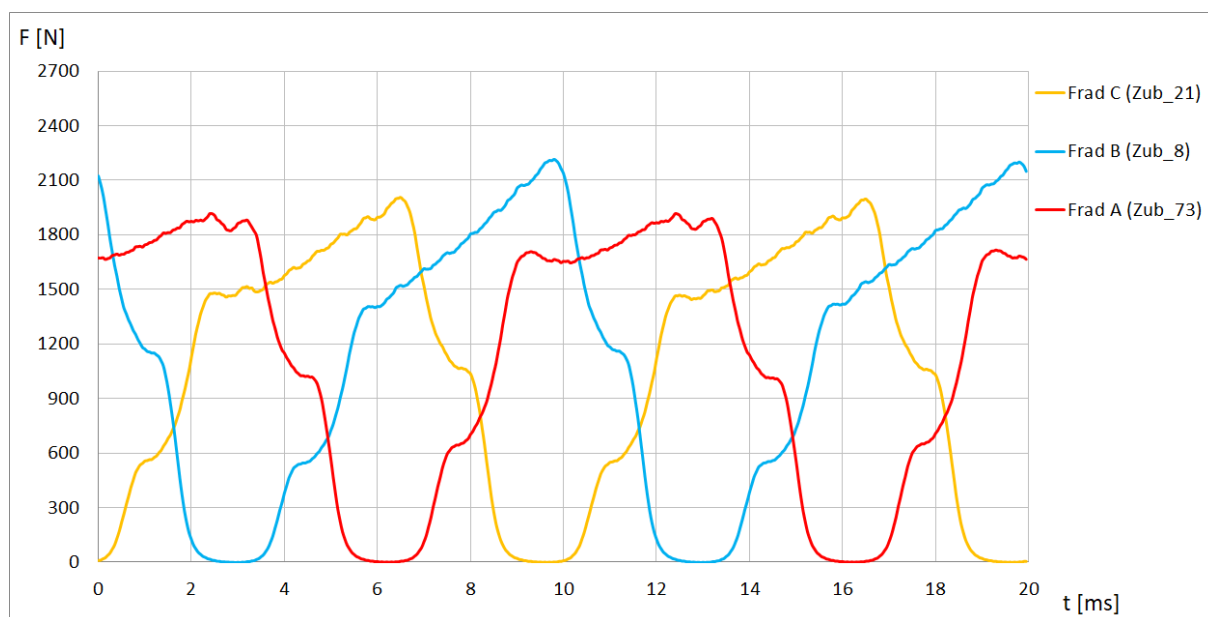
Slika 5.55 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze  $B-C$  protjecane strujom

Globalna slika bitno se ne mijenja s promjenom aktivnih faza. Za isti iznos opterećenja, sila maksimalne i sila minimalne vršne vrijednosti ostati će istog iznosa. No sila na pojedini zub može se značajno razlikovati za tri navedena dvofaznog opterećenja.

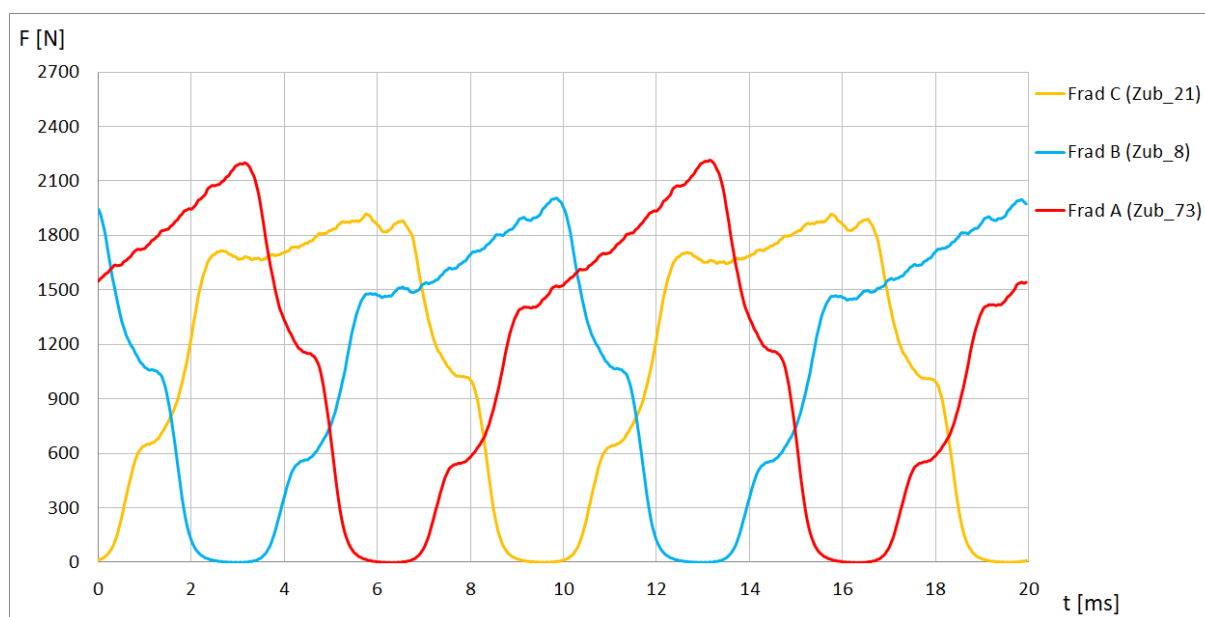
Narednim slikama usporedno su prikazani valni oblici sila koje djeluju na odabrane zube, za tri moguća slučaja dvofaznog rada. Uz valne oblike prikazan je i usporedni frekvencijski spektar razmatranih sila.



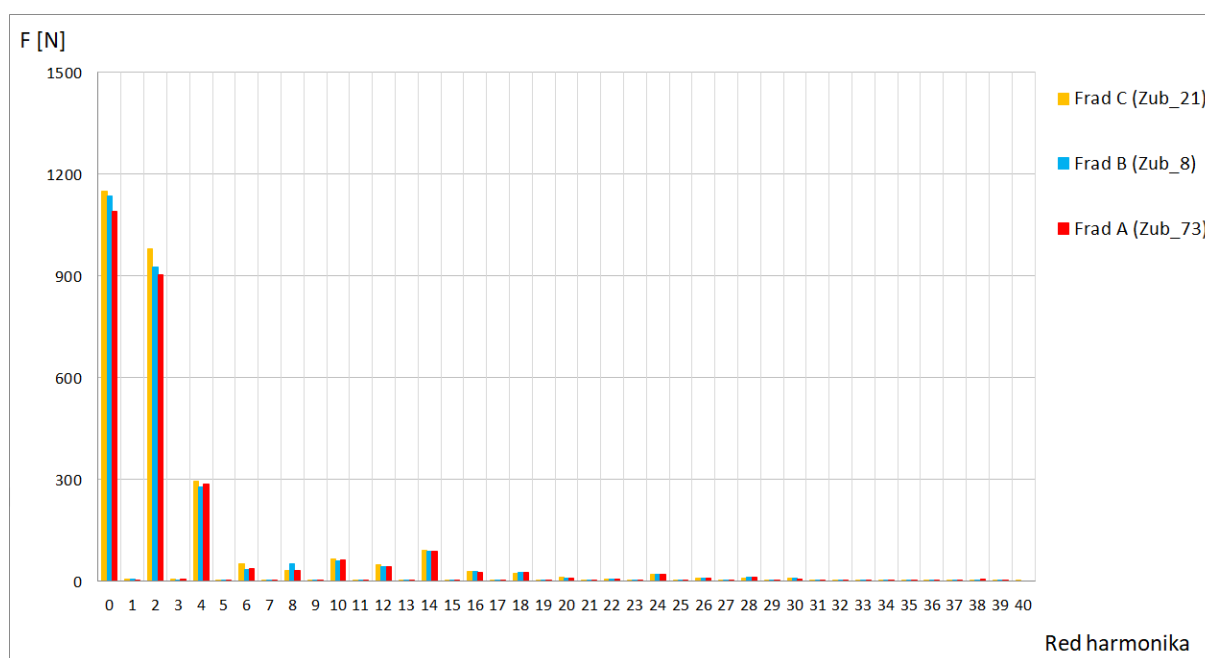
Slika 5.56 Radijalne sile tri zuba uz faze  $A-B$  protjecane strujom



Slika 5.57 Radijalne sile tri zuba uz faze  $A-C$  protjecane strujom



Slika 5.58 Radijalne sile tri zuba uz faze B–C protjecane strujom

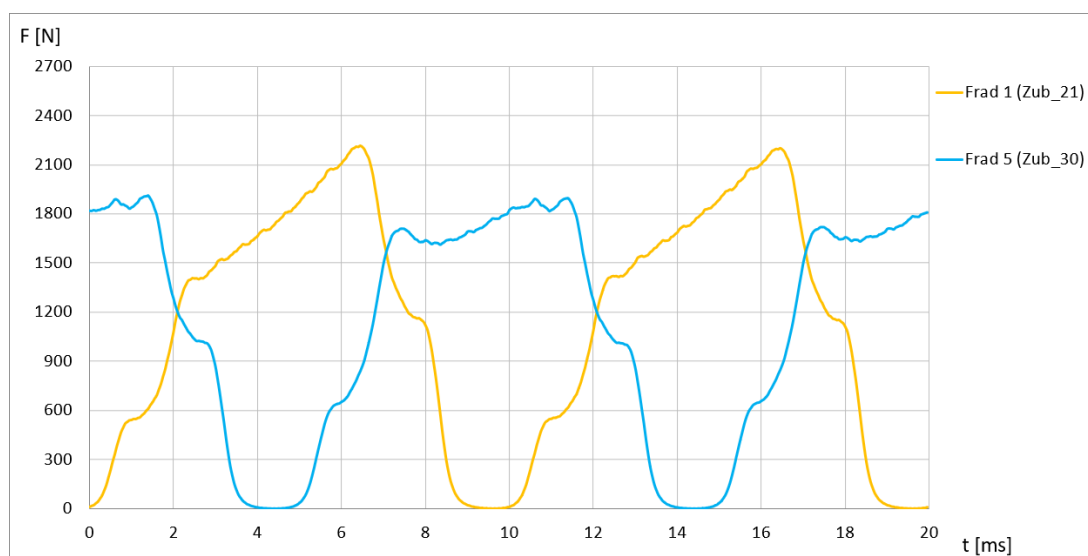


Slika 5.59 Frekvencijski spektar radijalnih sila na tri zuba uz faze A–B protjecane strujom

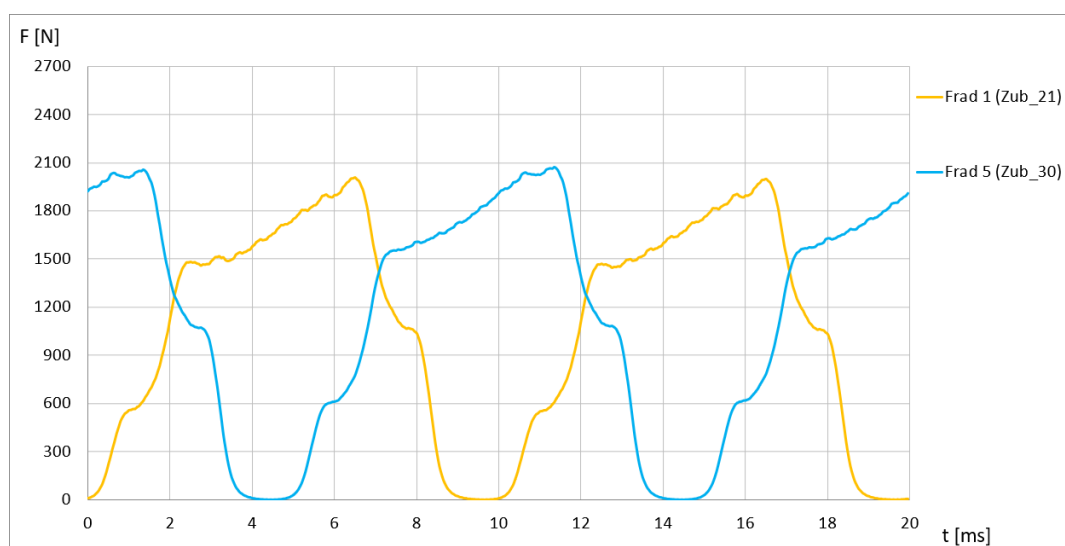
Usporednim prikazom moguće je uočiti kako se u sva tri slučaja napajanja ponavlja sličan međusobni odnos sila odabranih zubi. Vršne vrijednosti sila međusobno se razlikuju, pri čemu se najveća vrijednost bilježi na zubu okruženom namotom isključene faze. Frekvencijski spektar valnih oblika ovih sila razlikuje se uglavnom u iznosu srednje vrijednosti (harmonik 0. reda) i harmoniku 2. reda, uslijed različitih osnovnih harmonika magnetskog polja, pa je razliku moguće utvrditi i usporedbom efektivnih vrijednosti ovih sila.

Za navedena tri slučaja moguće je promotriti i sile na zube ispod kojih se nalaze svitci *Ms1* i *Ms5* (lokacije svitaka prikazane slikom 5.43).

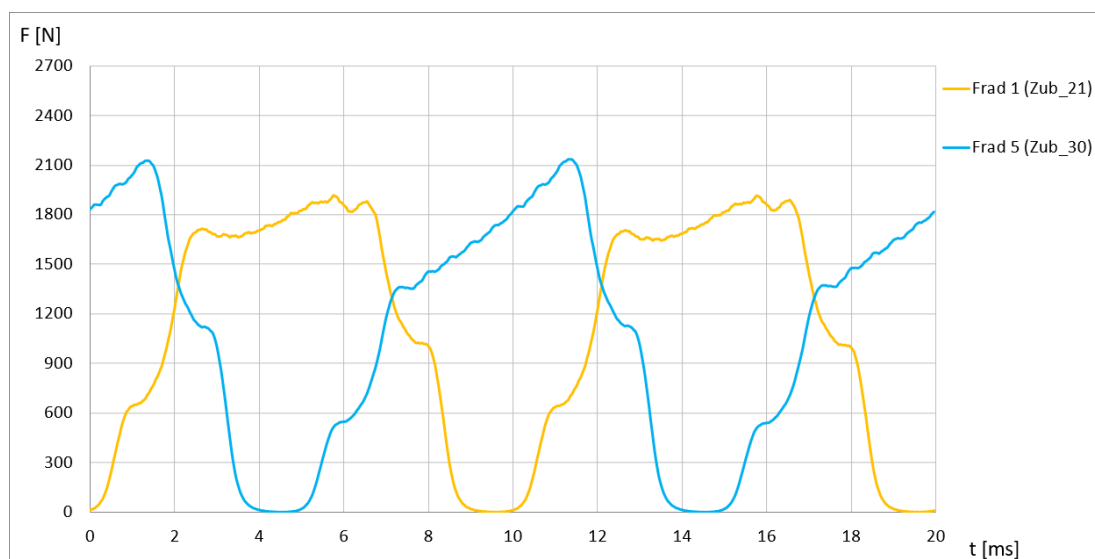




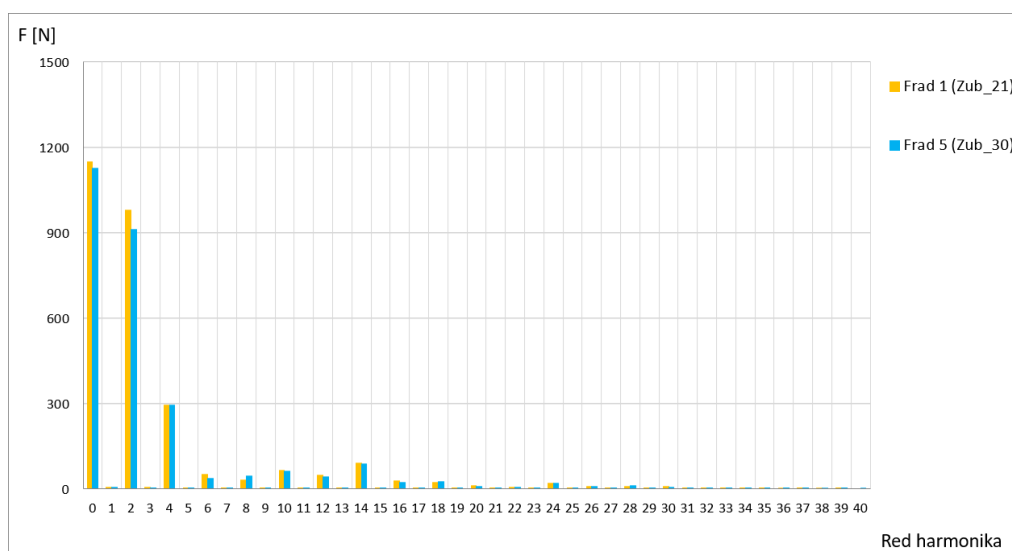
Slika 5.60 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $A-B$  protjecane strujom



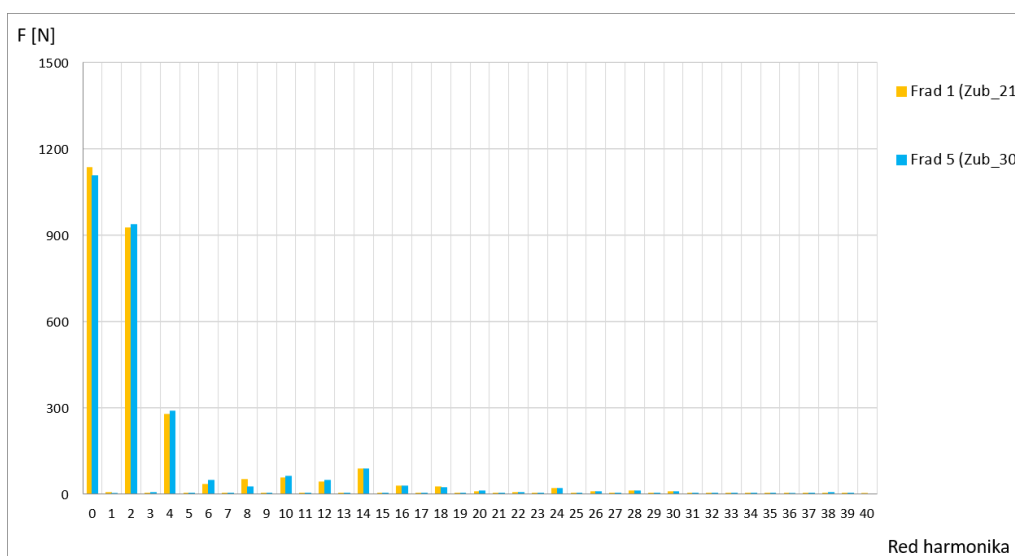
Slika 5.61 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $A-C$  protjecane strujom



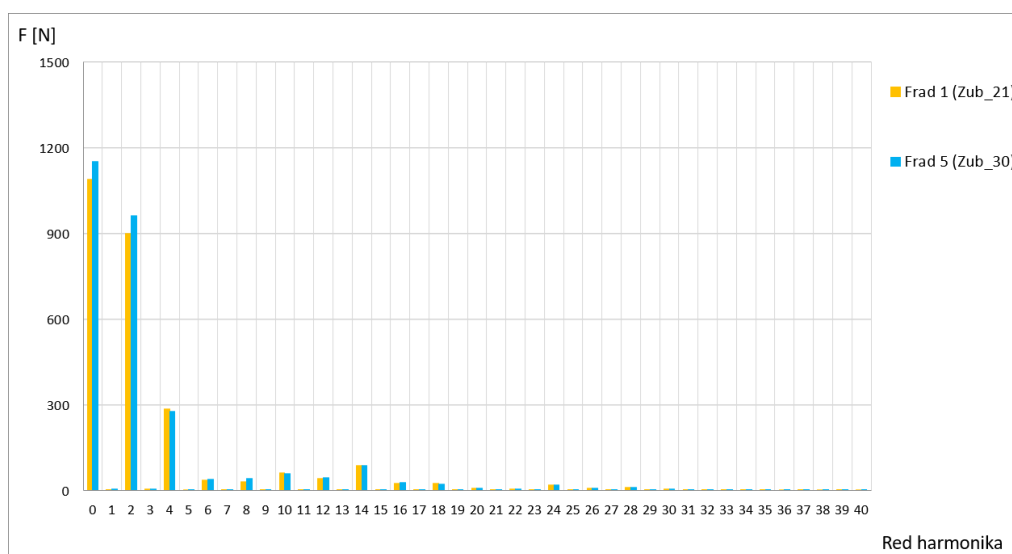
Slika 5.62 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $B-C$  protjecane strujom



Slika 5.63 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $A-B$  protjecane strujom



Slika 5.64 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $A-C$  protjecane strujom



Slika 5.65 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze  $B-C$  protjecane strujom

Upotrebom dva svitka međusobno razmaknuta za 10 zubi, što odgovara razmaku od približno polovice polnog koraka tj. za  $\sim 90$  električnih stupnjeva, mogu se utvrditi različite sile po zubima za slučaj nesimetričnog opterećenja. No, moguća je i pojava situacija nesimetričnog opterećenja kod kojih je razlika upotrebom samo dva svitka teško uočljiva. U ovdje analiziranom slučaju radi se o situaciji kad struje teku kroz faze  $A$  i  $C$  (slike 5.61 i 5.64 i tablica 5.7).

U slučaju upotrebe tri svitka međusobno razmaknuta za  $\frac{2}{3}$  polnog koraka tj. za 120 električkih stupnjeva, dobiva se značajno pouzdaniji i ujednačeniji pokazatelj nesimetrije sila po zubima. Tablicom 5.8 prikazane razlike vršnih vrijednosti sila od  $\sim 16,5$  % određene su za slučaj najniže analizirane snage iznosa 52 kVA. Narednim poglavljem 5.3.4. utvrđeno je kako se s povećanjem opterećenja povećavaju i razlike u efektivnim i vršnim vrijednostima sila.

Tablica 5.7 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za dva zuba međusobno razmaknuta  $\frac{1}{2} \tau_p$

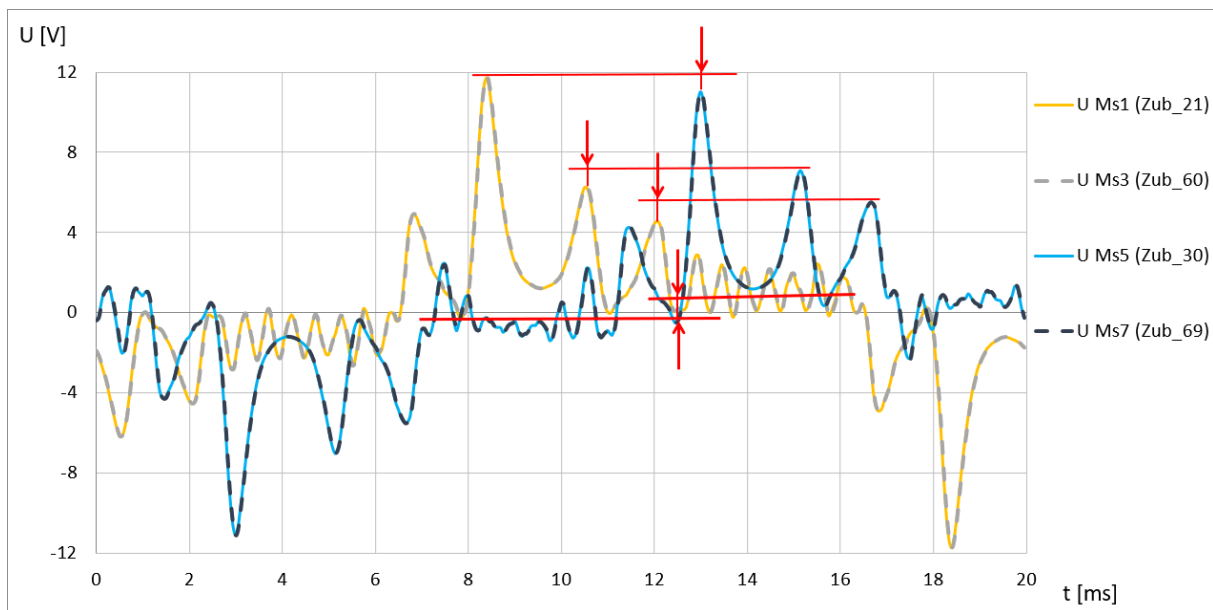
| Aktivni fazni namoti        | $A - B$ | $A - C$ | $B - C$ |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| Maksimalne vrijednosti sila |         |         |         |
| $F_{rad maks 1}$ [N]        | 2215    | 1999    | 1900    |
| $F_{rad maks 5}$ [N]        | 1909    | 2047    | 2125    |
| $\Delta F_{rad maks}$ [N]   | 307     | 48      | 225     |
| $\Delta F_{rad maks}$ [%]   | 16,1    | 2,4     | 11,8    |
| Efektivne vrijednosti sila  |         |         |         |
| $F_{rad ef 1}$ [N]          | 1361    | 1281    | 1329    |
| $F_{rad ef 5}$ [N]          | 1317    | 1355    | 1310    |
| $\Delta F_{rad ef}$ [N]     | 44      | 74      | 19      |
| $\Delta F_{rad ef}$ [%]     | 3,3     | 5,8     | 1,5     |

Tablica 5.8 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za tri zuba međusobno razmaknuta  $\frac{2}{3} \tau_p$

| Aktivni fazni namoti        | $A - B$ | $A - C$ | $B - C$ |
|-----------------------------|---------|---------|---------|
| Maksimalne vrijednosti sila |         |         |         |
| $F_{rad Maks A}$ [N]        | 2006    | 1896    | 2211    |
| $F_{rad Maks B}$ [N]        | 1908    | 2208    | 1990    |
| $F_{rad Maks C}$ [N]        | 2215    | 1990    | 1893    |
| $\Delta F_{rad Maks}$ [N]   | 312     | 312     | 318     |
| $\Delta F_{rad Maks}$ [%]   | 16,4    | 16,5    | 16,8    |

#### 5.3.4. Utvrđivanje nesimetričnog opterećenja analizom induciranih napona mjernih svitaka

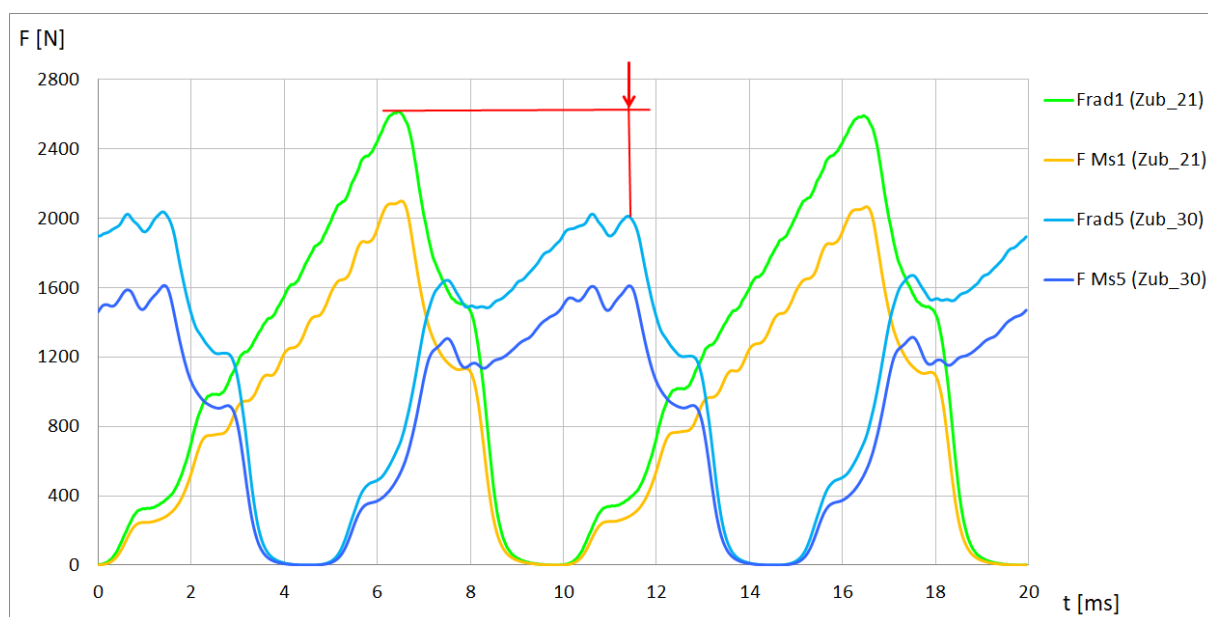
Oscilacije magnetskog polja uzrokovane nesimetričnim opterećenjem uzrokuju nejednake magnetske tokove kroz zube statora. Kako napon induciran u mjernom svitku ovisi o magnetskom toku, nesimetričnim opterećenjem uzrokovani poremećaji polja utječu na valni oblik ovog napona. Slikom 5.66 prikazan je izgled valnog oblika napona induciranog u dva para mjernih svitaka  $Ms1 - Ms3$  i  $Ms5 - Ms7$  međusobno razmaknutih za približno pola polnog koraka, za slučaj nesimetričnog opterećenja  $S = 104 \text{ kVA}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi = 1$ , uz napajanje tereta kroz faze  $A$  i  $B$ .



Slika 5.66 Razlike u naponima mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje.

Razlike se uočavaju u naponima mjernih svitaka međusobno razmaknutih za pola polnog koraka. Istaknuti vrhovi napona imaju različite maksimalne vrijednosti, a na specifičnom segmentu valnog oblika gdje se pojavljuje niz vrhova manjih amplituda uočava se razlika u iznosu srednje vrijednosti napona. Zanimljivo je primijetiti kako se valni oblici induciranih napona dijametralno postavljenih mjernih svitaka međusobno u potpunosti poklapaju, kao i u slučaju simetričnog opterećenja.

Razlike uzrokovane nesimetričnim opterećenjem moguće je dodatno istaknuti obradom valnog oblika mjernih svitaka, primjenom metode opisane u poglavlju 4.1. Slikom 5.67 prikazani su valni oblici sila određeni navedenom pretvorbom, za slučaj induciranih napona sa slike 5.66. Moguće je uočiti kako nesimetrično opterećenje po fazama uzrokuje veće razlike maksimalnih vrijednosti kod valnih oblika sila nego kod valnih oblika induciranih napona. Ove razlike prikazane su i brojčano u tablici 5.9.



Slika 5.67 Valni oblici sile određeni analizom napona mjernih svitaka i usporedba s valnim oblikom radijalne sile zubi za nesimetrično opterećenje.

Vrijednosti u tablici 5.9 pokazuju kako nesimetrično opterećenje koje uzrokuje razliku maksimalnih vrijednosti napona manju od 6 % dovodi do razlike maksimalnih vrijednosti sila od ~30 %. Treba primijetiti i da se postotne razlike među silama, određenima pomoću mjernih svitaka, dobro poklapaju s postotnom razlikom radijalnih sila izračunatih izravnim postupkom (zadnji stupac tablice 5.9). Tablicom 5.10 prikazane su razlike sila ovih dvaju zubi za niz nesimetričnih opterećenja generatora.

Tablica 5.9 Razlike maksimalnih iznosa napona i sila određenih pomoću mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje  $S = 104 \text{ kVA}$ ,  $U = 400 \text{ V}$ ,  $\cos\varphi = 1$ , uz napajanje faza  $A-B$

| Vršna vrijednost                                   | $Ms1 - Ms3$ | $Ms5 - Ms7$ | Razlika | Razlika [%] |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|---------|-------------|
| Napon svitka<br>$U_{Ms} [\text{V}]$                | 11,77       | 11,14       | 0,63    | 5,7         |
| Nekorigirana sila<br>svitka<br>$F_{Ms} [\text{N}]$ | 2096        | 1608        | 488     | 30,3        |
| Radijalna sila<br>$F_{rad} [\text{N}]$             | 2615        | 2037        | 578     | 28,4        |

Tablica 5.10 Razlike vršnih vrijednosti sila pri različitim stanjima nesimetričnog opterećenja temeljem proračunske analize za dva zuba međusobno razmaknuta  $\frac{1}{2} \tau_p$

| Red. Br. | Pogonsko stanje |           |                    |              | Sila određena pomoću svitka |                            | Razlika                 |                         |
|----------|-----------------|-----------|--------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
|          | $U$ [V]         | $S$ [kVA] | $\cos \varphi$ [-] | Aktivne faze | $M_{s1}$<br>$F_{maks}$ [N]  | $M_{s5}$<br>$F_{maks}$ [N] | $ \Delta F_{maks} $ [N] | $ \Delta F_{maks} $ [%] |
| 1        | 400             | 52        | 0,08               | $A-B$        | 2083                        | 2013                       | 70                      | 3,5                     |
| 2        | 400             | 52        | 0,70               | $A-B$        | 2222                        | 2003                       | 219                     | 10,9                    |
| 3        | 400             | 52        | 1,00               | $A-B$        | 2215                        | 1909                       | 307                     | 16,1                    |
| 4        | 400             | 90        | 0,70               | $A-B$        | 2465                        | 2146                       | 319                     | 14,9                    |
| 5        | 400             | 104       | 0,08               | $A-B$        | 2292                        | 2191                       | 101                     | 4,6                     |
| 6        | 400             | 104       | 0,70               | $A-B$        | 2543                        | 2197                       | 346                     | 15,7                    |
| 7        | 400             | 104       | 1,00               | $A-B$        | 2615                        | 2037                       | 578                     | 28,4                    |

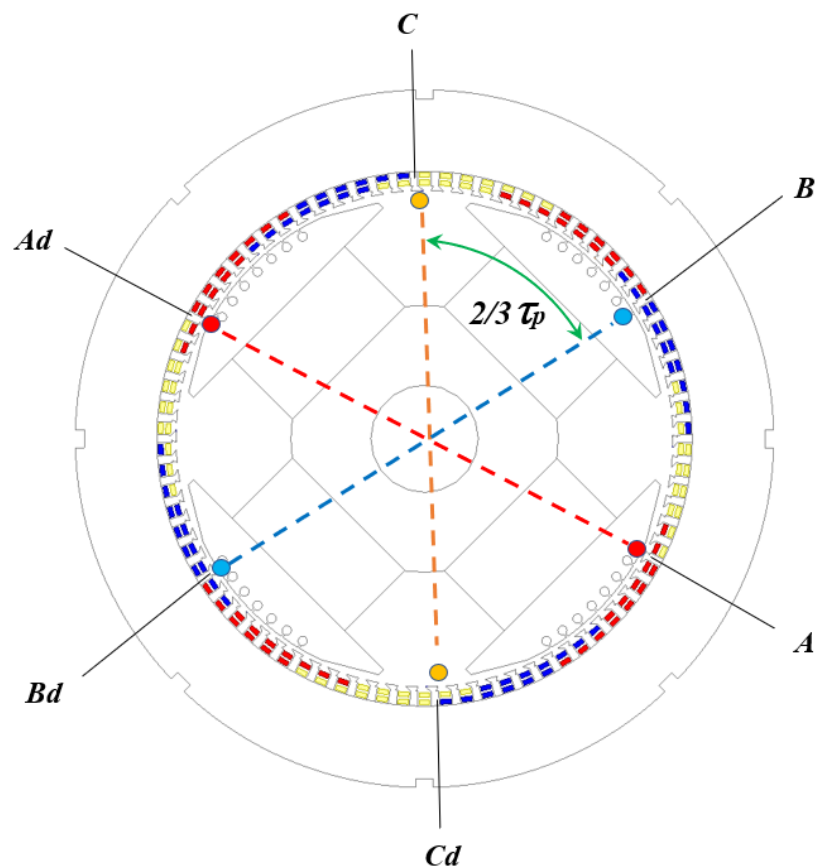
Analizom sila obrađenom u točki 5.3.3 uočeno je kako za utvrđivanje električne nesimetrije, neovisno o rasporedu struja po fazama, dovoljno je pratiti iznose sila za tri zuba, međusobno razmaknuta za  $\frac{2}{3}$  polnog koraka  $\tau_p$  (slika 5.52). Tablica u nastavku pokazuje iznose sila po ovim zubima i njihove razlike za niz nesimetričnih radnih stanja.

Tablica 5.11 Razlike vršnih vrijednosti sila pri različitim stanjima nesimetričnog opterećenja temeljem proračunske analize za tri zuba međusobno razmaknuta  $\frac{2}{3} \tau_p$

| Red. Br. | Pogonsko stanje |           |                    |              | Sila određena pomoću svitka  |                              |                              | Razlika                 |                         |
|----------|-----------------|-----------|--------------------|--------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|          | $U$ [V]         | $S$ [kVA] | $\cos \varphi$ [-] | Aktivne faze | Svitak $A$<br>$F_{maks}$ [N] | Svitak $B$<br>$F_{maks}$ [N] | Svitak $C$<br>$F_{maks}$ [N] | $ \Delta F_{maks} $ [N] | $ \Delta F_{maks} $ [%] |
| 1        | 400             | 52        | 0,08               | $A-B$        | 1928                         | 2013                         | 2083                         | 155                     | 8,1                     |
| 2        | 400             | 52        | 0,70               | $A-B$        | 1939                         | 2002                         | 2222                         | 283                     | 14,6                    |
| 3        | 400             | 52        | 1,00               | $A-B$        | 2006                         | 1908                         | 2215                         | 312                     | 16,4                    |
| 4        | 400             | 90        | 0,70               | $A-B$        | 2036                         | 2145                         | 2465                         | 429                     | 21,0                    |
| 5        | 400             | 104       | 0,08               | $A-B$        | 2037                         | 2192                         | 2292                         | 255                     | 12,5                    |
| 6        | 400             | 104       | 0,70               | $A-B$        | 2071                         | 2197                         | 2543                         | 472                     | 22,8                    |
| 7        | 400             | 104       | 1,00               | $A-B$        | 2185                         | 2035                         | 2615                         | 580                     | 28,5                    |

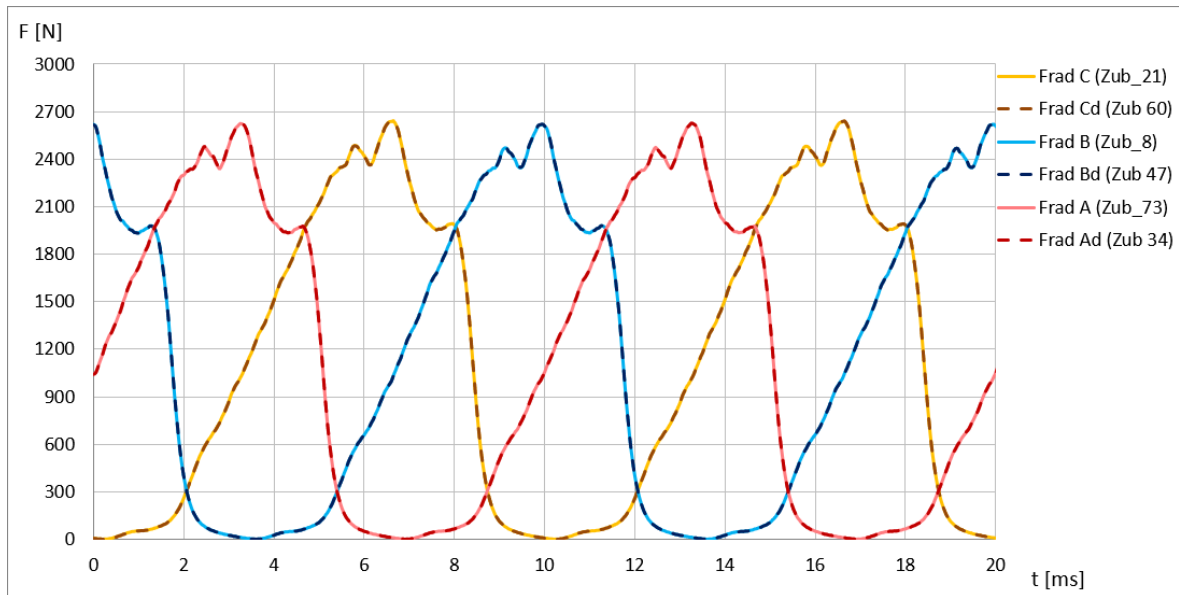
### 5.3.5. Manje električne nesimetrije

Prethodno prikazane situacije odnosile su se na slučajeve nesimetričnih električnih opterećenja u kojima je isključena jedna faza namota statora, a kroz druge dvije faze teku struje barem dva puta manje od nazivne vrijednosti. U praksi većina strojeva ne radi u ovakvim uvjetima, već se u njihovom radu mogu očekivati nesimetričnosti tereta značajno manjih iznosa. Kod sinkronih električnih generatora primarno namijenjenih proizvodnji električne energije, iznos dopuštene električne nesimetrije po fazama pri punoj snazi kreće se unutar granica 5-10 % [1]. Zanimljivo je stoga proučiti kako se električne nesimetrije ovakvih iznosa odražavaju na magnetsko stanje stroja. Slikom 5.68 označeni su zubi za koje su u nastavku prikazani iznosi radijalnih sila.



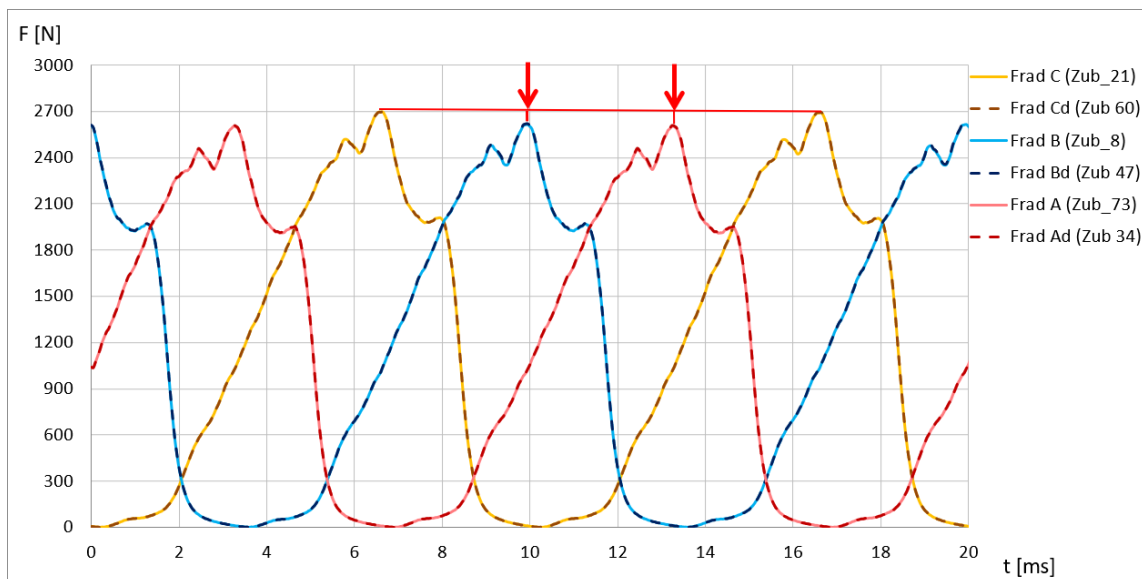
Slika 5.68 Pozicije analiziranih zubi u modelu generatora

Kao referentno pogonsko stanje odabrana je radna točka nazivnog napona  $U=400$  V i nazivne prividne snage  $S=400$  kVA, uz  $\cos\varphi=0,9$ . Sile određene pomoću mjernih svitaka za ovakvo simetrično opterećenje prikazane su slikom 5.69. Moguće je uočiti kako u ovakvom slučaju opterećenja sile zubi međusobno razmaknutih  $\frac{2}{3}\tau_p$  imaju jednake valne oblike i vršne vrijednosti. Također je vidljivo da se valni oblici sila, određenih pomoću dijametralno postavljenih svitaka, međusobno preklapaju.



Slika 5.69 Valni oblici sila za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=400$  kVA,  $\cos\varphi=0,9$

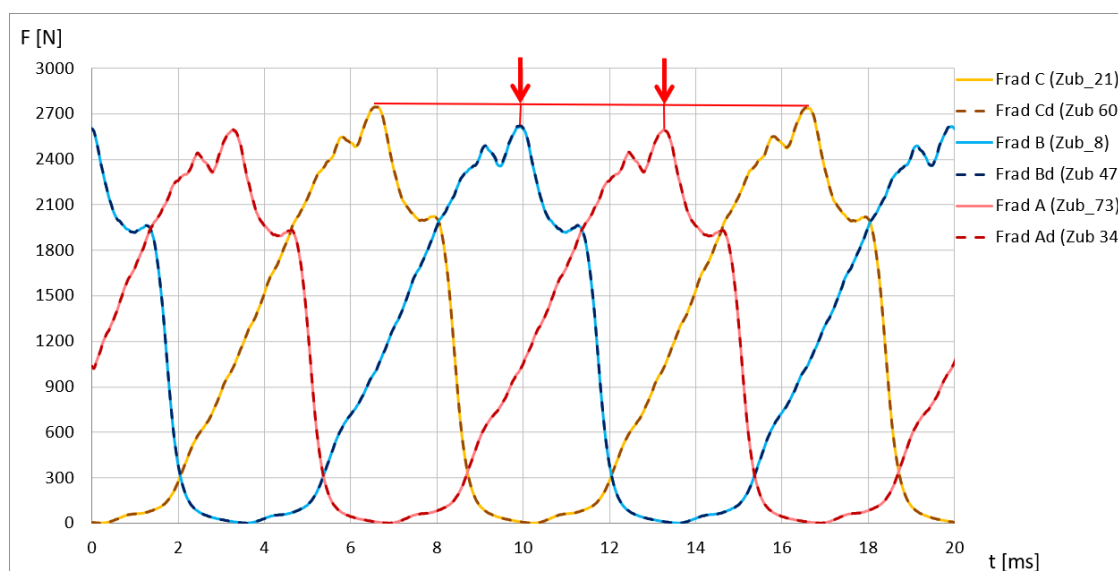
Slikom 5.70 prikazan je slučaj nesimetričnog opterećenja, koji se u odnosu na referentnu situaciju razlikuje po tome što kroz fazu C teče struja 10 % manja od nazivne vrijednosti. U ovakvom slučaju uočava se razlika u vršnim vrijednostima valnih oblika sila. Kao i kod većih nesimetrija, valni oblici sila dijametralno postavljenih svitaka u potpunosti se preklapaju.



Slika 5.70 Valni oblici sila 10 % niži iznos struje faze C

Slikom 5.71 prikazan je slučaj koji se u odnosu na referentnu situaciju razlikuje po tome što kroz fazu C teče struja 20 % manja od nazivne vrijednosti. U ovom slučaju također se uočava razlika u vršnim vrijednostima valnih oblika sila zubi međusobno razmaknutih za  $\frac{2}{3}\tau_p$ . Radi lakše usporedbe, tablicom 5.12 prikazane su vršne vrijednosti sila i njihove razlike.





Slika 5.71 Valni oblici sila uz 20 % niži iznos struje faze C

Tablica 5.12 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za tri zuba međusobno razmaknuta  $\frac{1}{3} \tau_p$ 

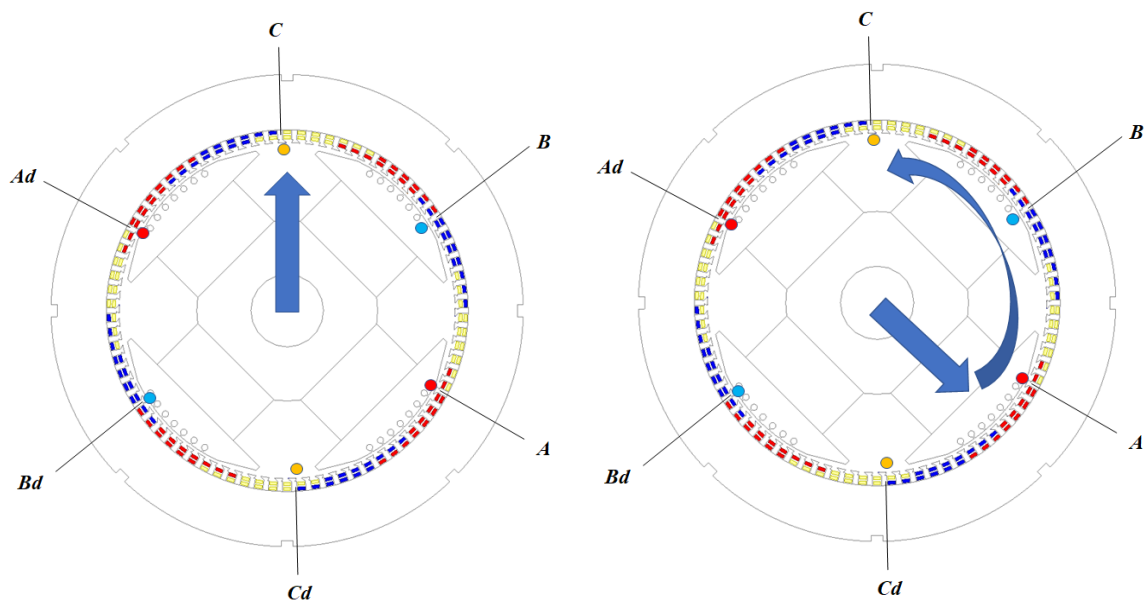
| Pogonsko stanje             | Simetrično<br>$I_a=I_b=I_c=I_n$ | 10 % nesimetrije<br>$I_a=I_b=I_n; I_c=0,9 \cdot I_n$ | 15 % nesimetrije<br>$I_a=I_b=I_n; I_c=0,75 \cdot I_n$ | 20 % nesimetrije<br>$I_a=I_b=I_n; I_c=0,8 \cdot I_n$ |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Maksimalne vrijednosti sila |                                 |                                                      |                                                       |                                                      |
| $F_{rad\ Maks\ A} [N]$      | 2625                            | 2607                                                 | 2597                                                  | 2591                                                 |
| $F_{rad\ Maks\ B} [N]$      | 2617                            | 2618                                                 | 2615                                                  | 2618                                                 |
| $F_{rad\ Maks\ C} [N]$      | 2638                            | 2697                                                 | 2717                                                  | 2747                                                 |
| $\Delta F_{rad\ Maks} [N]$  | 21                              | 90                                                   | 119                                                   | 156                                                  |
| $\Delta F_{rad\ Maks} [\%]$ | 0,82                            | 3,44                                                 | 4,59                                                  | 6,01                                                 |

Pregledom rezultata tablice 5.12, moguće je uočiti kako maksimalna razlika promatranih sila približno proporcionalno ovisi o razlici efektivnih vrijednosti faznih struja. Također se može uočiti kako je postotna razlika vrhova sila oko 3 puta manja od postotnog smanjenja struje faze C. Ovo otežava utvrđivanje nesimetrija manjeg iznosa. Za nesimetrije faznih struja do 10 %, razlika u amplitudama je ispod granice mjerne nesigurnosti akvizicijske mjerne stanice i dodatne nesigurnosti uslijed geometrijskih nesavršenosti stroja. Nesimetriju iznosa 20 % moguće je odrediti mjerenjem, no potrebno je koristiti mjerne instrumente dovoljno visoke točnosti.

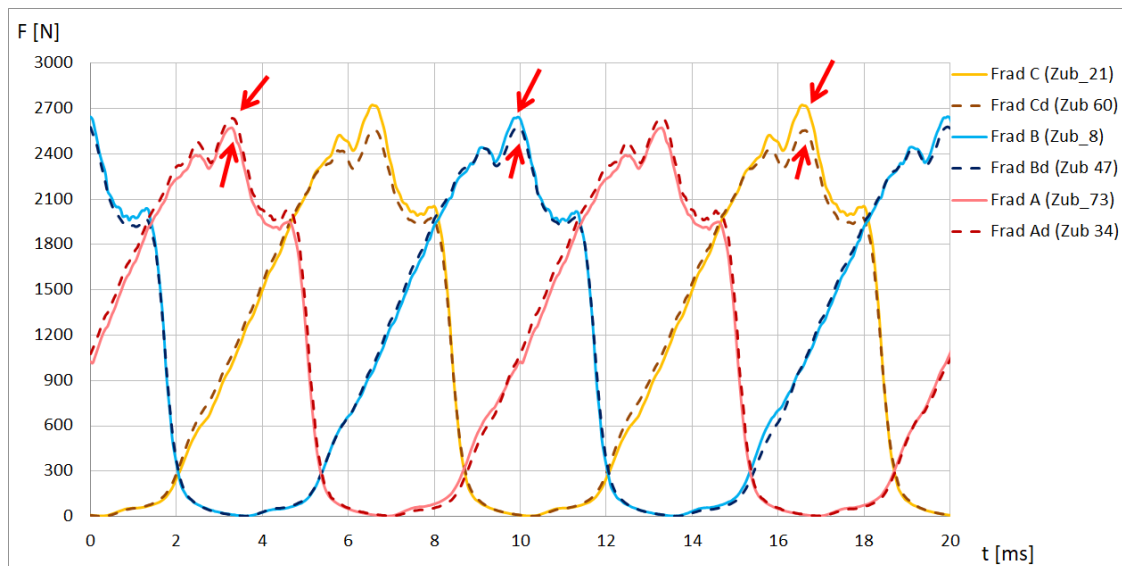
### 5.3.5. Magnetske sile koje djeluju na zube u slučaju drugačijih vrsta poremećaja

U nastavku su prikazani rezultati simulacijskih elektromagnetskih proračuna za neke situacije koje uzrokuju magnetsku nesimetriju u stroju, a nisu posljedica nesimetričnog opterećenja po fazama. I u ovom slučaju je za referentno stanje korišteno simetrično trofazno opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=400\text{ kVA}$  uz  $\cos\varphi=0,9$ , kod kojega sile na zube imaju valne oblike jednakih vršnih vrijednosti, a valni oblici sila dijametralno razmaknutih zubi međusobno se preklapaju (slika 5.69).

Slikom 5.72 lijevo prikazan je smjer pomaka rotora za slučaj analize statičke radijalne ekscentričnosti rotora u iznosu od 10 % zračnog raspora u smjeru zuba  $C$ , a slikom 5.73 izračunati valni oblici radijalnih magnetskih sila promatranih zubi za dotični slučaj ekscentričnosti. Između sva tri dijametralno postavljena para svitaka ( $A-Ad$ ,  $B-Bd$  i  $C-Cd$ ) uočavaju se razlike u valnim oblicima. Najveće razlike vidljive su za par  $C-Cd$ . Budući da je zračni raspor najmanjeg iznosa pozicioniran ispod zone  $C$ , uslijed smanjenog magnetskog otpora i povećane magnetske indukcije, valni oblik sile na ovaj zub ima najveću vršnu vrijednost. Sukladno tome, vršna sila na zub  $Cd$ , koji se nalazi u zoni najvećeg zračnog raspora, najmanjeg je iznosa. Parovi zubi  $A-Ad$  i  $B-Bd$  nalaze se u sličnim pozicijama u odnosu na smjer ekscentričnog pomaka, pa su i razlike vršnih vrijednosti sila ovih parova dijametralno razmaknutih zubi sličnog iznosa. Kako se u paru  $A-Ad$  zub  $Ad$  nalazi u zoni smanjenog zračnog raspora, sila na ovaj zub veća je nego sila na zub  $A$ . Kod para  $B-Bd$  zub  $B$  nalazi se u zoni koja ima manji zračni raspor, pa je sila tog zuba veća od sile na zub  $Bd$ .



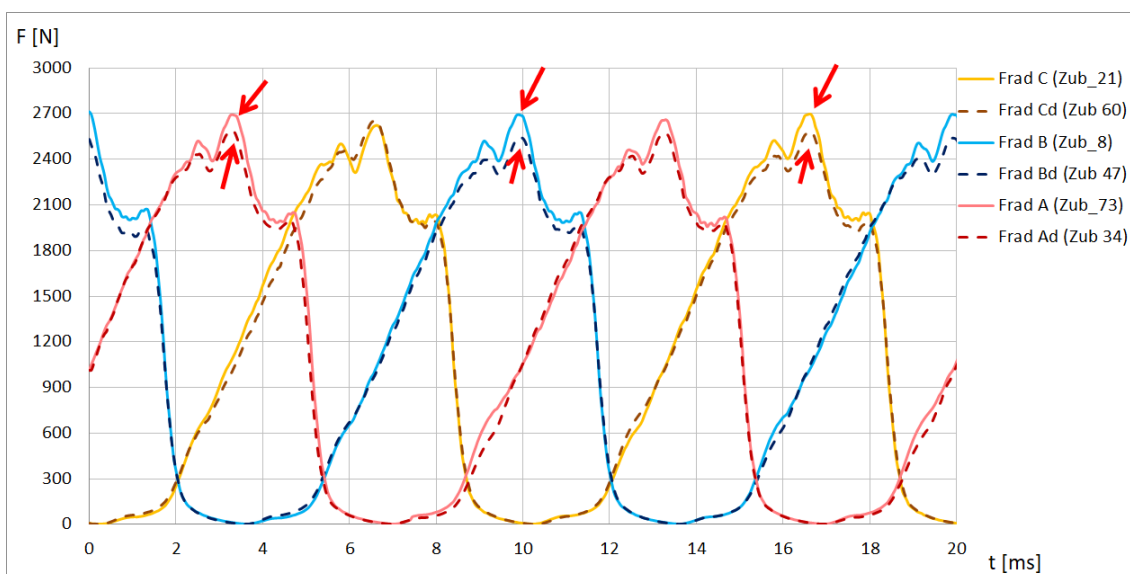
Slika 5.72 Statička ekscentričnost (lijevo) i dinamička ekscentričnost (desno)



Slika 5.73 Valni oblici sila uz statičku ekscentričnost rotora iznosa 10 % zračnog raspora

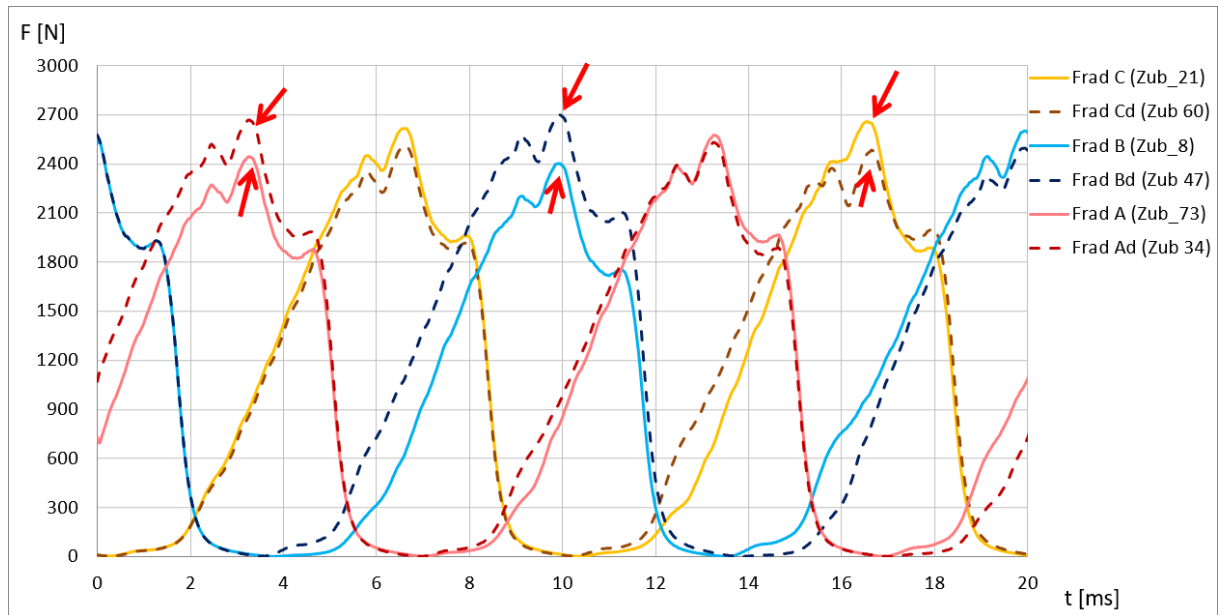
U drugom slučaju modelirana je tzv. dinamička ekscentričnost kod koje se mjesto najmanjeg zračnog raspora tijekom vrtnje uvijek nalazi iznad centra odabrane polne papuče (slika 5.72 desno). Valni oblici sila na promatrane zube određeni uz ovakvu simulaciju za slučaj ekscentričnosti od 10 % minimalnog zračnog raspora prikazani su slikom 5.74.

I u ovom slučaju se kod sva tri para dijametralno postavljenih svitaka (*A-Ad*, *B-Bd* i *C-Cd*) uočavaju razlike između valnih oblika sila. Kako se vrti rotor, pol s minimalnim zračnim rasporom prolazi ispod označenih zubi po rasporedu *A*, *B*, *C*, *Ad*, *Bd*, *Cd*. Kada se ispod pojedinog zuba nalazi ovaj pol (npr. zub *B*), sila na taj zub poprima veću vrijednost od sila koje djeluju na ostale zube. U tom trenutku na dijametralno razmaknutoj poziciji (zub *Bd*) nalazi se pol s najvećim zračnim rasporom iznad papuče, pa sila na taj zub ima najmanji iznos.



Slika 5.74 Valni oblici sila uz dinamičku ekscentričnost rotora iznosa 10 % zračnog raspora

U trećem slučaju analizirana je situacija u kojoj je na jednom polu za 10 % smanjen broj zavoja (kratki spoj 10 % zavoja jednog pola). Dotični pol uslijed ovoga ima smanjen magnetski tok. I kod ovakvog poremećaja se valni oblici sila dijametralno postavljenih parova svitaka ( $A-Ad$ ,  $B-Bd$  i  $C-Cd$ ) međusobno razlikuju (slika 5.75). Kako se vrti rotor, pol sa smanjenim brojem zavoja prolazi ispod označenih zubi po rasporedu  $A, B, C, Ad, Bd, Cd$ . Kada se ovaj pol nalazi ispod promatranog zuba (npr. zub B), sila na taj zub poprima manju vrijednost od sila koje djeluju na ostale zube.



Slika 5.75 Valni oblici sila uz 10 % kratko spojenih zavoja uzbuđenog namota jednog pola

Tablicom 5.13 usporedno su prikazane maksimalne razlike sila dijametralnih parova zubi i maksimalno postotno odstupanje od vršne vrijednosti sile idealnog simetričnog stanja prikazane slikom 5.68 ( $F_{maks\ sim} = 2627\text{ N}$ ). Moguće je vidjeti kako razlike sila određene pomoću dijametralno postavljenih mjernih svitaka za analizirane slučajeve nesimetrija iznose od 6,9 do 16,9 %. Ovakve razlike moguće je detektirati mjerenjem.

Tablica 5.13 Razlike vršnih vrijednosti sila određenih pomoću dijametralno postavljenih svitaka

| Vrsta nesimetrije                | Statička ekscentričnost<br>10 % zr.raspora | Dinamička ekscentričnost<br>10 % zr.raspora | Pol s 10 % manje<br>uzbuđenih zavoja |
|----------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| Maksimalne razlike sila          |                                            |                                             |                                      |
| $\Delta F_{rad\ Maks\ A-Ad}$ [N] | 79                                         | 233                                         | 375                                  |
| $\Delta F_{rad\ Maks\ B-Bd}$ [N] | 81                                         | 201                                         | 444                                  |
| $\Delta F_{rad\ Maks\ C-Cd}$ [N] | 182                                        | 228                                         | 318                                  |
| $\Delta F_{rad\ Maks}$ [%]       | 6,9                                        | 8,9                                         | 16,9                                 |

Proračunima provedenima za nesimetrična radna stanja utvrđeno je da:

- pri nesimetričnom električnom opterećenju postoji nesimetrija magnetskih sila koje djeluju na pojedine zube generatora;
- anvelopa maksimuma sila svih zubi ima izraženu valovitost, koja ne postoji u slučaju simetričnih pogonskih stanja. Uočena valovitost anvelope sila koje djeluju na zube ima 2 puta veću frekvenciju od osnovnog magnetskog polja. U analiziranom slučaju radi se o frekvenciji od 100 Hz;
- u nesimetričnom električnom električki nesimetričnom pogonskom stanju, maksimalne sile koje djeluju na zube uz istu izlaznu snagu generatora  $S$  veće su nego u slučaju simetričnog opterećenja;
- u nesimetričnom električnom stanju (rad na jednofazni teret), maksimalne sile koje djeluju na zube uz jednake iznose faznih struja veće su nego u simetričnom stanju;
- maksimalna vrijednost sile i nesimetrija sila po zubima rastu s povećanjem snage  $S$ ;
- mjesto na obodu stroja (zub) na koje djeluje maksimalna sila neće se promijeniti s povećanjem snage  $S$ ;
- maksimalna vrijednost i nesimetrija sila po zubima rastu s povećanjem faktora snage  $\cos\varphi$ ;
- mjesto na obodu stroja (zub) na koje djeluje maksimalna sila promijeniti će se s promjenom faktora snage  $\cos\varphi$ ;
- u slučaju nesimetričnog radnog opterećenja, s jediničnim faktorom snage ( $\cos\varphi=1$ ), maksimalna vrijednost sile javlja se ispod fazne zone neopterećenog namota;
- u slučaju nesimetričnog induktivnog opterećenja, s faktorom snage  $\cos\varphi\approx 0$ , maksimalna vrijednost sile javlja se ispod fazne zone opterećenog namota koja slijedi faznu zonu isključenog namota;
- analizom napona mjernih svitaka ugrađenih na zube paketa statora moguće je utvrditi pojavu nesimetričnog opterećenja po fazama;
- upotrebom tri mjerna svitka moguće je utvrditi nesimetriju na temelju veće razlike signala nego u slučaju upotrebe samo dva mjerna svitka za isto pogonsko stanje;
- iznos električnog nesimetričnog opterećenja veći od 20 % jedne faze moguće je detektirati analizom napona mjernih svitaka;
- u slučaju radijalnih ekscentričnosti i kvarova uzbuđenog namota dolazi do razlike u silama dijametralno postavljenih svitaka;
- razlike u silama dijametralno pozicioniranih zuba moguće je odrediti mjerenjem za ekscentrične pomake koji prelaze iznos od 10 % zračnog raspora;

#### 5.4. Izračun vlastitih frekvencija statora

Određivanje vlastitih frekvencija proučavane konstrukcije uobičajeni je prvi korak u analizi mehaničkog odziva. Poznavanjem ovih frekvencija za paket i kućište statora dobiva se prvi uvid u mehaničke karakteristike stroja. Vlastite frekvencije koje odgovaraju glavnim formama (modovima) vibriranja analizirane konstrukcije važno je poznavati jer ukazuju na frekvencije pobude za koje je konstrukcija izrazito osjetljiva. Ukoliko se neki harmonik pobudne sile poklopi s vlastitom frekvencijom mehaničke konstrukcije, dolazi do znatnog povećanja amplituda vibracija poznatog kao rezonancija. Vlastite frekvencije konstrukcije moguće je utvrditi i mjerenjem, pa se temeljem ovih podataka može provesti kalibracija računskog modela.

U analiziranom slučaju proračun je proveden na rasponu frekvencije 0 - 13 kHz, pri čemu su određeni modovi vibriranja konstrukcije sastavljene od kućišta i paketa statora, te vodiča, izolacije i klinova u utorima. U tablici 5.14 prikazane su izračunate vrijednosti za prvih 60 vlastitih frekvencija, koje je moguće podijeliti na dvije skupine:

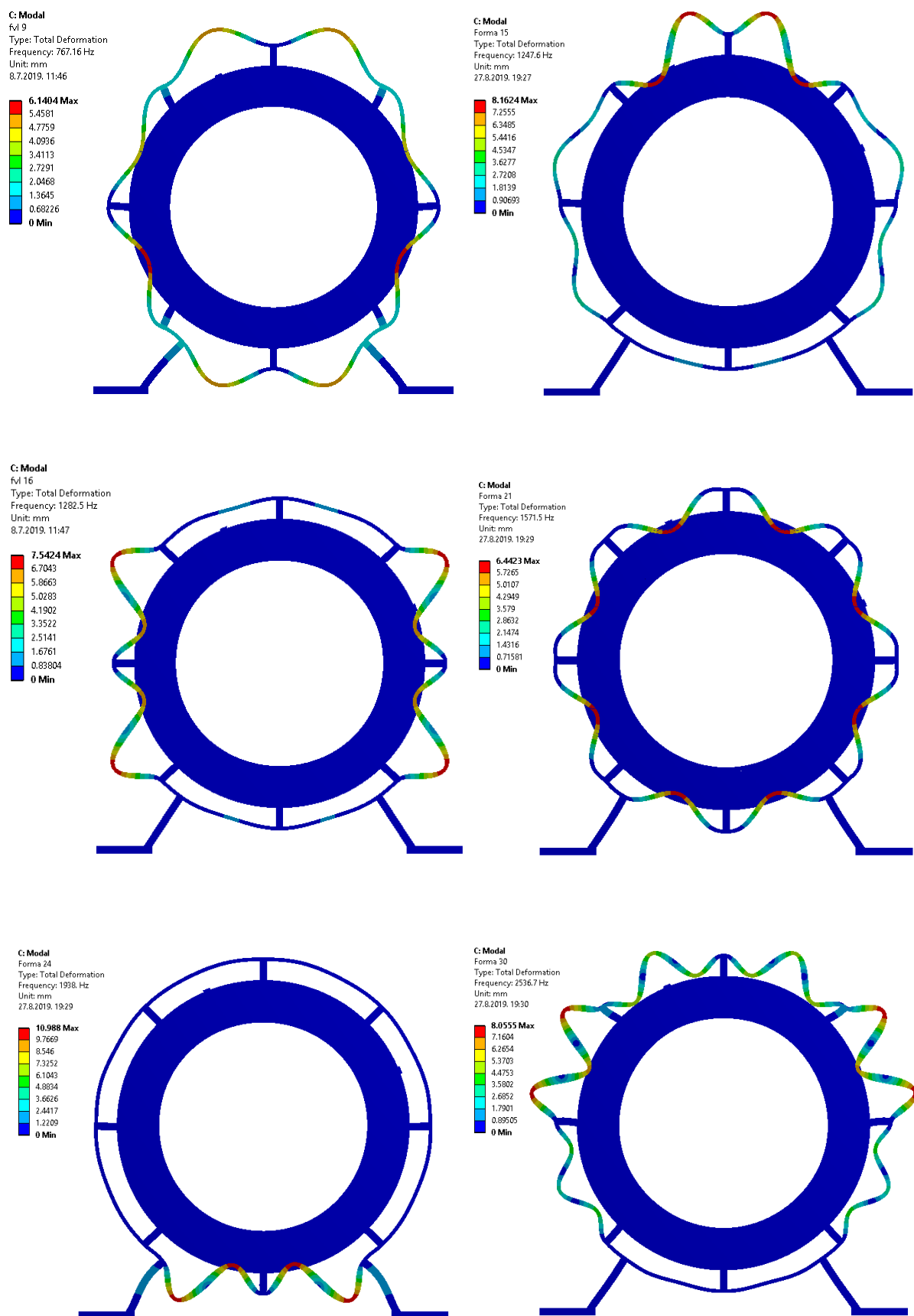
- frekvencije dijelova kućišta (slika 5.76).
- frekvencije paketa s namotom (slike 5.77 do 5.79);

Vrijednosti frekvencija vezanih uz paket statora posebno su istaknute u tablici, a pripadne forme vibriranja zasebno su prikazane slikama u nastavku.

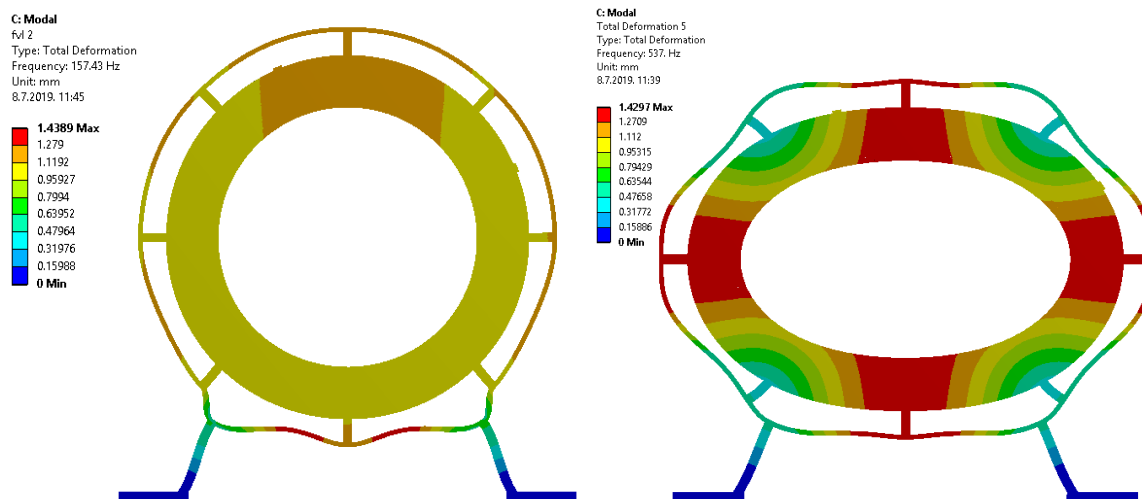
Tablica 5.14 Vlastite frekvencije mehaničkog modela statora s kućištem

| R. Br.        | 1                 | 2                 | 3                 | 4                | 5                | 6    | 7                 | 8    | 9                 | 10                |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------|-------------------|------|-------------------|-------------------|
| $f_{vl}$ [Hz] | 77                | 157 <sub>1</sub>  | 163 <sub>1</sub>  | 537 <sub>2</sub> | 566 <sub>2</sub> | 705  | 716               | 736  | 767               | 801               |
| R. Br.        | 11                | 12                | 13                | 14               | 15               | 16   | 17                | 18   | 19                | 20                |
| $f_{vl}$ [Hz] | 870               | 913               | 1076              | 1236             | 1248             | 1283 | 1288              | 1295 | 1454 <sub>3</sub> | 1473 <sub>3</sub> |
| R. Br.        | 21                | 22                | 23                | 24               | 25               | 26   | 27                | 28   | 29                | 30                |
| $f_{vl}$ [Hz] | 1572              | 1626              | 1925              | 1938             | 2254             | 2410 | 2417 <sub>4</sub> | 2471 | 2489              | 2537              |
| R. Br.        | 31                | 32                | 33                | 34               | 35               | 36   | 37                | 38   | 39                | 40                |
| $f_{vl}$ [Hz] | 2550              | 2594              | 2645              | 2810             | 2821             | 3055 | 3125              | 3184 | 3205              | 3636 <sub>5</sub> |
| R. Br.        | 41                | 42                | 43                | 44               | 45               | 46   | 47                | 48   | 49                | 50                |
| $f_{vl}$ [Hz] | 3644 <sub>5</sub> | 3744              | 3847              | 3957             | 4057             | 4123 | 4178              | 4180 | 4200              | 4483              |
| R. Br.        | 51                | 52                | 53                | 54               | 55               | 56   | 57                | 58   | 59                | 60                |
| $f_{vl}$ [Hz] | 4582              | 4956 <sub>6</sub> | 4961 <sub>6</sub> | 5092             | 5094             | 5876 | 5903              | 5917 | 5937              | 5968              |

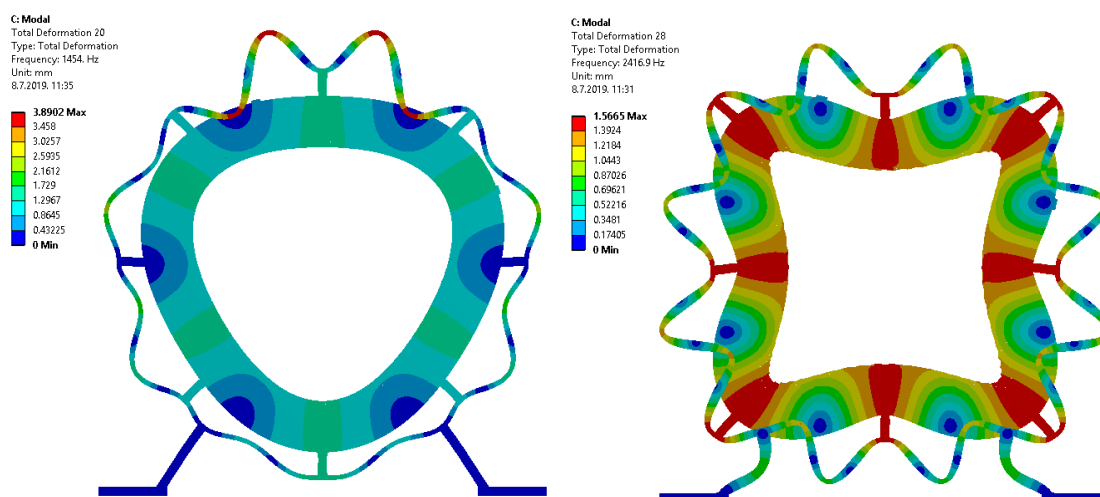
\* Plavom pozadinom označene su vlastite frekvencije koje pripadaju paketu statora, a indeksom je označen broj istaknutih vrhova deformacije koji se pojavljuje po obodu paketa statora pri dotičnoj frekvenciji.



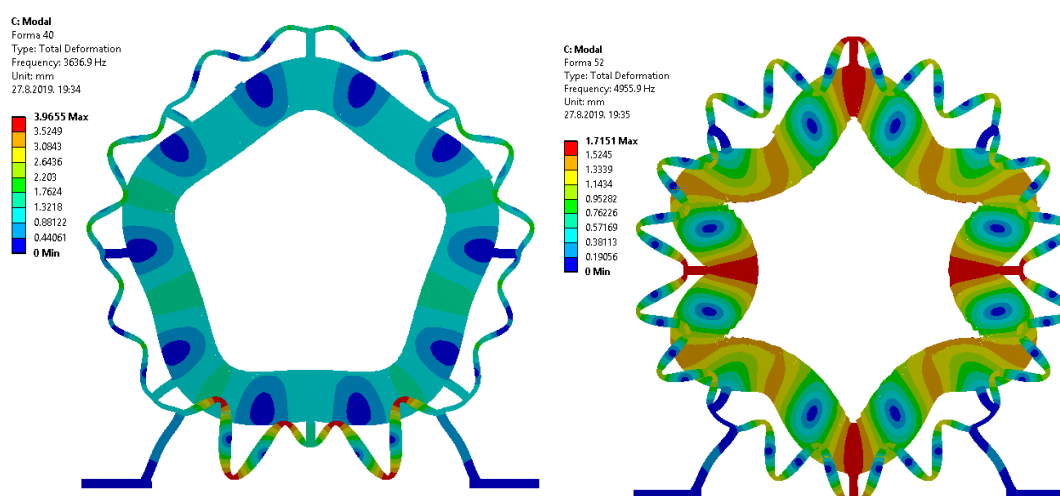
Slika 5.76 Primjeri formi vibriranja kućišta



Slika 5.77 Prva i druga forma vibriranja paketa statora



Slika 5.78 Treća i četvrta forma vibriranja paketa statora

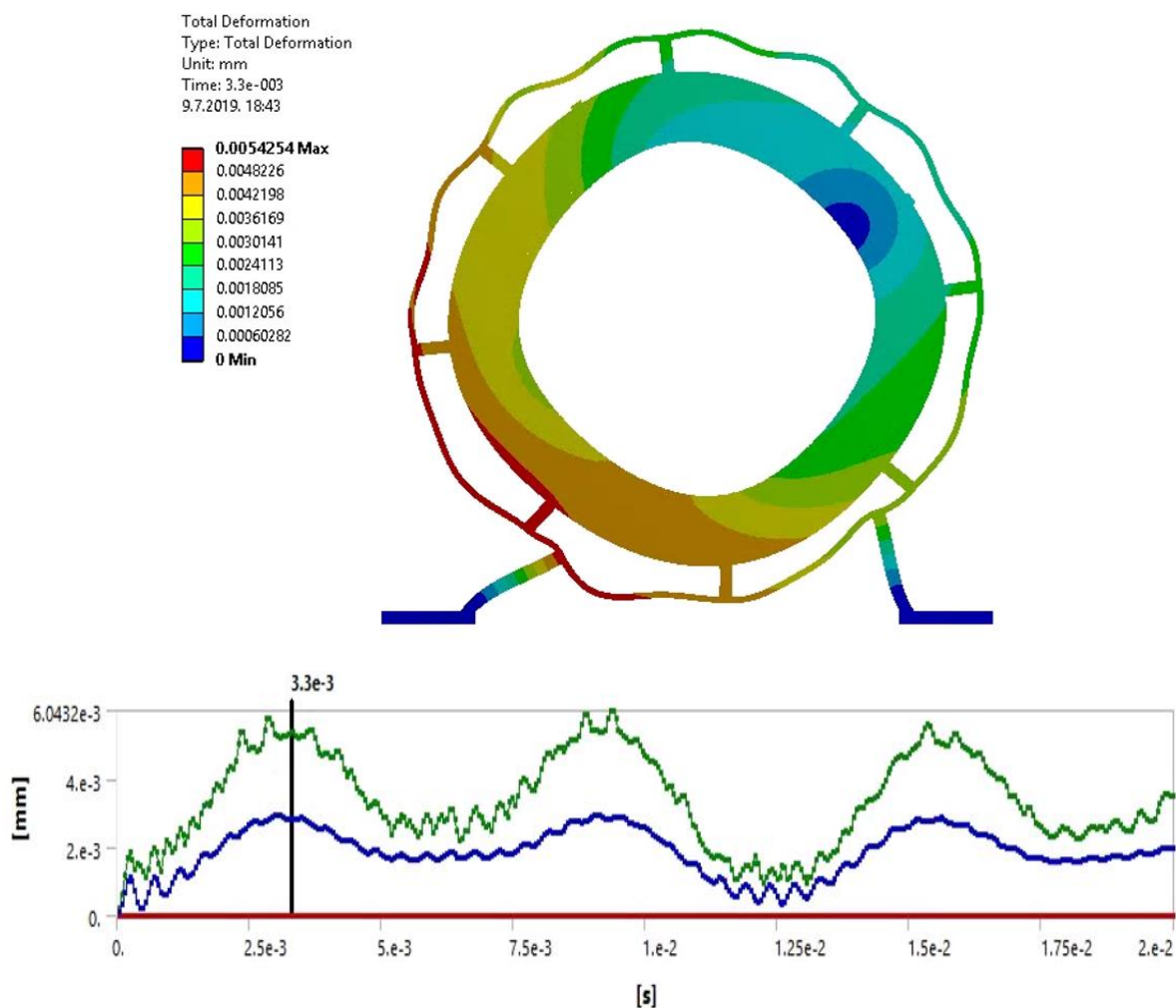


Slika 5.79 Peta i šesta forma vibriranja paketa statora

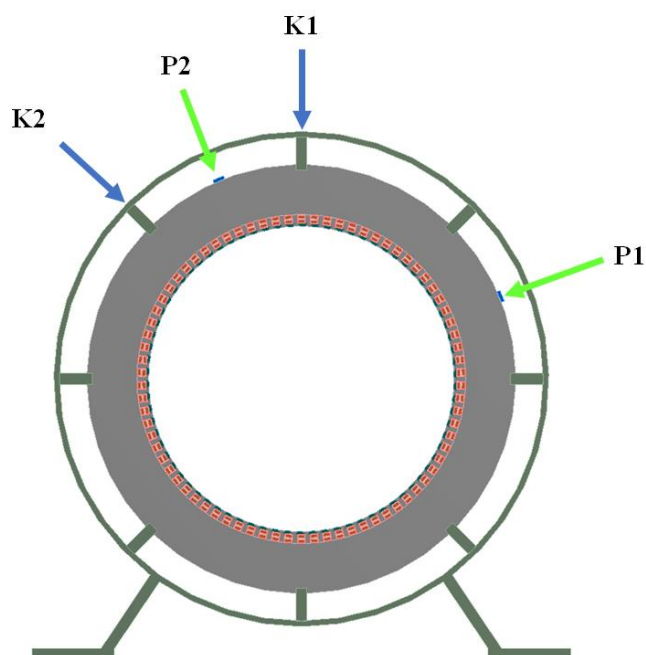


### 5.5. Rezultati mehaničkih proračuna za simetrična opterećenja generatora

Analiza odziva stroja na prisilnu pobudu započela je izradom mehaničkog modela, pomoću kojeg su određene vlastite frekvencije kućišta i paketa statora. Za svako analizirano pogonsko stanje, sile prethodno izračunate elektromagnetskim proračunom unesene su u mehanički model te su uz takvu pobudu provedeni izračuni. Osim općenitog rezultata kojim se utvrđuju deformacije cjelokupne analizirane geometrije (slika 5.80), moguće je odrediti i iznose pomaka, brzine ili akceleracije na točno odabranom mjestu modela. Radi mogućnosti kasnije usporedbe s rezultatima mjerenja, proračunom su određeni iznosi amplituda akceleracija vibracija za četiri mjesta na modelu prikazana slikom 5.81. Oznakama *P1* i *P2* označena su mjesta određivanja iznosa akceleracija izravno na paketu, a sa *K1* i *K2* mjesta na plaštu kućišta, koja se nalaze izravno iznad spojnih letvi paketa i kućišta.

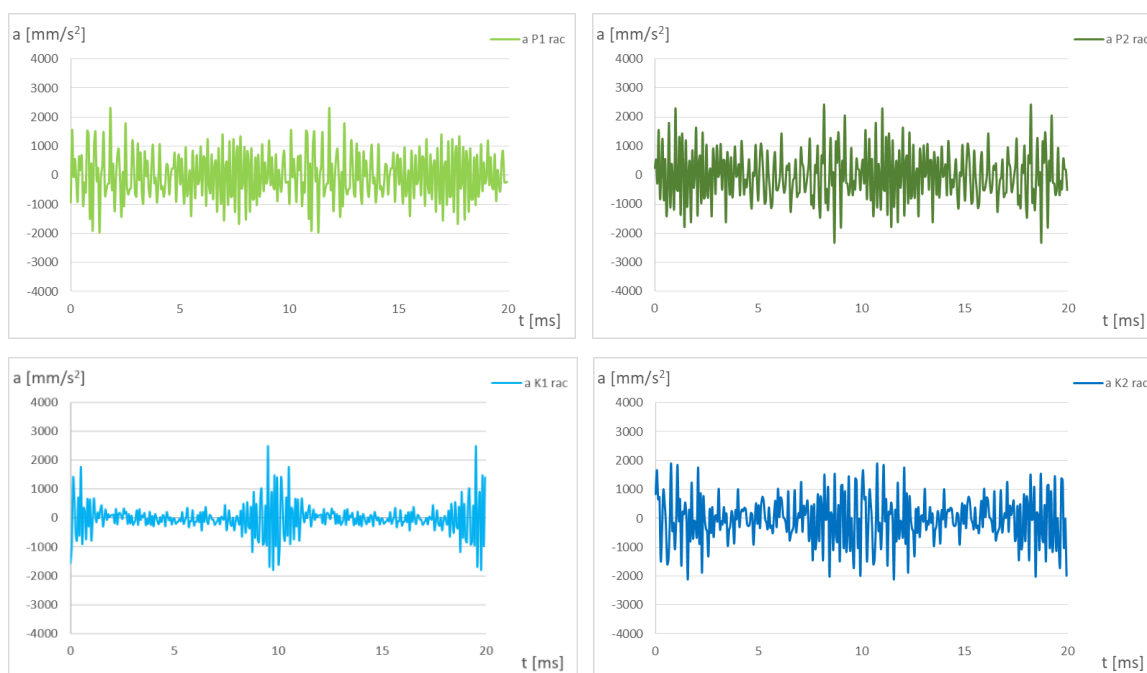


Slika 5.80 Rezultati mehaničkog proračuna

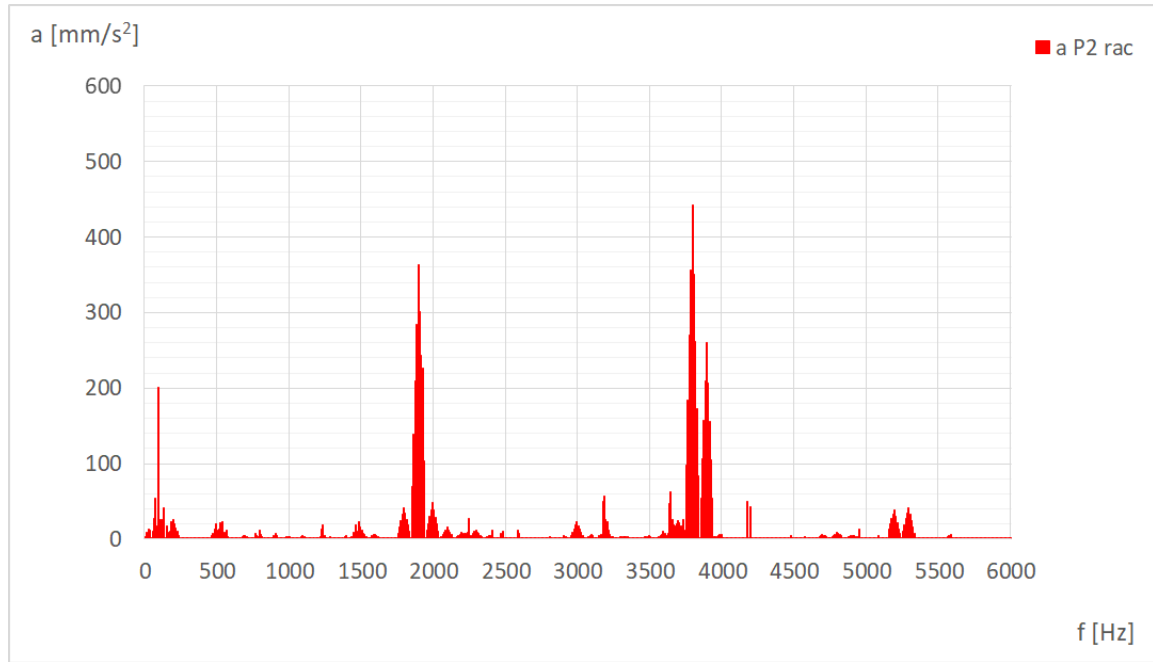


Slika 5.81 Mjesta za koja su proračunskim modelom određivani iznosi vibracija.

Slikom 5.82 prikazani su valni oblici akceleracija na četiri navedene lokacije za slučaj praznog hoda uz nazivnu vrijednost linijskog napona  $U=400$  V. Usporedbom valnih oblika moguće je uočiti kako se vibracijski odzivi na četiri odabrane lokacije međusobno razlikuju. Valni oblici na mjestima *P1* i *P2* paketa su međusobno bližih iznosa i sličnijih valih oblika od onih na lokacijama *K1* i *K2* plašta kućišta. Pri tome se na jednom mjestu kućišta bilježi veća, a na drugom manja vrijednosti vibracija od onih na pozicijama *P1* i *P2* paketa.



Slika 5.82 Usporedni prikaz valnih oblika akceleracija za odabrana mjesta u praznom hodu



Slika 5.83 Frekvencijski spektar valnog oblika akceleracije za poziciju P2

Frekvencijski spektar valnog oblika akceleracije za promatranu točku P2, koja se nalazi na obodu paketa statora, sadrži niz istaknutih harmonika (slika 5.83):

- 75; 135; 490; 540; 1465 Hz – uslijed međusobnog odnosa ukruta, nosača kućišta i utora
- 100 Hz – određen protjecanjem osnovnog magnetskog polja
- 200 Hz – određen brojem polova
- 800 Hz – određen međupolnim razmakom
- 600; 700; 1200 i 1400 Hz – harmonici određeni korakom utora
- 1300 Hz – određen prostornim rasporedom faznih zona armaturnog namota
- 3900 Hz – definiran ukupnim brojem utora statora generatora (78 harmonik)
- 1800; 1900; 2000 i 2100 Hz – određeni prvim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 1} = 2 \cdot Q \pm 3^x, \quad x \in [0,1] \quad (5.4)$$

- 3000; 3600; 3800; 4000; 4200 i 4800 Hz – određeni drugim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 2} = 2 \cdot (2 \cdot Q \pm 3^x), \quad x \in [0,1,2] \quad (5.5)$$

- 2500; 3200; 4600 i 5300 Hz – određeni redom utorskih harmonika

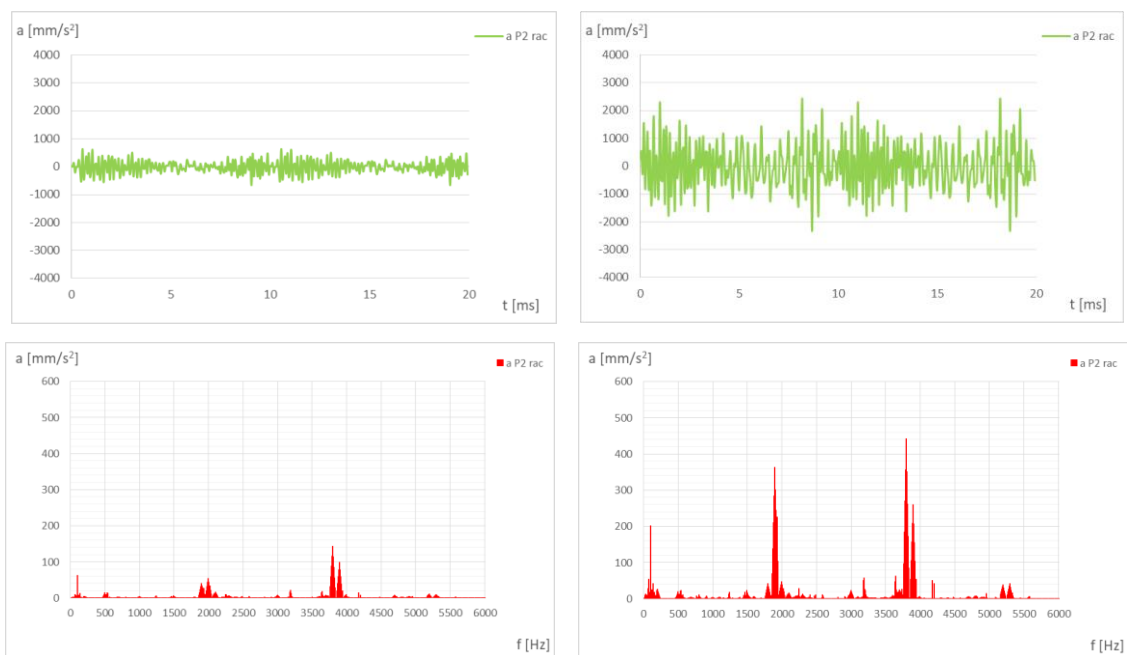
$$h_{u\ 2\_7} = 2 \cdot (2 \cdot Q \pm y \cdot 7), \quad y \in [1,2] \quad (5.6)$$

- 2600 i 5200 Hz – određeni redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 2\_13} = 2 \cdot (2 \cdot Q \pm 13) \quad (5.7)$$

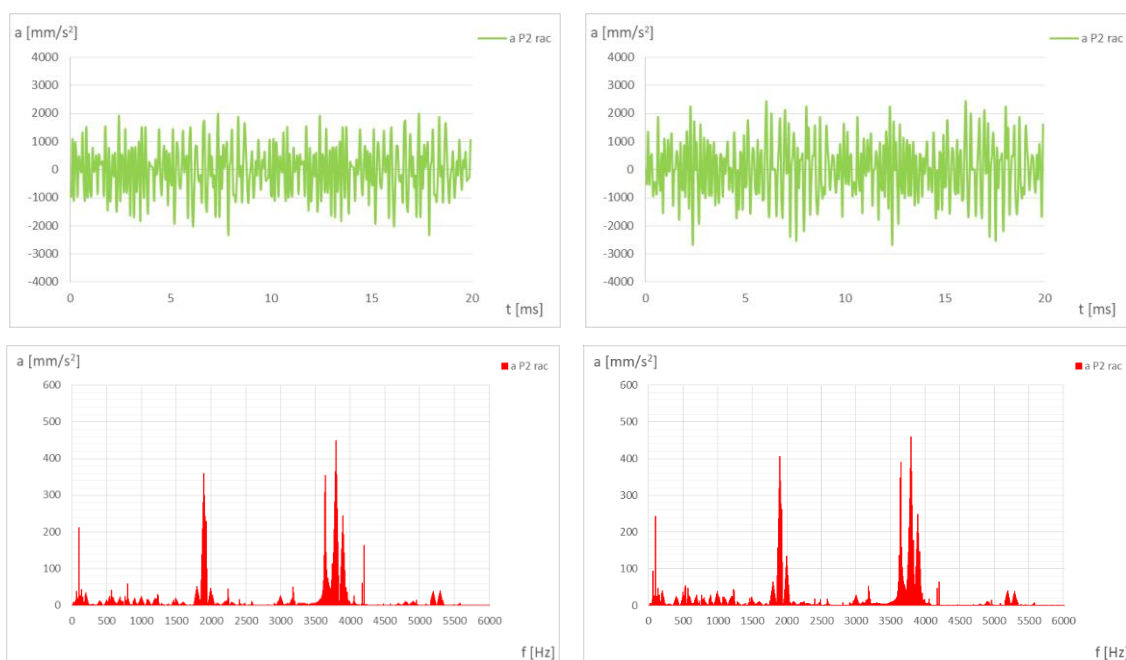
Zanimljivo je primijetiti kako na prikazu amplitude istaknutih harmonika ne iskaču kao diskretne vrijednosti već se amplitude povećanog iznosa zamjećuju i u okolini ovih frekvencija. Ovakvo rješenje rezultat je proračunske metode kojom je omogućen izračun odziva za frekvencijski raspon proizvoljnog koraka, pa se može analizirati odziv i na frekvencijama koje su bliske pobudnoj. U ovom slučaju izračun je proveden uz osnovni korak od 10 Hz, tj. uz pet puta manji korak od osnovnog harmonika frekvencije napona.

Slikom 5.84. usporedno su prikazani valni oblik i frekvencijski spektar akceleracije vibracija na mjestu *P2* za slučajeve praznog hoda s naponima 200 V (lijevo) i 400 V (desno). Manji napon ostvaruje se slabljenjem magnetskog polja rotora. Približno vrijedi linearan odnos između smanjenja magnetskog toka i napona na stezaljkama. Budući da sile ovise o kvadratu gustoće magnetskog toka, dvostruko povećanje napona dovodi do povećanja magnetskih sila od  $\sim 4$  puta. Ovakvo povećanje značajno se odražava i na povećanje vibracija kroz puni spektar frekvencija.



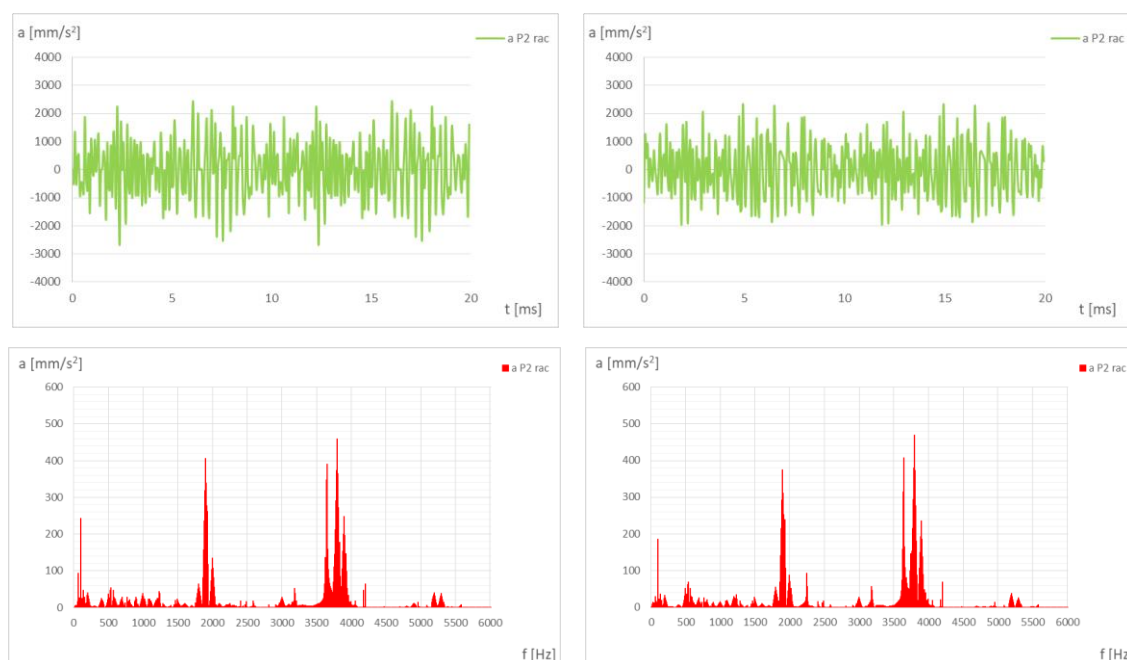
Slika 5.84 Usporedba akceleracije točke *P1* za prazni hod pri naponu 200 V (lijevo) i 400 V (desno)

Usporedni prikaz valnih oblika akceleracija za dva različita opterećenja ( $S = 90$  kVA i  $S = 180$  kVA, uz isti faktor snage  $\cos\varphi = 1$ ) dan je na slici 5.85. Moguće je uočiti kako se veći iznosi amplitude pojavljuju pri većem električnom opterećenju, no i kako ova razlika nije proporcionalna povećanju snage. U spektru frekvencija najveća razlika uočava se kod osnovnog harmonika akceleracije frekvencije 100 Hz i na višim frekvencijama povezanim s utorskim harmonicima.



Slika 5.85 Usporedba akceleracije točke  $P2$  za snagu  $S = 90$  kVA (lijevo) i  $S = 180$  kVA (desno)

Utjecaj promjene faktora snage na valni oblik akceleracije prikazan je slikom 5.86, za iznos prividne električne snage  $S = 180$  kVA, nazivni napon  $U = 400$  V, uz radno ( $\cos\varphi = 1$ ) i izrazito induktivno ( $\cos\varphi = 0,08$ ) opterećenje. Valni oblik kod kojeg vibracije dostižu veće vršne vrijednosti odgovara stanju radnog opterećenja. Istaknuti harmonik frekvencije 100 Hz stoga je veći u tom pogonskom stanju. Zanimljivo je primijetiti da su utorski harmonici oko 3900 Hz nešto veći u slučaju induktivnog tereta.



Slika 5.86 Usporedba akceleracija točke  $P1$  za snagu  $S = 180$  kVA uz faktor snage  $\cos\varphi = 1$  (lijevo) i izrazito induktivni faktor snage  $\cos\varphi = 0,08$  (desno)

Prikazani primjeri ukazuju da se utjecaj promjena pogonskog stanja sinkronog generatora, iako zamjetljiv na različitim harmonicima akceleracija, najjasnije uočava na istaknutom harmoniku frekvencije 100 Hz. Tablicama u nastavku dan je pregled efektivnih vrijednosti valnog oblika i amplituda harmonika akceleracija frekvencije 100 Hz za analizirana pogonska stanja generatora. Prikazani su iznosi akceleracija vibracija za četiri analizirana mjesta na modelu statora generatora i njihove srednje vrijednosti.

Tablica 5.15 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za analizirane četiri lokacije na modelu statora izračunatih za simetrična radna stanja generatora

| Akceleracije vibracija – Amplitude harmonika na 100 Hz |                 |              |                      |  |                                  |                                  |                                         |  |                                  |                                  |                                         |
|--------------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|
|                                                        | Pogonsko stanje |              |                      |  | Mjesta na paketu                 |                                  |                                         |  | Mjesta na kućištu                |                                  |                                         |
| Red.br.                                                | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] |  | $a_{P1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{P2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{Psr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{Ksr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 1.                                                     | 200             | 0            | -                    |  | 32                               | 63                               | 48                                      |  | 17                               | 87                               | 52                                      |
| 2.                                                     | 400             | 0            | -                    |  | 115                              | 201                              | 158                                     |  | 56                               | 278                              | 167                                     |
| 3.                                                     | 400             | 90           | 0,08                 |  | 91                               | 195                              | 143                                     |  | 61                               | 268                              | 165                                     |
| 4.                                                     | 400             | 90           | 0,70                 |  | 100                              | 196                              | 148                                     |  | 55                               | 267                              | 161                                     |
| 5.                                                     | 400             | 90           | 1,00                 |  | 112                              | 212                              | 162                                     |  | 62                               | 287                              | 175                                     |
| 6.                                                     | 400             | 180          | 0,08                 |  | 63                               | 186                              | 125                                     |  | 58                               | 257                              | 158                                     |
| 7.                                                     | 400             | 180          | 0,70                 |  | 92                               | 204                              | 148                                     |  | 71                               | 270                              | 171                                     |
| 8.                                                     | 400             | 180          | 1,00                 |  | 109                              | 243                              | 176                                     |  | 73                               | 329                              | 201                                     |

Tablica 5.16 Efektivne vrijednosti akceleracija za analizirane četiri lokacije na modelu statora izračunatih za simetrična radna stanja generatora

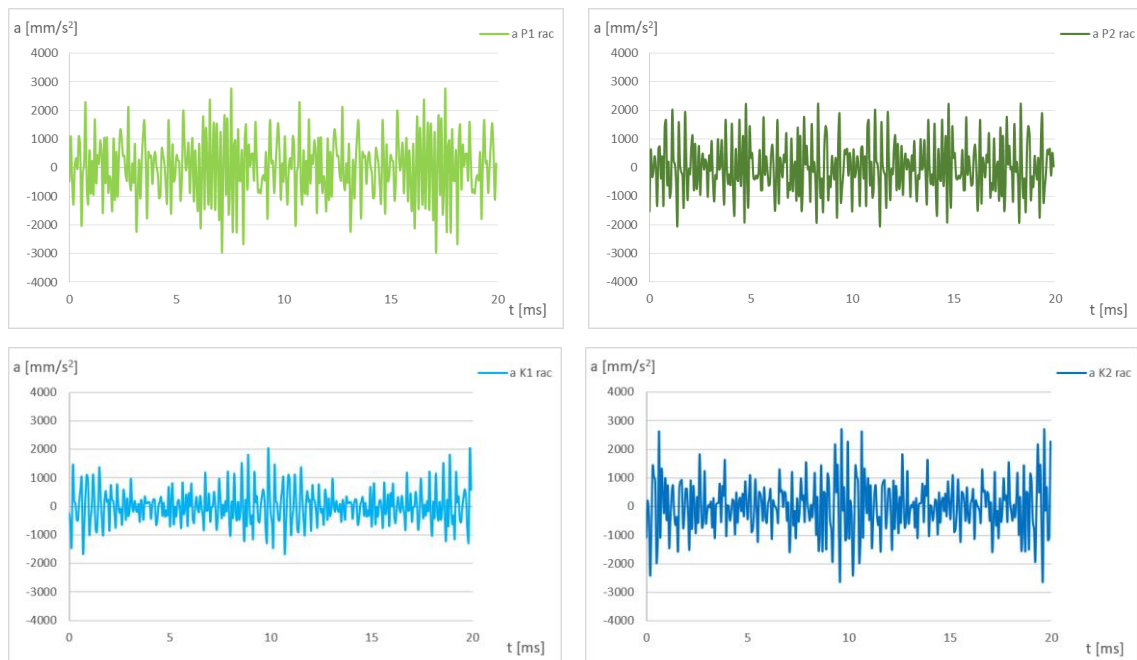
| Akceleracije vibracija - Efektivne vrijednosti |                 |              |                      |  |                                  |                                  |  |                                         |                   |                                  |                                  |  |                                         |
|------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------------|
|                                                | Pogonsko stanje |              |                      |  | Mjesta na paketu                 |                                  |  |                                         | Mjesta na kućištu |                                  |                                  |  |                                         |
| Red.br.                                        | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] |  | $a_{P1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{P2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $\bar{a}_{Psr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |                   | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $\bar{a}_{Ksr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 1.                                             | 200             | 0            | -                    |  | 259                              | 256                              |  | 258                                     |                   | 215                              | 244                              |  | 230                                     |
| 2.                                             | 400             | 0            | -                    |  | 829                              | 865                              |  | 847                                     |                   | 857                              | 814                              |  | 836                                     |
| 3.                                             | 400             | 90           | 0,08                 |  | 918                              | 930                              |  | 924                                     |                   | 878                              | 871                              |  | 875                                     |
| 4.                                             | 400             | 90           | 0,70                 |  | 945                              | 950                              |  | 948                                     |                   | 936                              | 901                              |  | 919                                     |
| 5.                                             | 400             | 90           | 1,00                 |  | 957                              | 957                              |  | 957                                     |                   | 921                              | 908                              |  | 915                                     |
| 6.                                             | 400             | 180          | 0,08                 |  | 1002                             | 980                              |  | 991                                     |                   | 998                              | 958                              |  | 978                                     |
| 7.                                             | 400             | 180          | 0,70                 |  | 986                              | 1042                             |  | 1014                                    |                   | 989                              | 995                              |  | 992                                     |
| 8.                                             | 400             | 180          | 1,00                 |  | 989                              | 1054                             |  | 1022                                    |                   | 974                              | 947                              |  | 961                                     |

Provedenim proračunima za simetrična radna stanja utvrđeno je da:

- vibracije rastu s povećanjem napona;
- vibracije rastu s povećanjem faktora snage;
- vibracije rastu s porastom prividne izlazne snage;
- vibracije pojedinih mjesta paketa i kućišta međusobno se razlikuju;
- vibracije pojedinih mjesta kućišta mogu imati veće i manje iznose od vibracija paketa;
- utorski harmonici u valnom obliku vibracija mogu imati veće amplitude od harmonika na 100 Hz, tj. osnovnog harmonika magnetske sile kojem je frekvencija dvostruko većeg iznosa od frekvencije mreže;
- uslijed značajnih amplituda viših harmonika, ukupna efektivna vrijednost akceleracija značajno je većeg iznosa od efektivne vrijednosti harmonika na 100 Hz;
- amplitude istaknutih viših harmonika rastu s povećanjem snage, no bitno se ne mijenjaju s promjenom faktora snage;
- efektivna vrijednost akceleracije vibracija raste s povećanjem snage;

### 5.6. Rezultati mehaničkih proračuna za nesimetrična radna stanja generatora

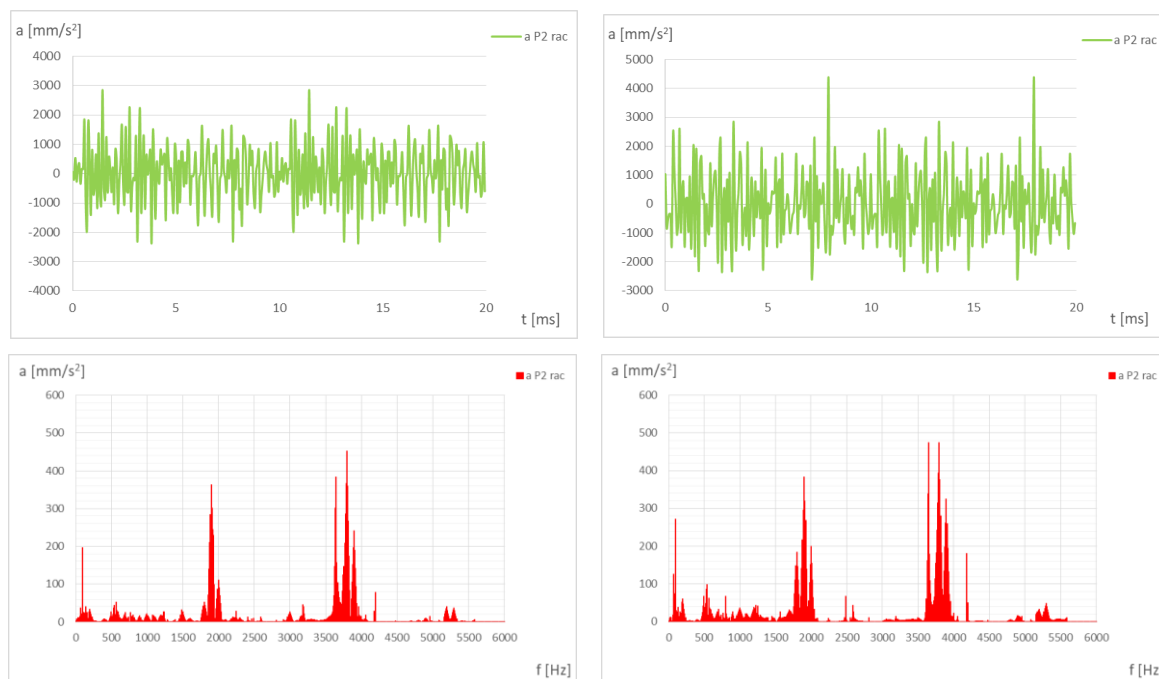
Prilikom nesimetričnog opterećenja, sile koje djeluju na pojedine zube međusobno se razlikuju po amplitudni i valnom obliku (slika 5.40 poglavlja 5.3.1). Stoga se i vibracije duž oboda paketa statora uzrokovane ovakvim silama mogu također međusobno značajno razlikovati. Slikom 5.87 usporedno je prikazan valni oblik vibracija na odabranim lokacijama paketa i kućišta statora, za slučaj nesimetričnog opterećenja  $U = 400 \text{ V}$ ,  $S = 52 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi = 1$ . Najveće vibracije u slučaju nesimetričnih električnih opterećenja bilježe se na obodu paketa. U odnosu na stanja simetričnih opterećenja, uočava se međusobna razlika vibracija na mjestima  $P1$  i  $P2$ . Promatrajući forme vibriranja paketa (slike 5.77 i 5.78) uočavamo kako se lokacije  $P1$  i  $P2$  nalaze na vibracijski različitim pozicijama, pa ista pobudna sila može uzrokovati drugačiji mehanički odziv.



Slika 5.87 Valni oblici akceleracija točaka  $P1$  i  $P2$  paketa i  $K1$  i  $K2$  plašta kućišta statora pri nesimetričnom opterećenju  $U = 400 \text{ V}$ ,  $S = 52 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi = 1$

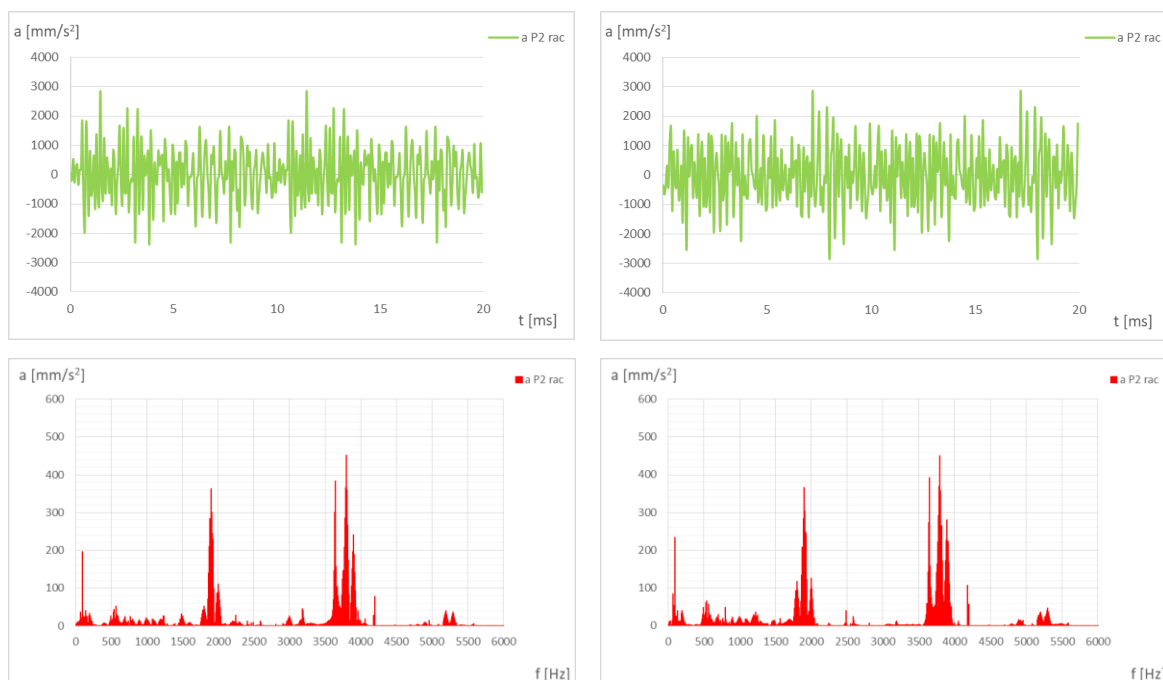
Slikom 5.88 usporedno je prikazan rezultat proračuna vibracija na vanjskom obodu paketa statora (točka  $P2$ ) za simetrično i nesimetrično opterećenje po fazama stroja, uz isti iznos izlazne snage  $S = 90 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi = 0,7$  i napon  $U = 400 \text{ V}$ . Kada stroj radi s nesimetričnim opterećenjem, uz napajanje samo dviju faza, kroz aktivne namote mora teći za  $\sqrt{3}$  puta veća struja nego u slučaju trofaznog simetričnog opterećenja s jednakom izlaznom snagom. Stoga ne začuđuje što se usporedbom valnih oblika i spektra harmonika uočava da su vibracije u slučaju nesimetričnog opterećenja značajno većeg iznosa od onih kod električki simetričnog opterećenja. Vršne vrijednosti valnog oblika akceleracije veće su za  $\sim 60 \%$ , a istaknuti harmonik na  $100 \text{ Hz}$  za  $\sim 40 \%$ .





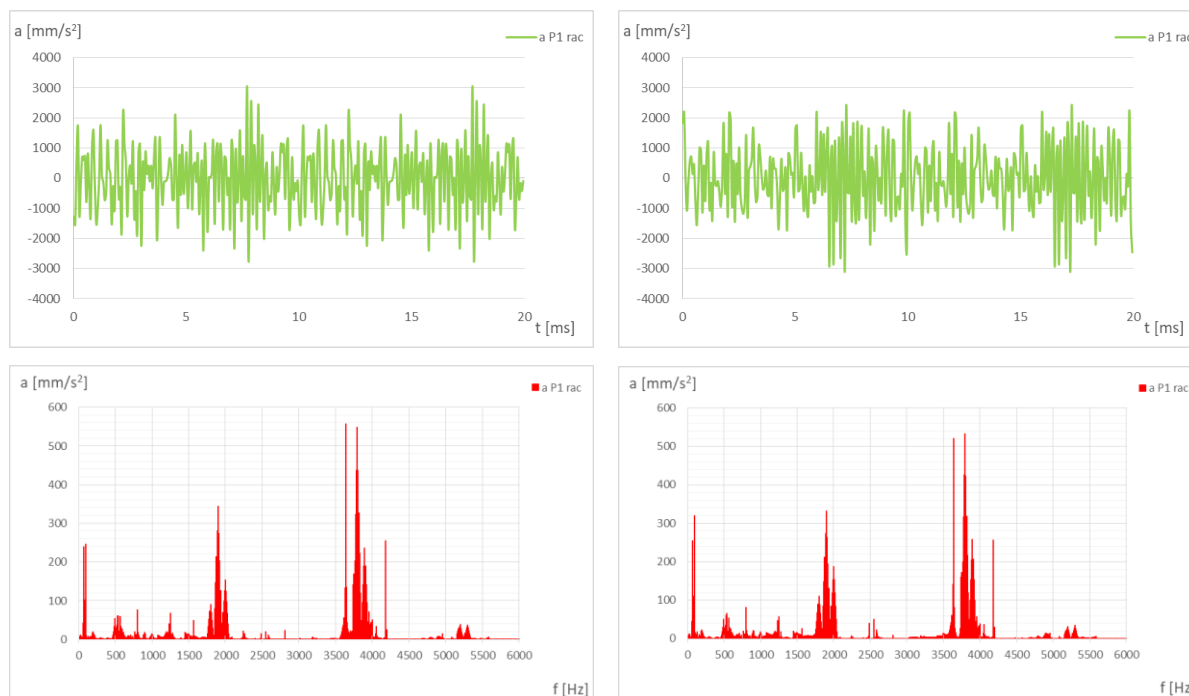
Slika 5.88 Usporedba akceleracija točke  $P2$  za istu izlaznu snagu trofazno (lijevo) i dvofazno (desno) opterećenog generatora pri  $U=400$  V,  $S=90$  kVA,  $\cos\varphi=0,7$

Da bi se pokazalo kako struja većeg iznosa nije jedini razlog većih vibracija, provedena je usporedba odabranog simetričnog stanja ( $U=400$  V,  $S=90$  kVA,  $\cos\varphi=0,7$ ,  $I=130$  A) sa stanjem nesimetričnog opterećenja, kod kojeg kroz dva fazna namota teče struja istog iznosa ( $U=400$  V,  $S=52$  kVA,  $\cos\varphi=0,7$ ,  $I=130$  A).

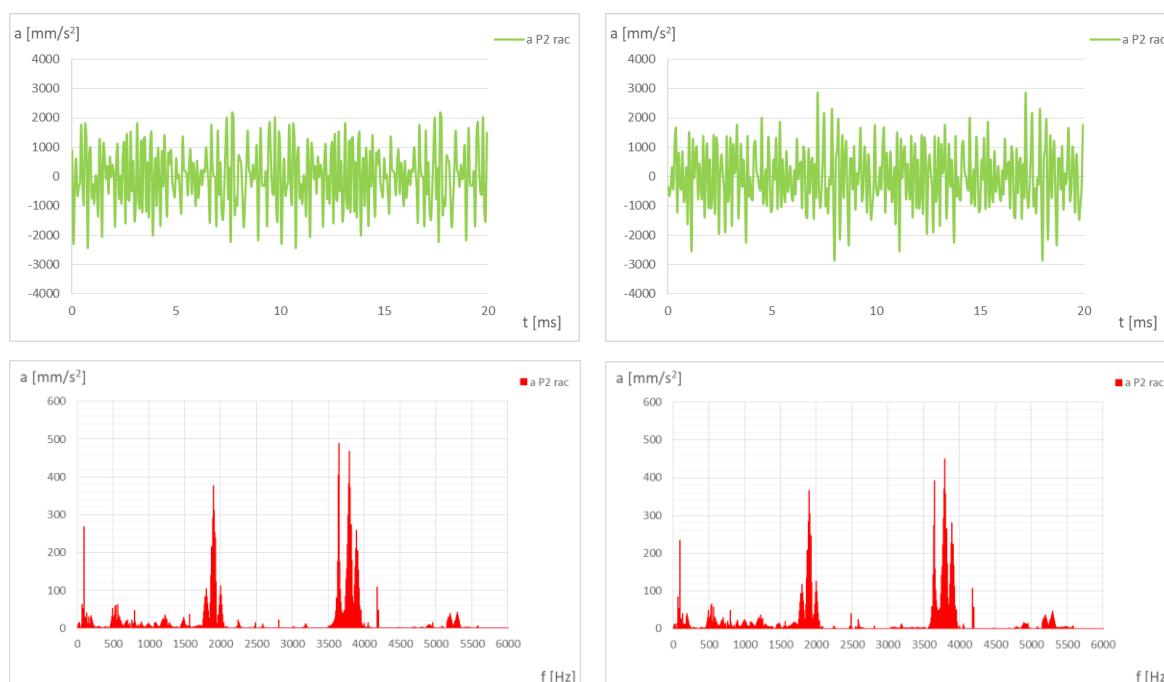


Slika 5.89 Usporedba akceleracija točke  $P2$  uz istu struju armature  $I=130$  A za simetrično (lijevo:  $S=90$  kVA) i nesimetrično (desno:  $S=52$  kVA) opterećenje pri  $U=400$  V,  $\cos\varphi=0,7$

Usporedbom grafova prikazanih slikom 5.89 može se vidjeti kako i u slučaju jednakih struja kroz fazne namote u slučaju magnetske nesimetrije dolazi do većih vibracija nego kod simetričnog stanja. Istaknuti harmonik na 100 Hz je  $\sim 20\%$  većeg iznosa nego kod usporednog simetričnog stanja.



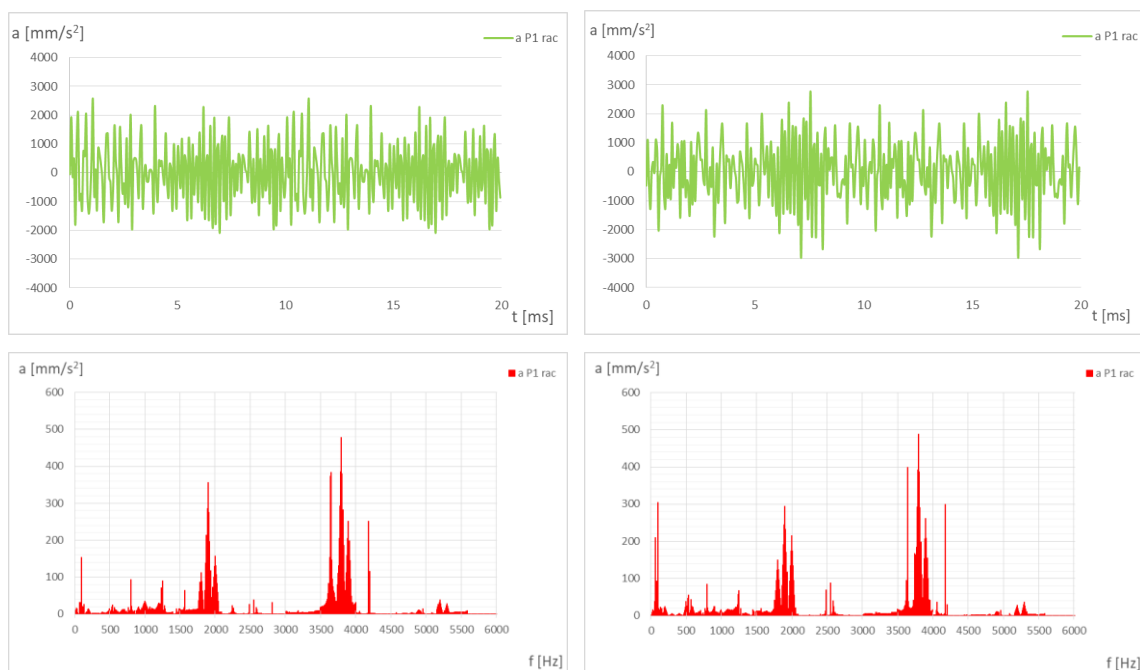
Slika 5.90 Usporedba akceleracija na mjestu  $P1$  za nesimetrično opterećenje uz faktor snage  $\cos\varphi=0,08$  (lijevo) i  $\cos\varphi=0,7$  (desno) pri  $U=400\text{ V}$ ,  $S=52\text{ kVA}$



Slika 5.91 Usporedba akceleracija na mjestu  $P2$  za nesimetrično opterećenje uz faktor snage  $\cos\varphi=0,08$  (lijevo) i  $\cos\varphi=0,7$  (desno) pri  $U=400\text{ V}$ ,  $S=52\text{ kVA}$

Utjecaj promjene faktora snage na vibracije pri istoj prividnoj snazi  $S = 52$  kVA prikazan je za lokaciju  $P1$  (slika 5.90) i  $P2$  (slika 5.91). Moguće je uočiti kako na pozicijama  $P1$  i  $P2$  povećanje faktora snage ima obrnuti efekt. Dok na lokaciji  $P1$  povećanje faktora snage dovodi do povećanja vibracija kao i u slučaju simetričnog opterećenja, na lokaciji  $P2$ , gdje se bilježe manje sile, dolazi do pada vibracija s povećanjem faktora snage. Ovo je posljedica razlike vibracijskog odziva (forme vibriranja) na pozicijama  $P1$  i  $P2$  te ovisnosti pozicije zuba izloženog najvećim radijalnim silama o iznosu faktora snage  $\cos\varphi$ , koja je prikazana u poglavlju 5.3.4.

Analizom nesimetričnih opterećenja prikazanom kroz točku 5.3.3. uočeno je kako pozicija zuba na koji djeluje sila maksimalnog iznosa ovisi o tome koja su dva fazna namota stroja protjecana strujom. Da bi se utvrdilo ima li ova razlika utjecaj i na vibracije, provedena je računska usporedba za dva slučaja isključenja faza, pri radnom opterećenju  $S = 52$  kVA,  $\cos\varphi = 1$ ,  $U = 400$  V. Na lijevoj strani slike 5.92 prikazan je slučaj vibracija kod kojeg je na poziciji senzora  $P1$  zabilježena sila manjih amplituda (faze  $A-C$  protjecane strujom), a s desne strane prikazan je slučaj na istom mjestu zabilježene radijalne sile većeg iznosa (faze  $B-C$  protjecane strujom). Usporedba pokazuje kako se vibracije pojedinog mjesta na paketu mogu za pojedine harmonike razlikovati do dva puta, ovisno o rasporedu pobudnih sila po obodu stroja.



Slika 5.92 Usporedba akceleracija na mjestu  $P1$  za opterećenje faza  $A-C$  (lijevo) i  $B-C$  (desno) pri opterećenju  $U = 400$  V,  $S = 52$  kVA,  $\cos\varphi = 1$

Tablicama u nastavku dan je pregled efektivnih iznosa ukupnog valnog oblika i amplituda istaknutog harmonika akceleracija na 100 Hz za analizirana radna stanja generatora. Prikazani su iznosi amplituda i efektivnih vrijednosti akceleracije vibracija za četiri analizirana mjesta na modelu statora generatora i njihove srednje vrijednosti.

Tablica 5.17 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za četiri analizirane lokacije na modelu statora izračunate za nesimetrična radna stanja generatora

| Akceleracije – Amplitude harmonika na 100 Hz |                 |              |                      |              |  |                                  |                                  |                                           |  |                                  |                                  |                                           |
|----------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
|                                              | Pogonsko stanje |              |                      |              |  | Mjesta na paketu                 |                                  |                                           |  | Mjesta na kućištu                |                                  |                                           |
| Red.br.                                      | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | Akt.<br>faze |  | $a_{P1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{P2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{P\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{K\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 1.                                           | 400             | 52           | 0,08                 | $B-C$        |  | 247                              | 268                              | 258                                       |  | 35                               | 402                              | 219                                       |
| 2.                                           | 400             | 52           | 0,70                 | $B-C$        |  | 321                              | 234                              | 278                                       |  | 44                               | 335                              | 190                                       |
| 3.                                           | 400             | 52           | 1,00                 | $B-C$        |  | 304                              | 160                              | 232                                       |  | 47                               | 208                              | 128                                       |
| 4.                                           | 400             | 52           | 1,00                 | $A-C$        |  | 153                              | 229                              | 191                                       |  | 91                               | 334                              | 213                                       |
| 5.                                           | 400             | 52           | 1,00                 | $A-B$        |  | 217                              | 298                              | 258                                       |  | 55                               | 446                              | 251                                       |
| 6.                                           | 400             | 90           | 0,7                  | $B-C$        |  | 484                              | 273                              | 379                                       |  | 26                               | 417                              | 222                                       |
| 7.                                           | 400             | 104          | 0,08                 | $B-C$        |  | 502                              | 360                              | 431                                       |  | 22                               | 454                              | 238                                       |
| 8.                                           | 400             | 104          | 0,70                 | $B-C$        |  | 549                              | 292                              | 421                                       |  | 22                               | 454                              | 238                                       |
| 9.                                           | 400             | 104          | 1,00                 | $B-C$        |  | 548                              | 253                              | 401                                       |  | 60                               | 230                              | 145                                       |
| 10.                                          | 400             | 104          | 1,00                 | $A-B$        |  | 424                              | 339                              | 382                                       |  | 63                               | 607                              | 304                                       |

Tablica 5.18 Efektivne vrijednosti akceleracija za četiri analizirane lokacije na modelu statora, izračunate za nesimetrična radna stanja generatora

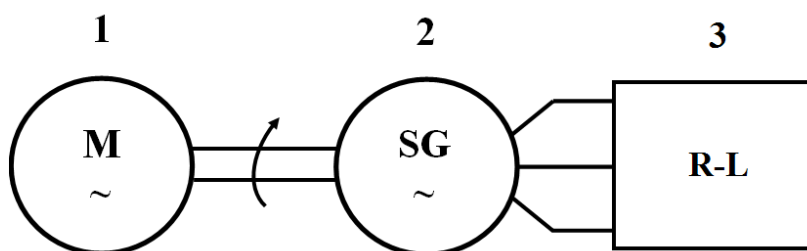
| Akceleracije – Efektivne vrijednosti |                 |              |                      |              |  |                                  |                                  |                                           |  |                                  |                                  |                                           |
|--------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
|                                      | Pogonsko stanje |              |                      |              |  | Mjesta na paketu                 |                                  |                                           |  | Mjesta na kućištu                |                                  |                                           |
| Red.br.                              | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | Akt.<br>faze |  | $a_{P1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{P2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{P\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\bar{a}_{K\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 1.                                   | 400             | 52           | 0,08                 | $B-C$        |  | 1076                             | 1037                             | 1057                                      |  | 1042                             | 987                              | 1015                                      |
| 2.                                   | 400             | 52           | 0,70                 | $B-C$        |  | 1145                             | 1053                             | 1099                                      |  | 1095                             | 979                              | 1037                                      |
| 3.                                   | 400             | 52           | 1,00                 | $B-C$        |  | 1057                             | 1136                             | 1097                                      |  | 1017                             | 1091                             | 1054                                      |
| 4.                                   | 400             | 52           | 1,00                 | $A-C$        |  | 1086                             | 924                              | 1005                                      |  | 1022                             | 908                              | 965                                       |
| 5.                                   | 400             | 52           | 1,00                 | $A-B$        |  | 1011                             | 1057                             | 1034                                      |  | 918                              | 973                              | 946                                       |
| 6.                                   | 400             | 90           | 0,7                  | $B-C$        |  | 1233                             | 1182                             | 1208                                      |  | 1330                             | 1106                             | 1218                                      |
| 7.                                   | 400             | 104          | 0,08                 | $B-C$        |  | 1546                             | 1291                             | 1419                                      |  | 1350                             | 1153                             | 1252                                      |
| 8.                                   | 400             | 104          | 0,70                 | $B-C$        |  | 1377                             | 1285                             | 1331                                      |  | 1444                             | 1175                             | 1310                                      |
| 9.                                   | 400             | 104          | 1,00                 | $B-C$        |  | 1349                             | 1340                             | 1345                                      |  | 1137                             | 1279                             | 1208                                      |
| 10.                                  | 400             | 104          | 1,00                 | $A-B$        |  | 1327                             | 1346                             | 1337                                      |  | 1136                             | 1279                             | 1208                                      |

Provedenim proračunima za nesimetrična pogonska stanja utvrđeno je da:

- vibracije rastu s porastom prividne izlazne snage u širem rasponu nego kod simetričnih opterećenja;
- vibracije se mijenjaju s promjenom faktora snage u širem rasponu nego kod simetričnih opterećenja;
- vibracije pojedinog mjesta na obodu stroja ovise o rasporedu namota tj. o aktivnim fazama namota;
- vibracije pojedinih mjesta paketa i kućišta međusobno se razlikuju u širem rasponu nego kod simetričnih opterećenja;
- vibracije pojedinih mjesta paketa mogu imati veće iznose od vibracija kućišta;
- harmonik vibracija na frekvenciji 100 Hz značajno se mijenja s promjenom opterećenja;
- iznos harmonika vibracija na frekvenciji 100 Hz korelira s iznosom maksimalne sile pri nesimetričnom opterećenju (koja se po obodu stroja pojavljuje dva puta po paru polova) ;
- u odnosu na simetrično opterećenje iste snage, amplitude istaknutih viših harmonika akceleracije vibracija veće su kod nesimetričnog opterećenja po fazama;
- efektivna vrijednost akceleracije vibracija raste s povećanjem nesimetrije opterećenja.

## 6. Rezultati mjerenja na generatoru

U ovom poglavlju prikazani su rezultati mjerenja na sinkronom generatoru tipske oznake 2S 783-04. Mjerenja su provedena s ciljem potvrde postavljenih teza i rezultata dobivenih proračunom. Na slici 6.1 prikazana je principijelna shema spoja ispitnog okruženja u kojem je provedeno ispitivanje sinkronog generatora. Kao izvor radne snage (pogonski motor) korišten je trofazni sinkroni stroj istih kataloških podataka kao i ispitivani generator. Pomoću regulatora broja okretaja pogonskog motora osigurana je konstantna brzina vrtnje od 1500 o/min, tj. frekvencija osnovnog harmonika napona sinkronog generatora od 50 Hz, neovisno o ispitivanom pogonskom stanju.



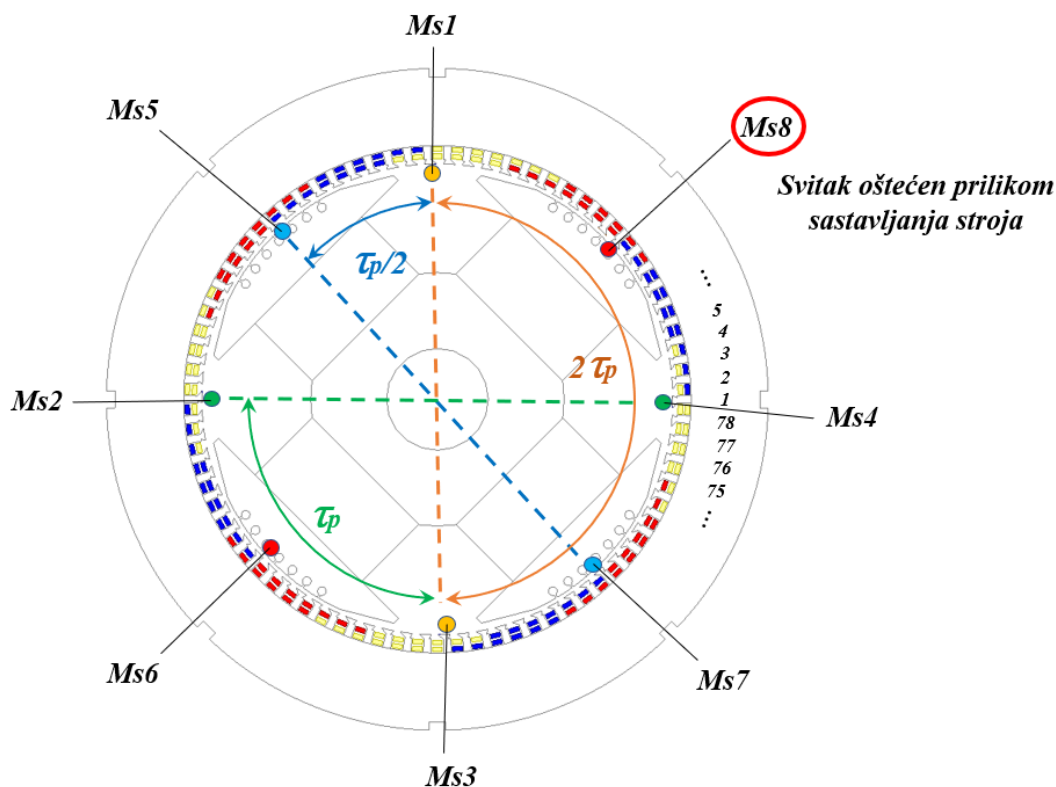
Slika 6.1 Principijelna shema spoja: 1 – pogonski motor, 2 – ispitivani objekt (sinkroni generator), 3 – pasivni teret (kaskada otpornika i regulacijska prigušnica)

Na radijalnu plohu zuba statora ugrađeno je ukupno 8 mjernih svitaka, jednoliko raspodijeljenih duž oboda (slika 6.2). Prilikom montaže generatora (umetanja rotora u stator) došlo je do oštećenja jednog svitka, no redundancija postignuta ugradnjom većeg broja svitaka od minimalno potrebnog za provjeru proračunskih rezultata omogućila je provedbu mjerenja bez potrebe za dodatnim remontom.



Slika 6.2 Mjerni svitci ugrađeni na zube generatora

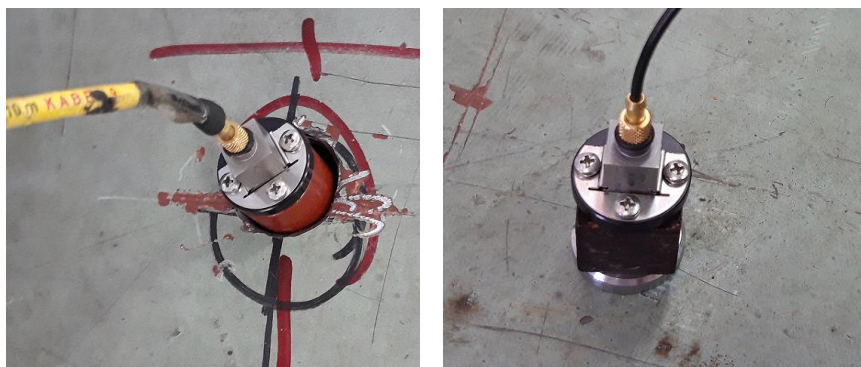
Slika 6.3 prikazuje raspored i međusobni položaj ugrađenih svitaka u zračni raspor stroja. Svitci na slici 6.3 označeni istom bojom međusobno su dijametralno udaljeni i razmaknuti za dva polna koraka ( $2 \cdot \tau_p$ ). Postavljanje svitaka na razmak koji odgovara točno polnom koraku ( $\tau_p$ ) i točno polovici polnog koraka ( $\frac{1}{2} \tau_p$ ) nije bilo moguće izvesti zbog razlomljenog broja utora po polu ( $Q = 19,5$ ). Stoga su parovi susjednih svitaka međusobno udaljeni za korak blizak polovici polnog koraka ( $\sim \frac{1}{2} \tau_p$ ) tj. postavljeni na zube čija se lokacija najbolje podudarala s razmakom od pola polnog koraka. Mjerni svitak oštećen prilikom sastavljanja stroja nosi oznaku *Ms8* i dodatno je naznačen na slici 6.3.



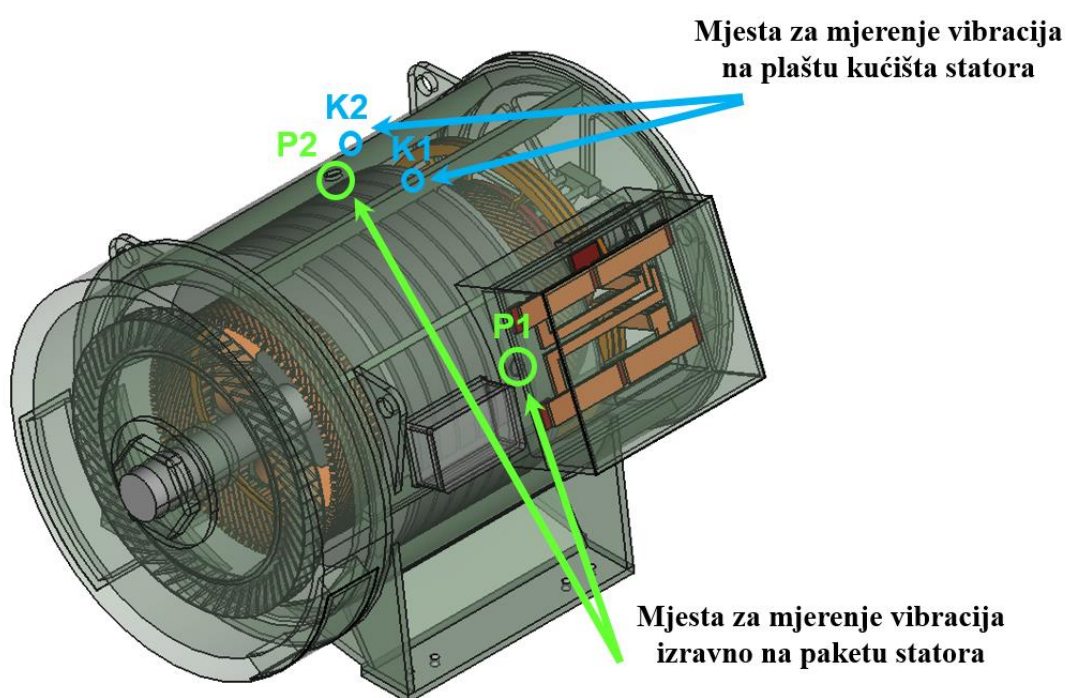
Slika 6.3 Mjesta ugradnje i oznake mjernih svitaka – pogled s pogonske strane stroja

Akcelerometri su pričvršćeni na paket statora upotrebom produljenih nosača s magnetnom bazom, umetnutih kroz prethodno probušene rupe na plaštu kućišta (slika 6.4 lijevo). Akcelerometri za provjeru vibracija kućišta montirani su na vanjski obod njegovog plašta, upotrebom nosača s magnetnom bazom standardne izvedbe (slika 6.4 desno). Pozicije smještaja akcelerometara po stroju prikazane su slikom 6.5. Pomoću oklopljenih spojnih kabela, izvodi ugrađenih svitaka i akcelerometara spojeni su na ulaze mjerne akvizicijske stanice. Mjerenja su provedena u praznom hodu i za različita opterećenja. Radi verifikacije proračuna, mjerenja su provedena za odabrane primjere simetričnih i nesimetričnih opterećenja.

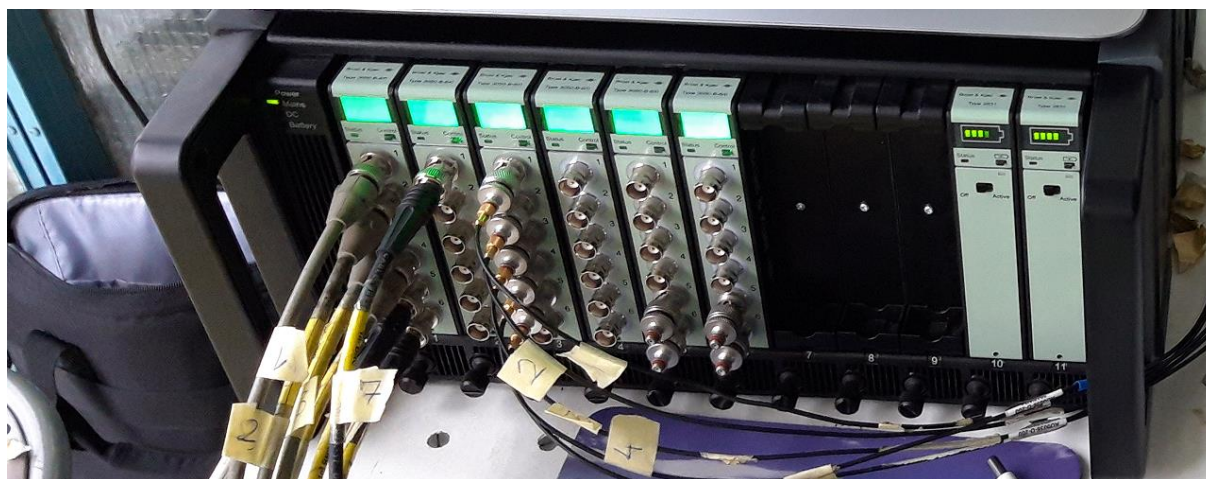




Slika 6.4 Akcelerometri spojeni na paket statora pomoću produljenog nosača kroz probušenu rupu plašta kućišta (lijevo) i na plašt kućišta upotrebom standardnog nosača (desno)



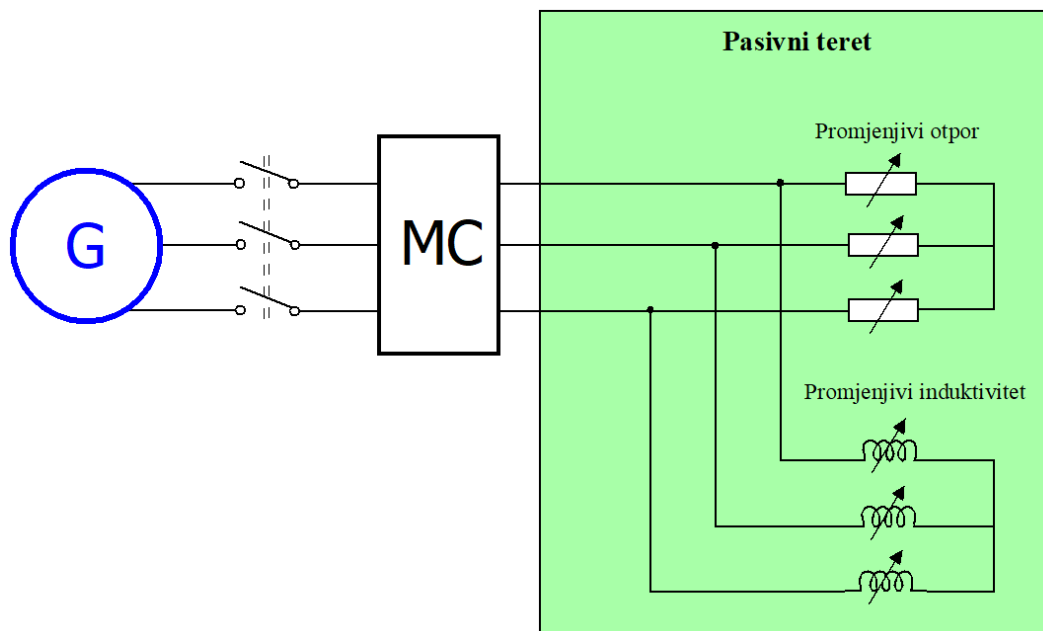
Slika 6.5 Pozicije i oznake senzora za mjerenje vibracija



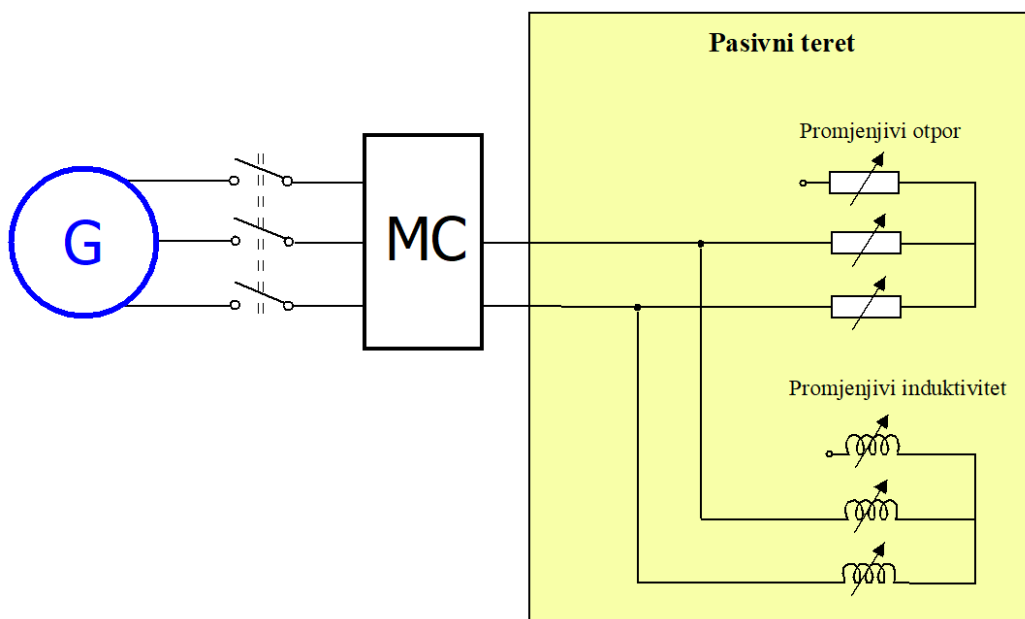
Slika 6.6 Izvodi senzora spojeni na mjernu akvizicijsku stanicu



Slikom 6.7 prikazana je shema spoja pasivnog tereta na generator u slučaju rada sa simetričnim trofaznim teretom, a slikom 6.8 shema za slučaj rada s dvije aktivne faze. Naponi i struje na izlazu iz generatora provjeravani su pomoću mjerne centrale *NORMA AC Power Analyzer D 5255 S*. Tablicama 6.1 i 6.2 prikazana su mjerenja pogonska stanja s odgovarajućim iznosima struja te otpora i induktiviteta tereta. Sklopka između generatora i tereta omogućila je potpuno odspajanje pojedine faze tereta (ostvarenje različitih uvjeta nesimetričnog opterećenja), bez da se cijeli pogon zaustavlja.



Slika 6.7 Spoj pasivnog tereta na stezaljke generatora za simetrično opterećenje



Slika 6.8 Spoj pasivnog tereta na stezaljke generatora za nesimetrično opterećenje

Tablica 6.1 Parametri pasivnog tereta i struje kroz otpornik  $I_R$  i prigušnicu  $I_L$   
za analizirana simetrična pogonska stanja generatora

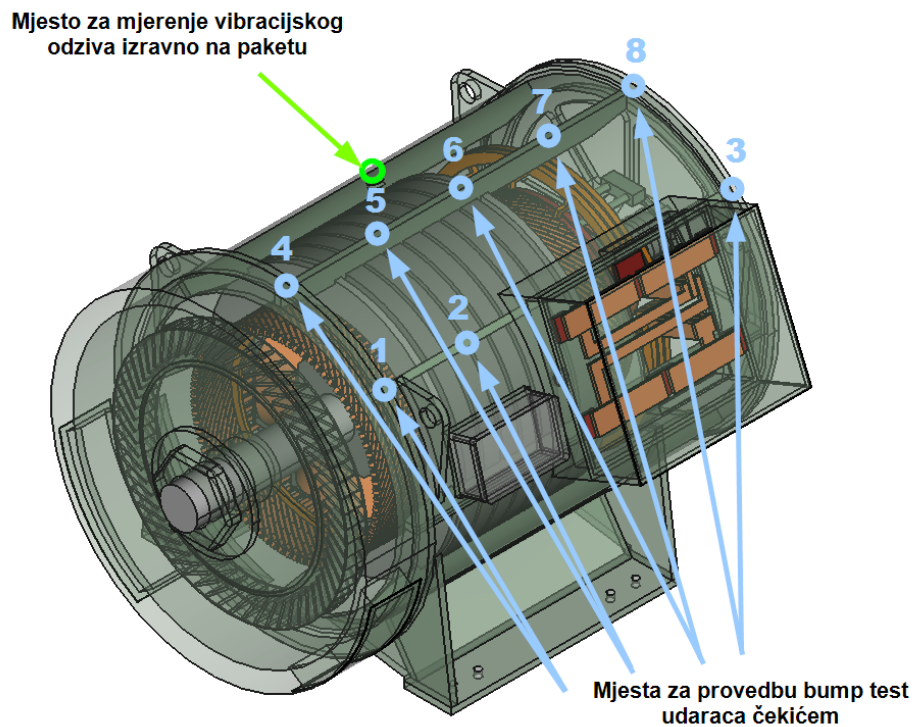
| Red br. | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $P$<br>[kW] | $Q$<br>[kVAr] | $I$<br>[A] | $I_R$<br>[A] | $I_L$<br>[A] | $R_{R(C)}$<br>[Ω] | $R_{S(B)}$<br>[Ω] | $R_{T(A)}$<br>[Ω] | $L_{R(C)}$<br>[mH] | $L_{S(B)}$<br>[mH] | $L_{T(A)}$<br>[mH] |
|---------|--------------|----------------------|-------------|---------------|------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1.      | 90           | 1,0                  | 90          | 0             | 130        | 130          | 0            | 1,770             | 1,770             | 1,770             | -                  | -                  | -                  |
| 2.      | 90           | 0,7                  | 63          | 64            | 130        | 91           | 93           | 2,527             | 2,527             | 2,527             | 7,872              | 7,872              | 7,872              |
| 3.      | 90           | 0                    | 70          | 90            | 130        | 0            | 130          | -                 | -                 | -                 | 5,632              | 5,632              | 5,632              |
| 4.      | 180          | 1,0                  | 180         | 0             | 260        | 260          | 0            | 0,885             | 0,885             | 0,885             | -                  | -                  | -                  |
| 5.      | 180          | 0,7                  | 126         | 128           | 260        | 182          | 186          | 1,263             | 1,263             | 1,263             | 3,936              | 3,936              | 3,936              |
| 6.      | 180          | 0                    | 0           | 180           | 260        | 0            | 260          | -                 | -                 | -                 | 2,816              | 2,816              | 2,816              |

Tablica 6.2 Parametri pasivnog tereta i struje kroz otpornik  $I_R$  i prigušnicu  $I_L$   
za analizirana nesimetrična pogonska stanja generatora

| Red. br. | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $P$<br>[kW] | $Q$<br>[kVAr] | $I$<br>[A] | $I_R$<br>[A] | $I_L$<br>[A] | $R_{R(C)}$<br>[Ω] | $R_{S(B)}$<br>[Ω] | $R_{T(A)}$<br>[Ω] | $L_{R(C)}$<br>[mH] | $L_{S(B)}$<br>[mH] | $L_{T(A)}$<br>[mH] |
|----------|--------------|----------------------|-------------|---------------|------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1        | 52           | 1,0                  | 52          | 0             | 130        | 130          | 0            | 1,538             | 1,538             | -                 | -                  | -                  | -                  |
| 2        | 52           | 1,0                  | 52          | 0             | 130        | 130          | 0            | -                 | 1,538             | 1,538             | -                  | -                  | -                  |
| 3        | 52           | 1,0                  | 52          | 0             | 130        | 130          | 0            | 1,538             | -                 | 1,538             | -                  | -                  | -                  |
| 4        | 52           | 0,7                  | 36,4        | 37,1          | 130        | 91           | 93           | 2,198             | 2,198             | -                 | 6,845              | 6,845              | -                  |
| 5        | 52           | 0,0                  | 0           | 52            | 130        | 0            | 130          | -                 | -                 | -                 | 4,897              | 4,897              | -                  |
| 6        | 90           | 0,7                  | 63          | 64            | 225        | 158          | 161          | 1,266             | 1,266             | -                 | 3,954              | 3,954              | -                  |
| 7        | 104          | 1,0                  | 104         | 0             | 260        | 260          | 0            | 0,769             | 0,769             | -                 | -                  | -                  | -                  |
| 8        | 104          | 1,0                  | 104         | 0             | 260        | 260          | 0            | -                 | 0,769             | 0,769             | -                  | -                  | -                  |
| 9        | 104          | 0,7                  | 73          | 74            | 260        | 182          | 186          | 1,099             | 1,099             | -                 | 3,423              | 3,423              | -                  |
| 10       | 104          | 0,0                  | 0           | 104           | 260        | 0            | 260          | -                 | -                 | -                 | 2,449              | 2,449              | -                  |

### 6.1. Mjerenje vlastitih frekvencija

Prije glavnih ispitivanja provedeno je mjerenje frekvencijskog odziva generatora na impuls mehaničke pobude (tzv. *Bump test*) u svrhu određivanja vlastitih frekvencija generatora. Odziv je mjeren akcelometrom postavljenim na vanjski obod paketa, za 8 udarnih lokacija raspoređenih po kućištu statora na način prikazan slikom 6.9.

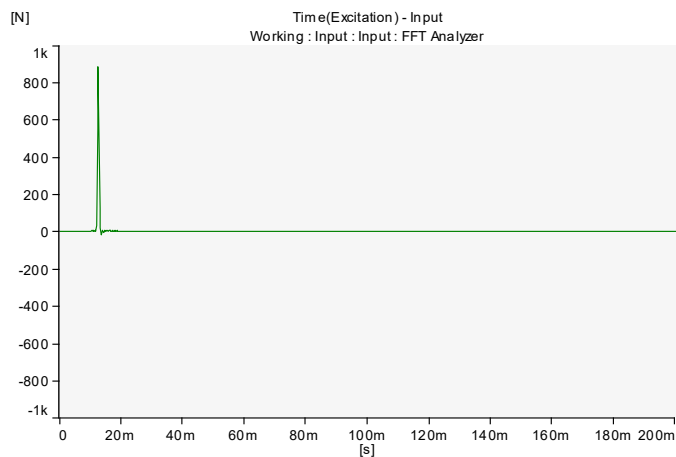


Slika 6.9 Izvodi senzora spojeni na mjernu akvizicijsku stanicu

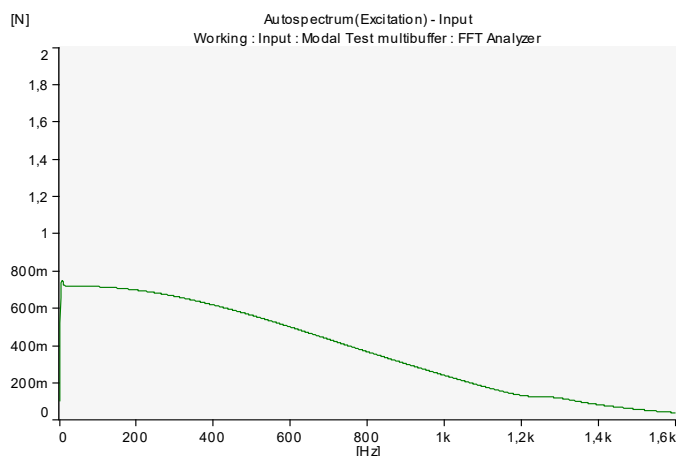


Slika 6.10 Stvaranje mehaničkog pobudnog impulsa udarcem čekića o kućište statora

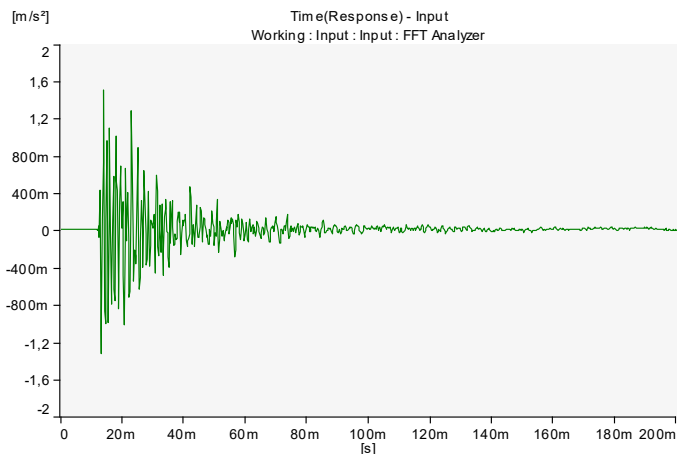
Na svakoj lokaciji provedena su po tri mjerenja (tri udarca čekićem) za koja je snimljen vibracijski odziv paketa. Slikom 6.11 prikazan je impuls sile nastao kao posljedica udarca čekićem, a slikom 6.12 spektar frekvencija za koji se udarcem čekića može odrediti valjani odziv kućišta. Vremenski odziv paketa na udarac čekićem prikazan je slikom 6.13.



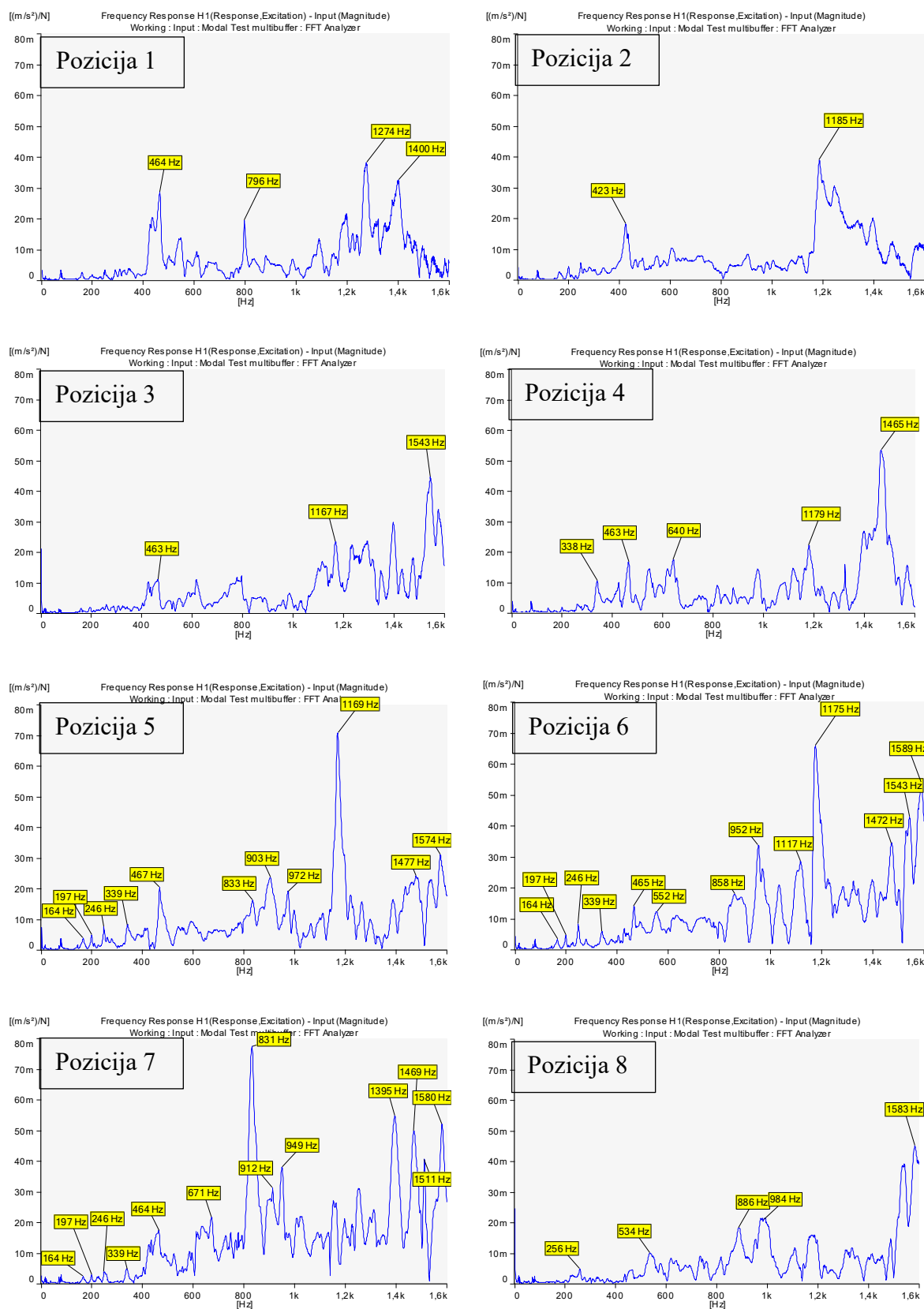
Slika 6.11 Impuls sile kod udarca čekićem



Slika 6.12 Spektar frekvencija obuhvaćen udarcem čekića



Slika 6.13 Vremenski odziv paketa na udarac čekićem



Slika 6.14 Snimljeni odzivi za udarce čekića na osam analiziranih lokacija

Slikom 6.14 usporedno su prikazani vibracijski odzivi kućišta u frekvencijskoj domeni za svih osam analiziranih lokacija, uz naznačene iznose frekvencija najizraženijih harmonika. Moguće je vidjeti kako se odziv na pobudu aksijalnih krajeva (točke 1, 3, 4 i 8) značajno razlikuje od odziva na pobudu centralnog dijela stroja (točke 5, 6 i 7). Također se može vidjeti kako se istaknuti harmonici točaka 5, 6 i 7 centralne zone prilično dobro međusobno poklapaju. Budući da se vibracije mjere u centralnoj zoni stroja za koju je proveden i proračun, potpuniji popis frekvencija istaknutih harmonika za pozicije mjerenja 5, 6 i 7 prikazan je zasebno u tablici 6.3.

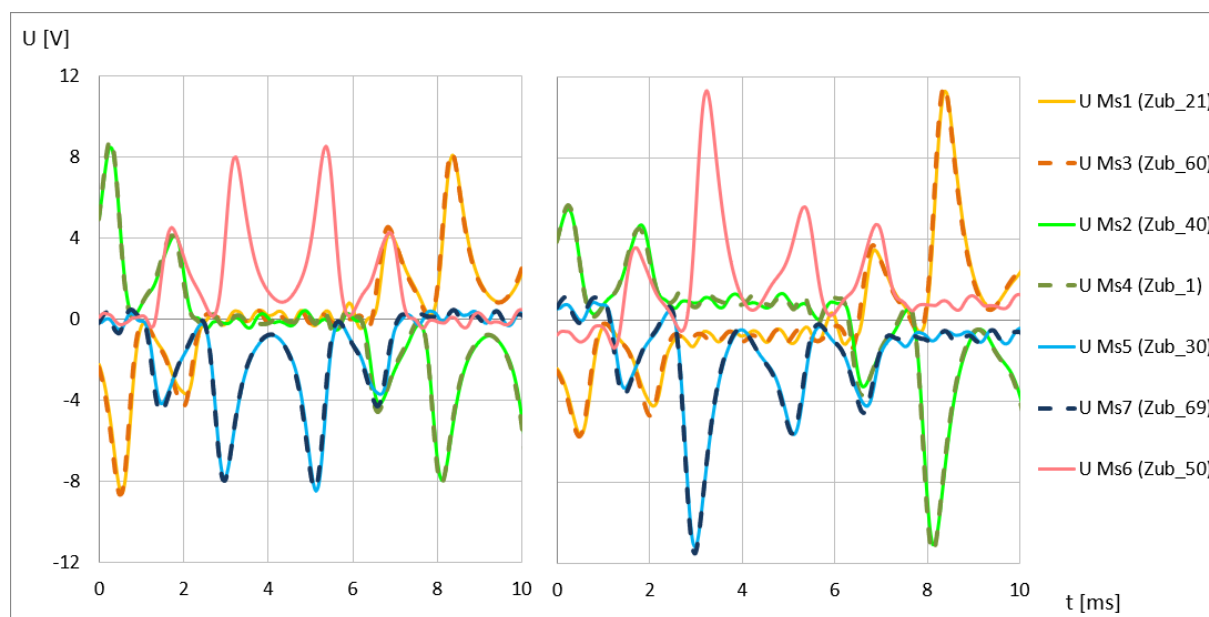
Tablica 6.3 Izmjerene vlastite frekvencije za centralni dio stroja

|                      | $f_{vl}$ [Hz] |            |  |            |  |            |  |                       |
|----------------------|---------------|------------|--|------------|--|------------|--|-----------------------|
| Red.br.<br>harmonika |               | Točka<br>5 |  | Točka<br>6 |  | Točka<br>7 |  | Srednja<br>vrijednost |
| 1                    |               | 77         |  | 78         |  | 77         |  | 77                    |
| 2                    |               | 164        |  | 164        |  | 164        |  | 164                   |
| 3                    |               | 197        |  | 197        |  | 197        |  | 197                   |
| 4                    |               | 246        |  | 246        |  | 246        |  | 246                   |
| 5                    |               | 339        |  | 339        |  | 339        |  | 339                   |
| 6                    |               | 467        |  | 465        |  | 464        |  | 465                   |
| 7                    |               | 558        |  | 552        |  | 525        |  | 545                   |
| 8                    |               | 592        |  | 617        |  | 594        |  | 601                   |
| 9                    |               | 690        |  | 706        |  | 671        |  | 689                   |
| 10                   |               | 752        |  | 759        |  | 748        |  | 753                   |
| 11                   |               | 833        |  | 858        |  | 831        |  | 841                   |
| 12                   |               | 903        |  | 887        |  | 912        |  | 901                   |
| 13                   |               | 956        |  | 952        |  | 949        |  | 952                   |
| 14                   |               | 972        |  | 969        |  | 978        |  | 973                   |
| 15                   |               | 1031       |  | 1031       |  | 1026       |  | 1029                  |
| 16                   |               | 1110       |  | 1117       |  | 1131       |  | 1119                  |
| 17                   |               | 1169       |  | 1175       |  | 1161       |  | 1168                  |
| 18                   |               | 1220       |  | 1223       |  | 1228       |  | 1224                  |
| 19                   |               | 1262       |  | 1251       |  | 1252       |  | 1255                  |
| 20                   |               | 1296       |  | 1283       |  | 1296       |  | 1292                  |
| 21                   |               | 1386       |  | 1398       |  | 1395       |  | 1393                  |
| 22                   |               | 1477       |  | 1472       |  | 1469       |  | 1473                  |
| 23                   |               | 1535       |  | 1543       |  | 1511       |  | 1530                  |
| 24                   |               | 1574       |  | 1589       |  | 1580       |  | 1581                  |

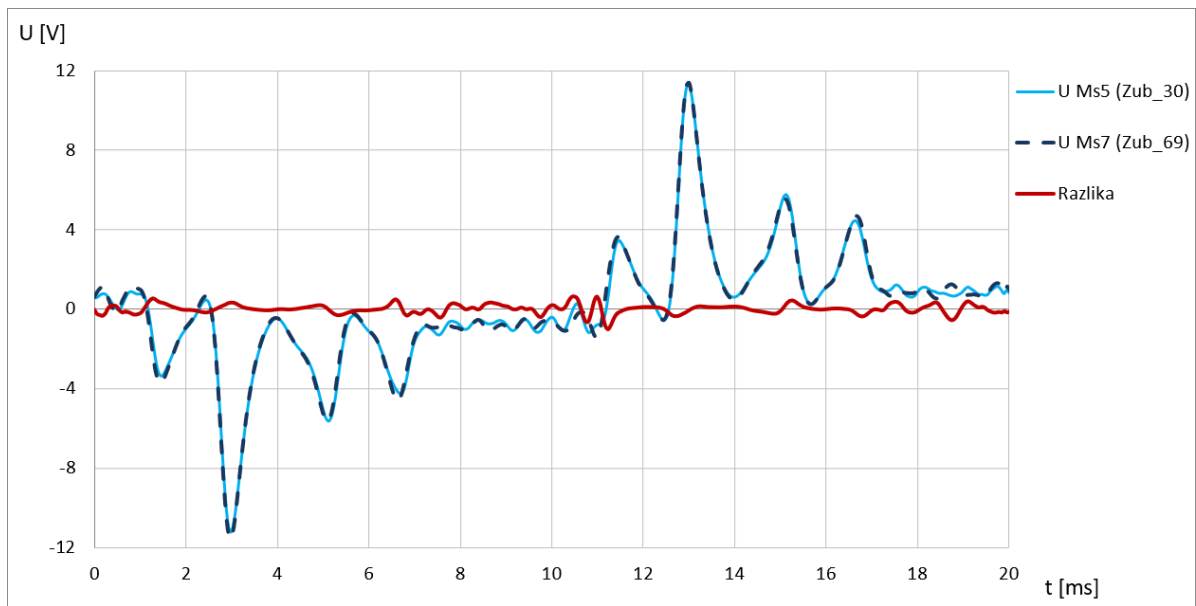
## 6.2. Mjerenje električnih veličina za simetrična opterećenja

Nakon ispitivanja vlastitih frekvencija statora, provedena su mjerenja za prazni hod i simetrična opterećenja generatora. Tijekom mjerenja neprekidno su promatrani valni oblici induciranih napona u mjernim svitcima i iznosi vibracija mjereni senzorima postavljenima na kućište i paket statora. Referentno očitavanje vibracija provedeno je u mehaničkoj vrtnji neuzbuđenog generatora, da bi se utvrdile moguće smetnje i problemi s očitanjem mjernih signala. Po postavljanju tereta za svaku radnu točku napravljen je snimak svih praćenih veličina u trajanju od  $\sim 10$  sekundi. Snimljeni rezultati su kroz daljnja poglavlja rada prikazani za vrijeme koje odgovara jednoj električnoj periodi tj. vremenu poluokreta rotora.

Na slici 6.15 prikazani su inducirani naponi u mjernim svitcima  $Ms1$ - $Ms7$ , dobiveni mjerenjem u vremenskom intervalu od pola električne periode (10 ms), za situaciju praznog hoda i simetričnog opterećenja  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ , uz napon  $U=400$  V. U valnom obliku induciranih napona ponovno se mogu uočiti pozicije vrhova koje koreliraju s pozicijama rubova polnih papuča, prijelazima iz trapeznog u lučni segment te pozicijom štapova prigušnog namota. Uočava se kako dijametralno postavljeni svitci imaju međusobno podudaran valni oblik napona te da su maksimalne vršne vrijednosti napona podjednakog iznosa za sve mjerne svitke. Kod opterećenja ponovno se uočava značajno povećanje najvećeg vrha u odnosu na prazni hod i značajna razlika između dva najistaknutija susjedna vrha, dok su u praznom hodu ova dva vrha međusobno ujednačenog iznosa.

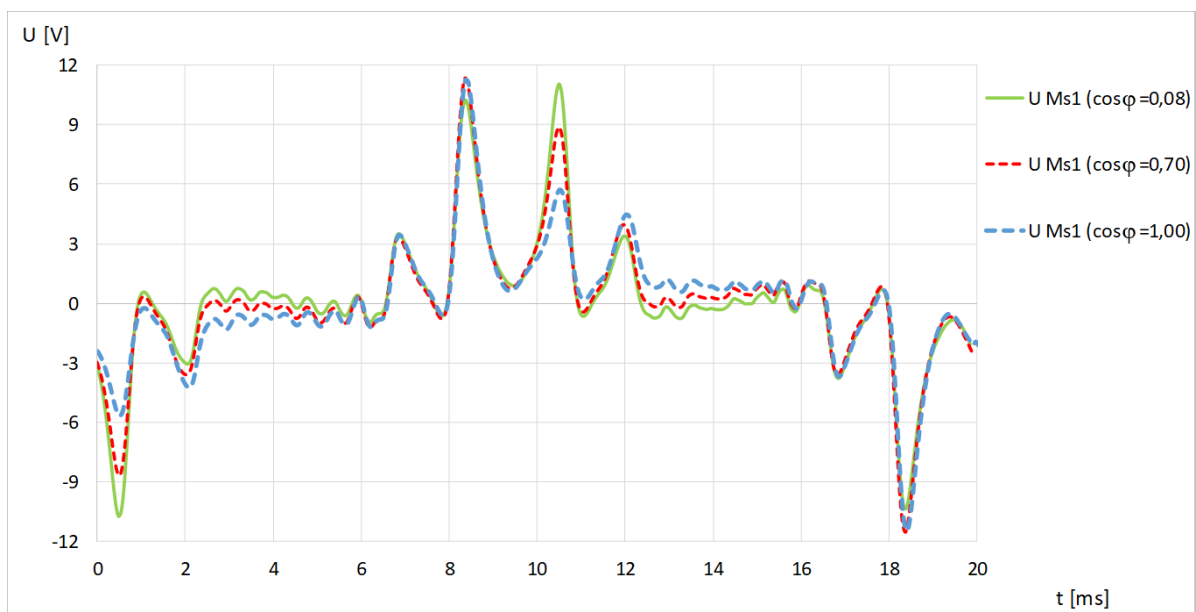


Slika 6.15 Snimljeni valni oblici napona mjernih svitaka u praznom hodu (lijevo) i kod simetričnog opterećenja (desno)



Slika 6.16 Snimljeni valni oblici dijametralno postavljenih svitaka i njihova razlika

Slikom 6.16 usporedno su prikazani valni oblici dijametralno postavljenih svitaka *Ms5* i *Ms7*. Može se vidjeti dobro međusobno poklapaju ovih naponskih valnih oblika, ali i da postoji određena razlika između njih. Razlike su posljedica nesavršenosti i grešaka prilikom ugradnje te pozicioniranja mjernih svitaka, tolerancije u izradi i sastavljanju generatora, tj. svih faktora koji utječu na rezultate mjerenja. Ove tvrdnje potkrepljene su i mjernom nesigurnošću koja je određena i prikazana u tablici 3.10, gdje su navedeni doprinosi nesavršenosti mjerne opreme i izvedbe stroja netočnosti mjerenja, pomoću kojih je određeno da za analizirani generator mjerna nesigurnost iznosi  $\pm 8,37 \%$ .

Slika 6.17 Snimljeni naponi svitka *Ms1* uz prividnu snagu  $S=180$  kVA za različite faktore snage

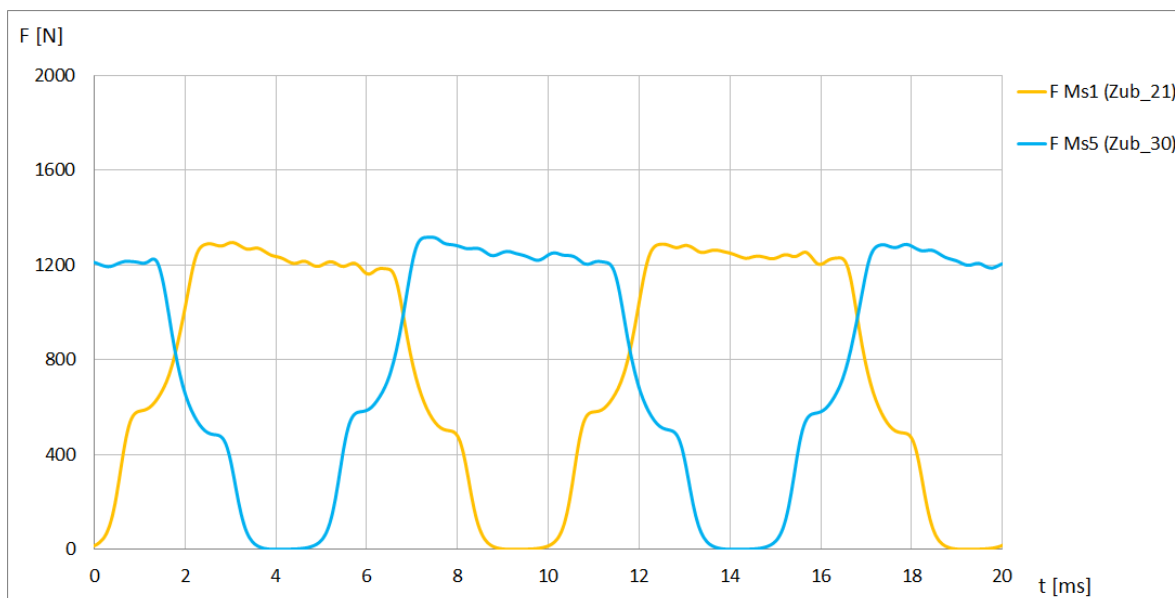


Tablica 6.4 Izmjerene vrijednosti induciranih napona mjernih svitaka za simetrična opterećenja

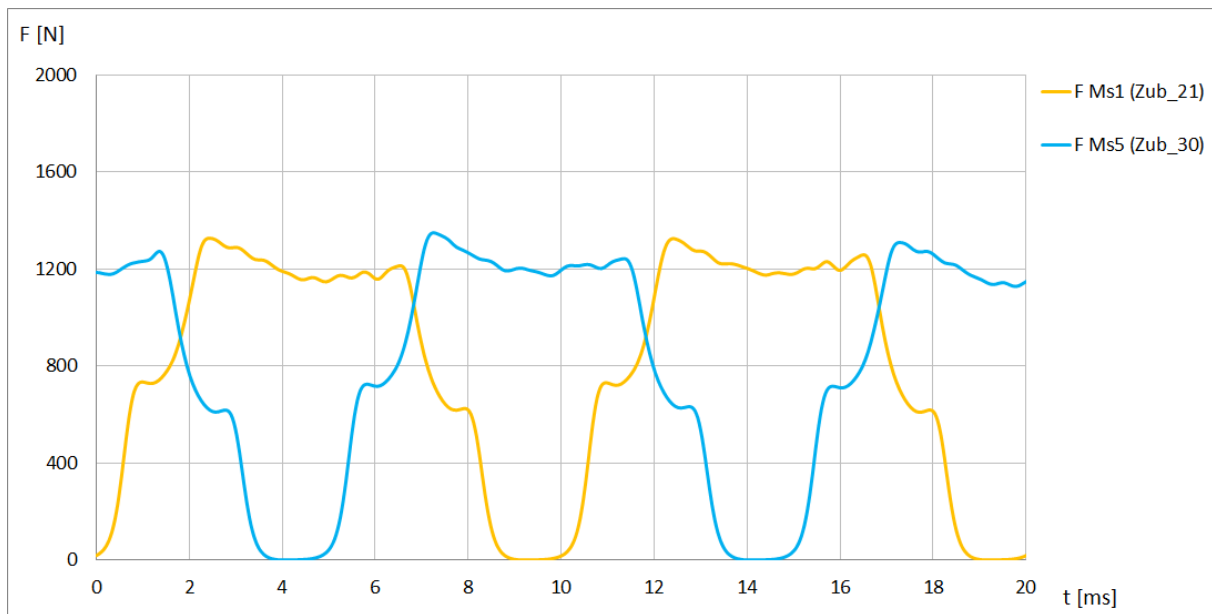
| Red.br. | Pogonsko stanje |              |                      | Vršna vrijednost      |                       |                          | Efektivna vrijednost |                     |                        |
|---------|-----------------|--------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|---------------------|------------------------|
|         | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $U_{Ms1 maks}$<br>[V] | $U_{Ms5 maks}$<br>[V] | $\Delta U_{maks}$<br>[%] | $U_{Ms1 ef}$<br>[V]  | $U_{Ms5 ef}$<br>[V] | $\Delta U_{ef}$<br>[%] |
| 1.      | 200             | 0            | -                    | 3,83                  | 3,79                  | 1,04                     | 1,48                 | 1,45                | 2,03                   |
| 2.      | 400             | 0            | -                    | 8,65                  | 8,50                  | 1,73                     | 2,96                 | 2,91                | 1,69                   |
| 3.      | 400             | 90           | 0,08                 | 9,83                  | 9,69                  | 1,42                     | 3,20                 | 3,15                | 1,56                   |
| 4.      | 400             | 90           | 0,70                 | 10,16                 | 10,04                 | 1,18                     | 3,14                 | 3,12                | 0,64                   |
| 5.      | 400             | 90           | 1,00                 | 10,11                 | 9,88                  | 2,27                     | 3,02                 | 2,97                | 1,66                   |
| 6.      | 400             | 180          | 0,08                 | 10,80                 | 10,61                 | 1,76                     | 3,44                 | 3,39                | 1,45                   |
| 7.      | 400             | 180          | 0,70                 | 11,59                 | 11,40                 | 1,64                     | 3,37                 | 3,33                | 1,19                   |
| 8.      | 400             | 180          | 1,00                 | 11,54                 | 11,34                 | 1,73                     | 3,14                 | 3,09                | 1,59                   |

Tablicom 6.4 usporedno su prikazane vršne i efektivne vrijednosti napona svitaka međusobno razmaknutih za približno pola polnog koraka ( $\frac{1}{2}\tau_p$ ), za analizirana simetrična pogonska stanja. Brojke pokazuju kako vrijede slične zakonitosti kao i one utvrđene proračunima. Povećanjem linijskog napona na stezaljkama generatora  $U$  i prividne snage  $S$  povećavaju se vršna i efektivna vrijednost induciranih napona u svitcima. Uslijed geometrije ugrađenih mjernih svitaka (utjecaj širine mjernog svitka opisan u točki 5.2.3), utjecaj promjene faktora snage  $\cos\varphi$  na vrijednosti induciranih napona nije jasno izražen. Ovo je prikazano i slikom 6.13. Međusobne razlike amplituda i efektivnih vrijednosti uzrokovane netočnostima mjerenja nalaze se unutar 3 %.

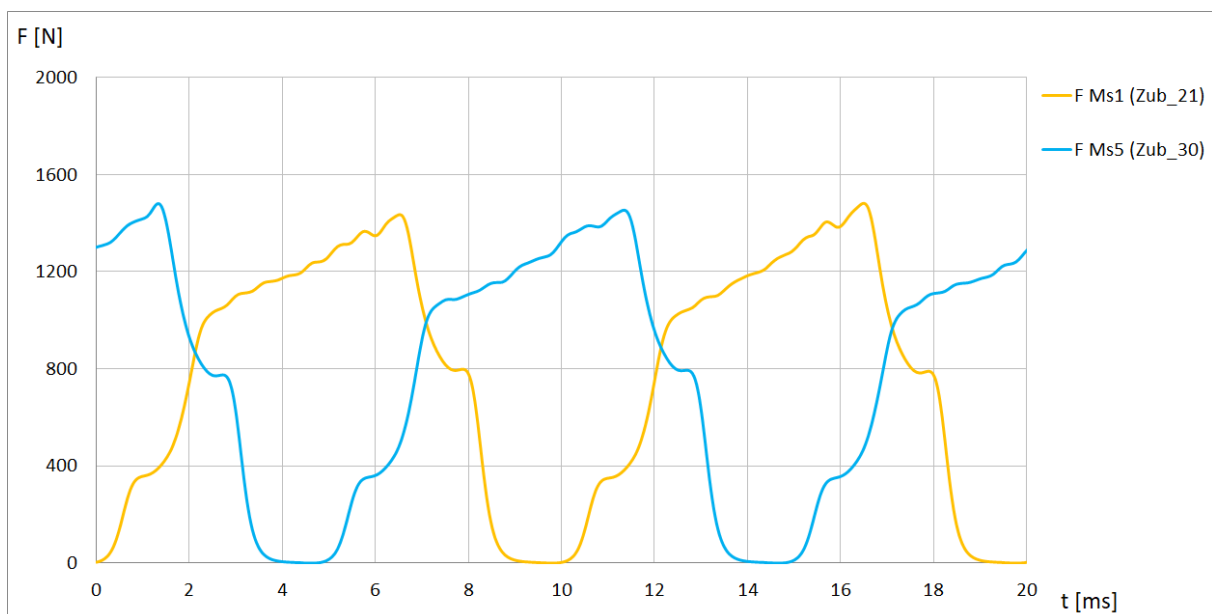
Postupkom opisanim u točki 5.2.3. provedena je analiza snimljenih induciranih napona, u svrhu određivanja valnih oblika radijalnih sila. Narednim slikama prikazani su ovako dobiveni valni oblici za nekoliko izmjerenih simetričnih pogonskih stanja.



Slika 6.18 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za prazni hod uz  $U = 400$  V

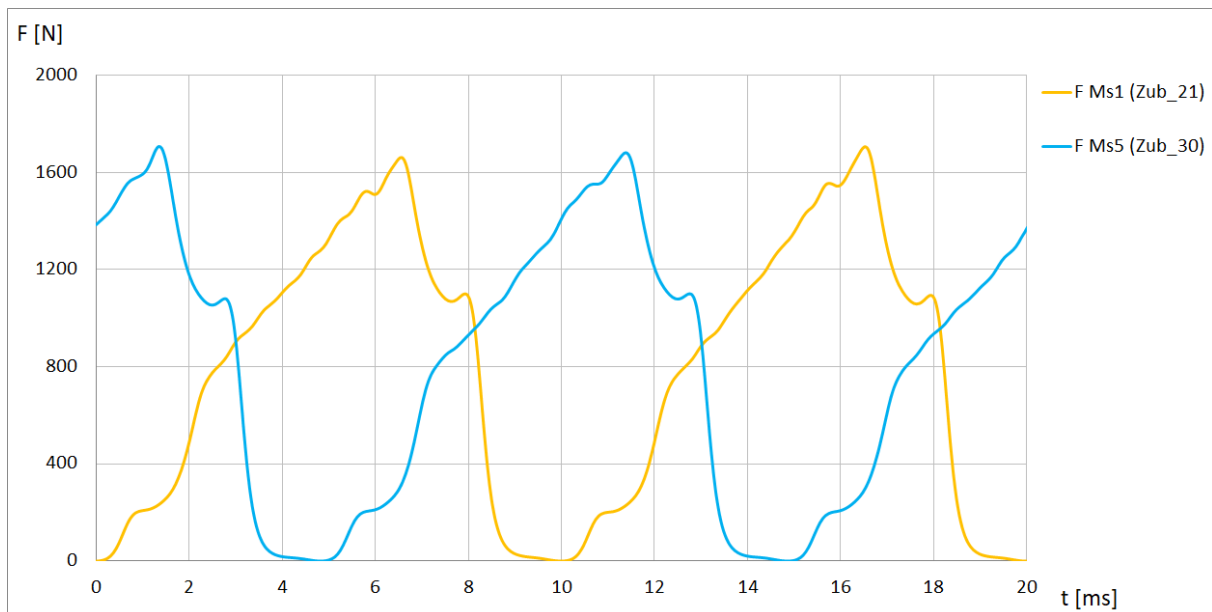


Slika 6.19 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za simetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=90\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=0,08$



Slika 6.20 Amplitude valnih oblika radijalnih sila na zube određeni analizom napona svitaka za simetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=90\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$

Na slikama 6.18 do 6.21 vidi se da valni oblici sila na zube razmaknute za približno pola polnog koraka, za pojedino simetrično pogonsko stanje imaju međusobno slične amplitude. Valni oblici mijenjaju se s promjenom opterećenja. Što je iznos prividne snage i faktora snage veći, veće su amplitude i efektivne vrijednosti valnih oblika ovih radijalnih sila na zube.



Slika 6.21 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$

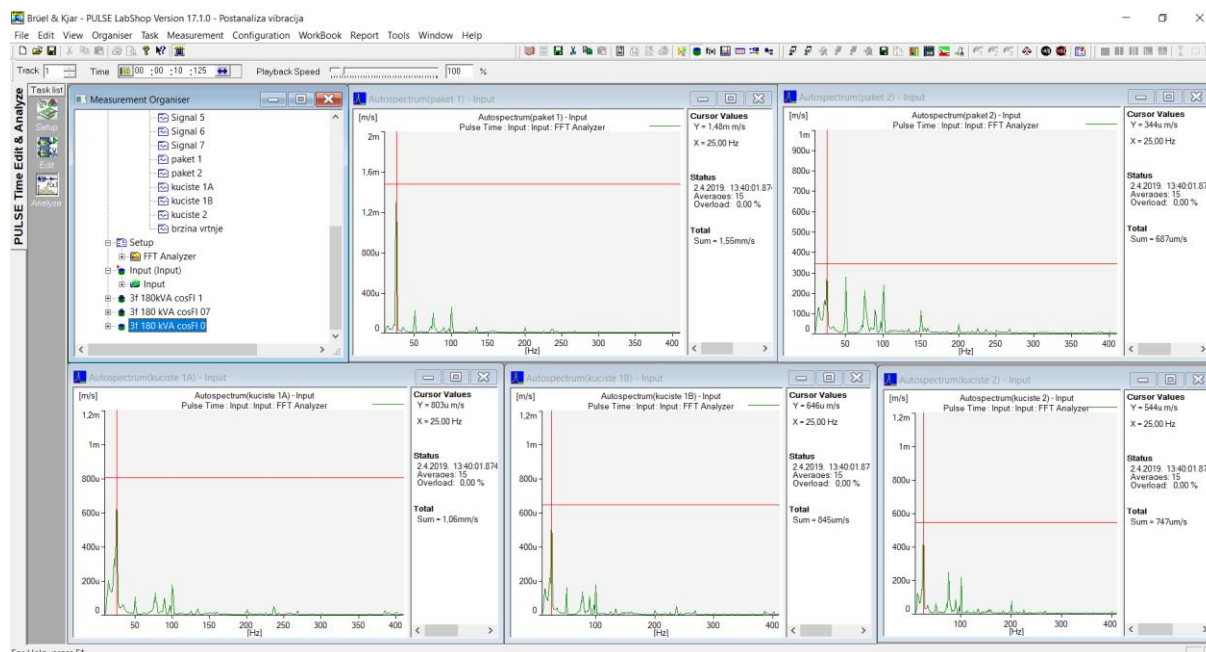
Tablicom 6.5 usporedno su prikazane vršne i efektivne vrijednosti valnih oblika radijalnih sila, određene temeljem napona svitaka međusobno razmaknutih za približno pola polnog koraka ( $\frac{1}{2}\tau_p$ ), za analizirana simetrična pogonska stanja. Brojke pokazuju kako vrijede slične zakonitosti kao i one utvrđene proračunima. Povećanje linijskog napona na stezaljkama generatora  $U$  i prividne snage  $S$  povećava amplitudne i efektivne vrijednosti valnih oblika radijalnih sila. Uslijed geometrije ugrađenih mjernih svitaka (širine svitka manje od koraka utora statora) utjecaj promjene faktora snage  $\cos\varphi$  na efektivnu vrijednost sile nije jasno izražen.

Tablica 6.5 Vrijednosti radijalnih sila određene analizom izmjerenih induciranih napona u mjernim svitcima za niz pogonskih stanja

| Red.br. | Pogonsko stanje |              |                      | Vršna vrijednost        |                         |                          | Efektivna vrijednost  |                       |                        |
|---------|-----------------|--------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
|         | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $F_{k Ms1 maks}$<br>[N] | $F_{k Ms5 maks}$<br>[N] | $\Delta F_{maks}$<br>[%] | $F_{k Ms1 ef}$<br>[N] | $F_{k Ms5 ef}$<br>[N] | $\Delta F_{ef}$<br>[%] |
| 1.      | 200             | 0            | -                    | 359                     | 350                     | 2,56                     | 214                   | 209                   | 2,15                   |
| 2.      | 400             | 0            | -                    | 1323                    | 1314                    | 0,69                     | 843                   | 833                   | 1,18                   |
| 3.      | 400             | 90           | 0,08                 | 1369                    | 1346                    | 1,68                     | 863                   | 847                   | 1,87                   |
| 4.      | 400             | 90           | 0,70                 | 1434                    | 1403                    | 2,19                     | 845                   | 841                   | 0,54                   |
| 5.      | 400             | 90           | 1,00                 | 1516                    | 1477                    | 2,58                     | 853                   | 841                   | 1,35                   |
| 6.      | 400             | 180          | 0,08                 | 1377                    | 1360                    | 1,22                     | 863                   | 853                   | 1,15                   |
| 7.      | 400             | 180          | 0,70                 | 1572                    | 1547                    | 1,61                     | 870                   | 868                   | 0,26                   |
| 8.      | 400             | 180          | 1,00                 | 1737                    | 1703                    | 1,99                     | 887                   | 880                   | 0,86                   |

### 6.3. Mjerenje vibracija za simetrična opterećenja

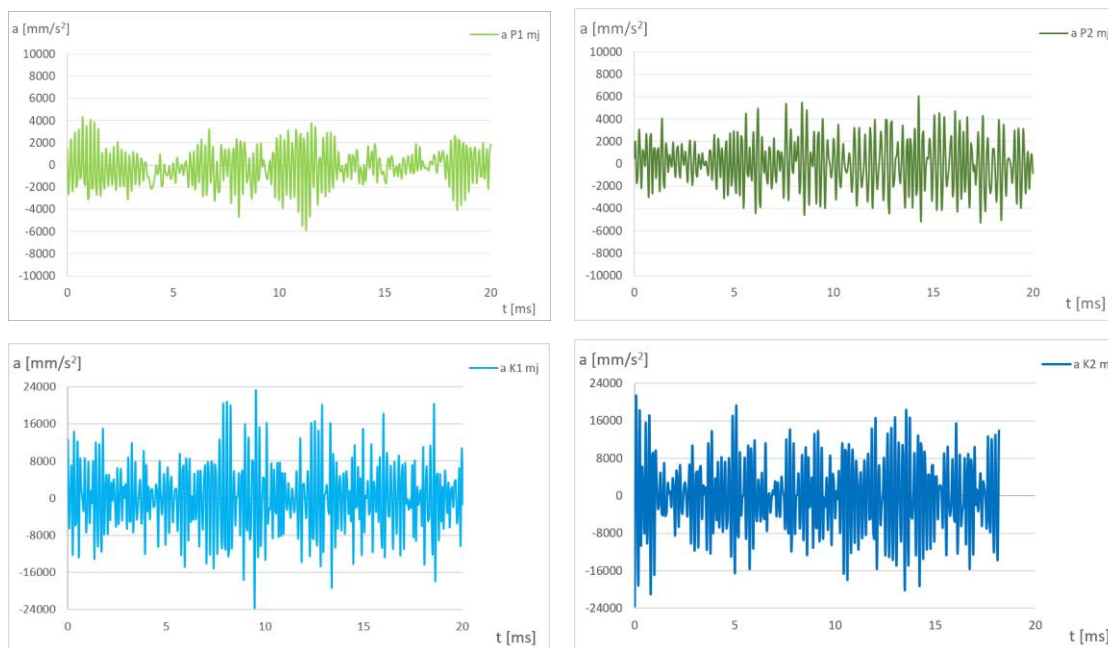
Iznosi vibracija na odabranim mjestima generatora praćeni su tijekom cijelog ispitivanja upotrebom programskog alata posebno namijenjenog za analizu vibracija (slika 6.22). Ovakav pristup omogućio je obradu i provjeru netom snimljenih podataka i otklanjanje potencijalnih problema mjerenja, kakve npr. mogu uzrokovati loš spoj akcelerometra na kućište ili dovodnog kabela na mjernu centralu te smetnje u prijenosu podataka.



Slika 6.22 Spektri frekvencija obrađeni programskim alatom za obradu snimljenih podataka

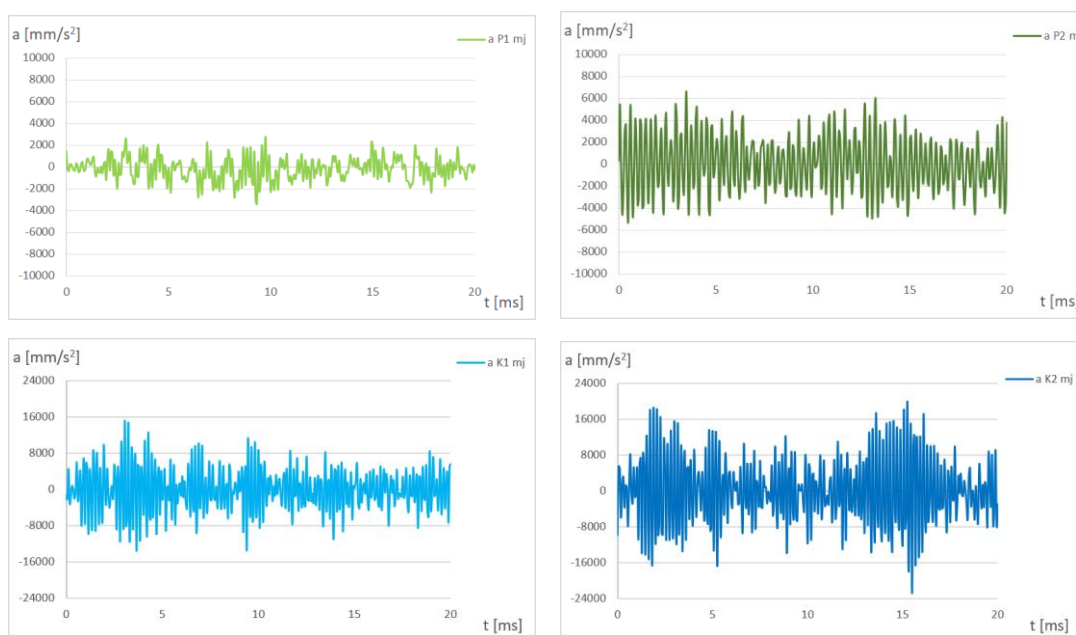
*PULSE LabShop v17* neposredno nakon provedbe mjerenja

Prvo mjerenje provedeno je u mehaničkoj vrtnji neuzbuđenog generatora, pri brzini vrtnje od 1500 o/min, radi određivanja referentne vrijednosti odziva senzora i provjere da stroj u neopterećenom stanju nema problema s povećanim vibracijama. Valni oblici akceleracija snimljeni na mjestima *P1*, *P2*, *K1* i *K2* prikazani su slikom 6.23. Ovim mjerenjem utvrđeno je da su iznosi vibracija u očekivanim granicama za ispravan stroj, no i da njihovi iznosi mogu otežati uočavanje promjena u vibracijama nastalim djelovanjem magnetskih sila. Ovo je posebice istaknuto za mjerna mjesta *K1* i *K2* na plaštu kućišta, gdje su snimljene akceleracije oko četiri puta većeg vršnog iznosa od vrijednosti izmjerenih na paketu. Mogući uzrok ovih vibracija je ventilatorsko kolo, čiji broj lopatica odgovara rednom broju harmonika koje se pojavljuje u snimci vibracija. Time se također objašnjava zašto su amplitude ove frekvencije značajnijeg iznosa na plaštu nego na paketu statora.

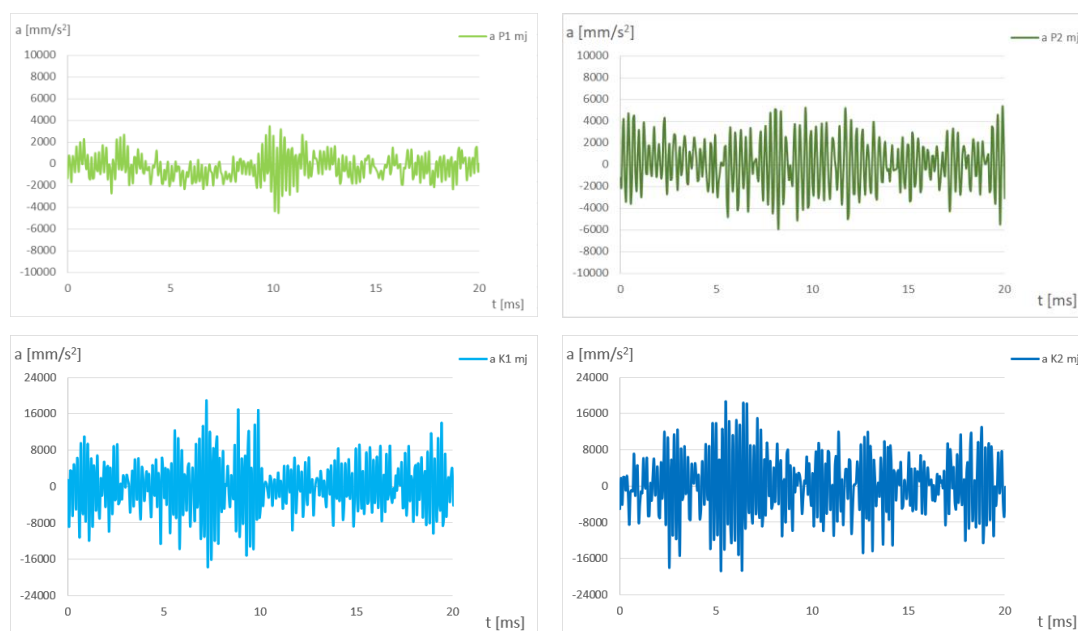


Slika 6.23 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima pri mehaničkoj vrtnji

Slikom 6.24 prikazani su snimljeni valni oblici akceleracija na četiri analizirana mjesta za prazni hod pri nazivnom naponu  $U=400$  V, a slikom 6.25 za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ . Zbog superpozicije mehanički uzrokovanih vibracija, iz prikazanih grafova vizualno je praktički nemoguće utvrditi razliku koju unosi magnetsko polje uzbuđenog stroja. Iz navedenog razloga, rezultati vibracijskih mjerenja analizirani su preko harmonijskog sastava, uz naglasak na vibracije izmjerene na paketu.



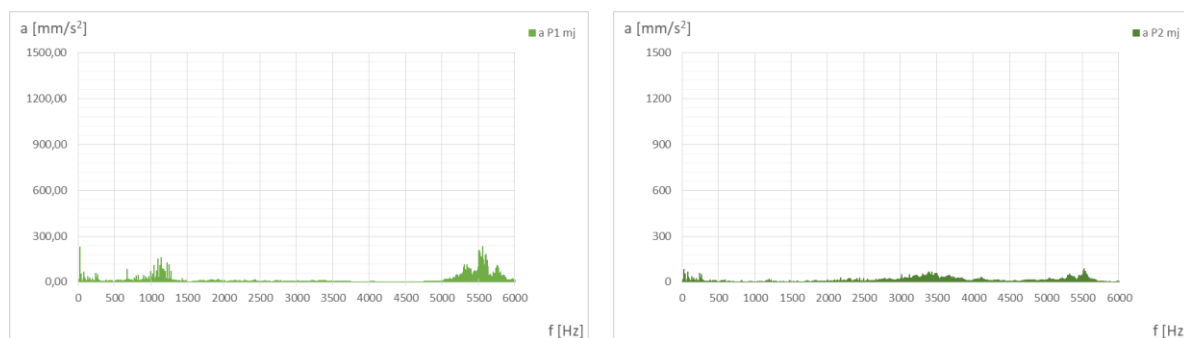
Slika 6.24 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima u praznom hodu



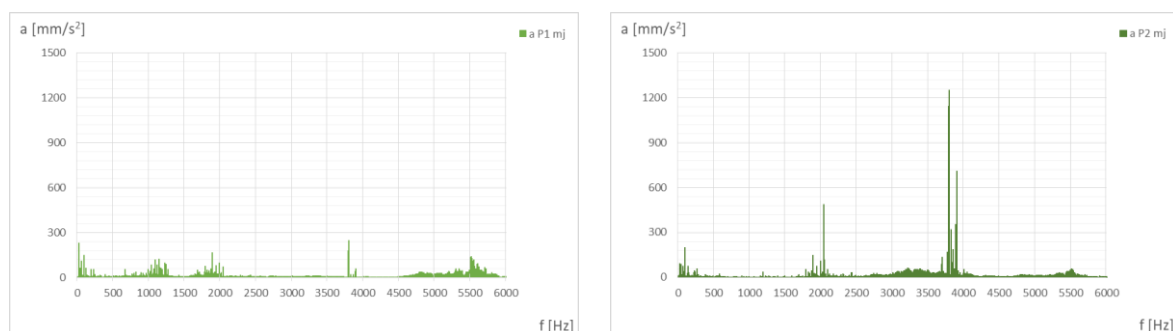
Slika 6.25 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima pri opterećenju

$$U=400 \text{ V}, S=180 \text{ kVA}, \cos\varphi=1$$

Slikom 6.26 prikazan je frekvencijski spektar vibracija paketa na lokaciji  $P1$  i  $P2$  u mehaničkoj vrtnji, slikom 6.27 u praznom hodu pri naponu  $U=400 \text{ V}$ , a slikom 6.28 za simetrično opterećenje  $U=400 \text{ V}, S=180 \text{ kVA}, \cos\varphi=1$ .

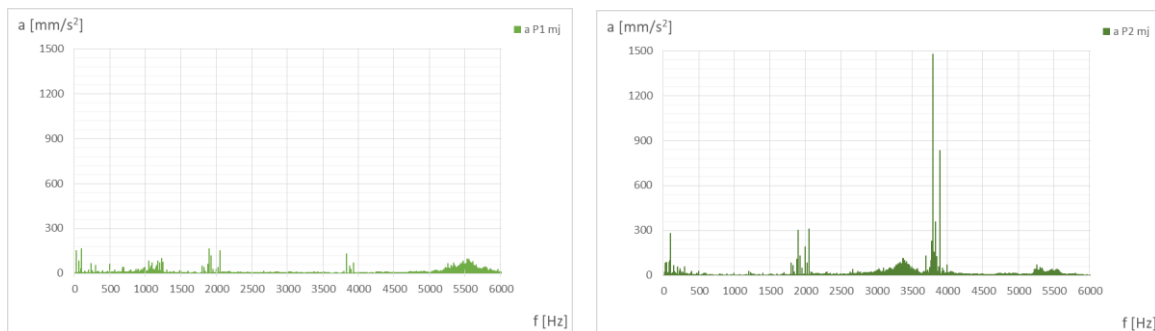


Slika 6.26 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa u mehaničkoj vrtnji



Slika 6.27 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa u praznom hodu





Slika 6.28 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa pri opterećenju

$$U = 400 \text{ V}, S = 180 \text{ kVA}, \cos\varphi = 1$$

Usporedbom harmonijskog sastava akceleracija moguće je uočiti da se vibracije na mjestima *P1* i *P2* međusobno značajno razlikuju. Na mjestu *P1*, koje se nalazi ispod priključne kutije, prisutan je niz značajno istaknutih visokih harmonika u rasponu 1000 do 1300 Hz i 5000 do 6000 Hz, koji su posljedica rasporeda spojnih letvi kućišta i paketa, nosača kućišta te međusobnog odnosa broja spojnih letvi i broja zubi statora. Mogući razlog većih iznosa ovih harmonika na mjestu *P1* je smanjena krutost kućišta u ovoj zoni uslijed otvora na plaštu kroz koji su provedeni vodiči namota prema priključnoj kutiji (slika 6.29). Elementi priključne kutije također mogu uzrokovati dodatne vibracije u ovoj zoni statora te utjecati na rezultate mjerenja akcelerometra.



Slika 6.29 Pozicija mjernog mjesta P1

Na mjestu *P1* zamjetan je i iznos harmonika frekvencije 25 Hz, koji u praznom hodu čak i nadmašuje iznos osnovnog harmonika frekvencije 100 Hz, uzrokovanog osnovnim magnetskim poljem stroja. Ovaj harmonik nije zabilježen u rezultatima provedenih MKE proračuna, te je

moгуća posljedica mehanički sila uzrokovanih debalansom rotora, budući da 25 Hz odgovara jednom punom okretu rotora. S povećanjem tereta vrijednost ovog harmonika se smanjuje, kao i vrijednosti harmonika u rasponu od 1000 do 1300 Hz i 5000 do 6000 Hz. Mogući razlog smanjenja ovih harmonika s povećanjem tereta je veće zagrijanje stroja, s kojim dolazi do toplinskog širenja paketa i time do njegovog dodatnog ukrućenja, kao i do povećanja krutosti cijelog elastičnog sustava paket – kućište statora.

Osnovni harmonik vibracija uzrokovan magnetskim silama, frekvencije 100 Hz istaknut je u rezultatima oba mjerna mjesta, no većeg je iznosa na mjestu P2. S porastom opterećenja raste iznos ovog harmonika, što je u skladu s rezultatima proračuna. Tablicom 6.6 prikazani su iznosi amplitude osnovnog harmonika akceleracije za mjerenjem analizirana električna simetrična pogonska stanja na sve četiri lokacije mjerenja vibracija.

Tablica 6.6 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za analizirane četiri lokacije na statoru stroja, izmjerene za simetrična pogonska stanja generatora

| Akceleracije vibracija – Amplitude harmonika na 100 Hz |                 |              |                      |                                  |                                  |                                                |                                  |                                  |                                                |
|--------------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
|                                                        | Pogonsko stanje |              |                      | Mjesta na paketu                 |                                  |                                                | Mjesta na kućištu                |                                  |                                                |
| Red.br.                                                | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $a_{p1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{p2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\overline{a}_{p\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\overline{a}_{K\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 0.                                                     | 0               | 0            | -                    | 7                                | 22                               | 15                                             | 16                               | 13                               | 15                                             |
| 1.                                                     | 200             | 0            | -                    | 37                               | 47                               | 42                                             | 15                               | 39                               | 27                                             |
| 2.                                                     | 400             | 0            | -                    | 150                              | 202                              | 176                                            | 123                              | 111                              | 117                                            |
| 3.                                                     | 400             | 90           | 0,08                 | 167                              | 160                              | 164                                            | 121                              | 146                              | 134                                            |
| 4.                                                     | 400             | 90           | 0,70                 | 196                              | 183                              | 190                                            | 127                              | 167                              | 147                                            |
| 5.                                                     | 400             | 90           | 1,00                 | 161                              | 252                              | 207                                            | 137                              | 154                              | 146                                            |
| 6.                                                     | 400             | 180          | 0,08                 | 161                              | 150                              | 156                                            | 110                              | 136                              | 123                                            |
| 7.                                                     | 400             | 180          | 0,70                 | 186                              | 176                              | 181                                            | 142                              | 149                              | 146                                            |
| 8.                                                     | 400             | 180          | 1,00                 | 164                              | 279                              | 222                                            | 167                              | 112                              | 140                                            |

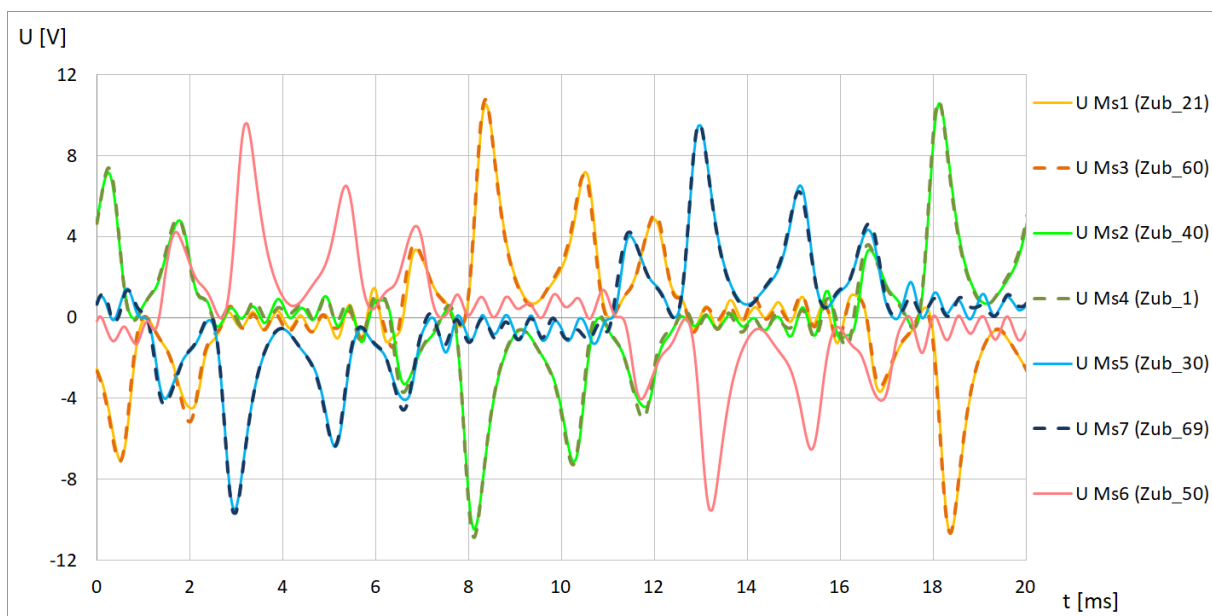
Provedenim mjerenjima za simetrična pogonska stanja utvrđeno je da:

- mehanički uzrokovane vibracije zašumljuju odziv uzrokovan magnetskim silama;
- harmonik frekvencije 25 Hz ukazuje na postojanje ekscentričnosti rotora;
- temeljem analize osnovnog harmonika protjecanja frekvencije 100 Hz moguće je uočiti razlike između različitih pogonskih stanja;
- iznos harmonika frekvencije 100 Hz raste s porastom prividne izlazne snage i faktora snage;
- vibracije pojedinih mjesta paketa i kućišta međusobno se razlikuju.



#### 6.4. Mjerenje električnih veličina za nesimetrična opterećenja

Nesimetrično opterećenje po fazama armaturnog namota popraćeno je povećanim gubicima u stroju. Zbog navedenog razloga, ispitivanja nesimetričnih opterećenja provedena su pri snagama značajno manjeg iznosa od nazivnih 400 kVA (tablica 6.2). Mjerenja su provedena na jednak način kao i kod simetričnih opterećenja, s time da su u ovom slučaju struje tekle samo kroz dvije faze, dok treća faza nije bila spojena na teret. Za sva analizirana nesimetrična pogonska stanja snimljeni su inducirani naponi mjernih svitaka i obradom tih vrijednosti određeni su valni oblici radijalne sile koja djeluje na zub.

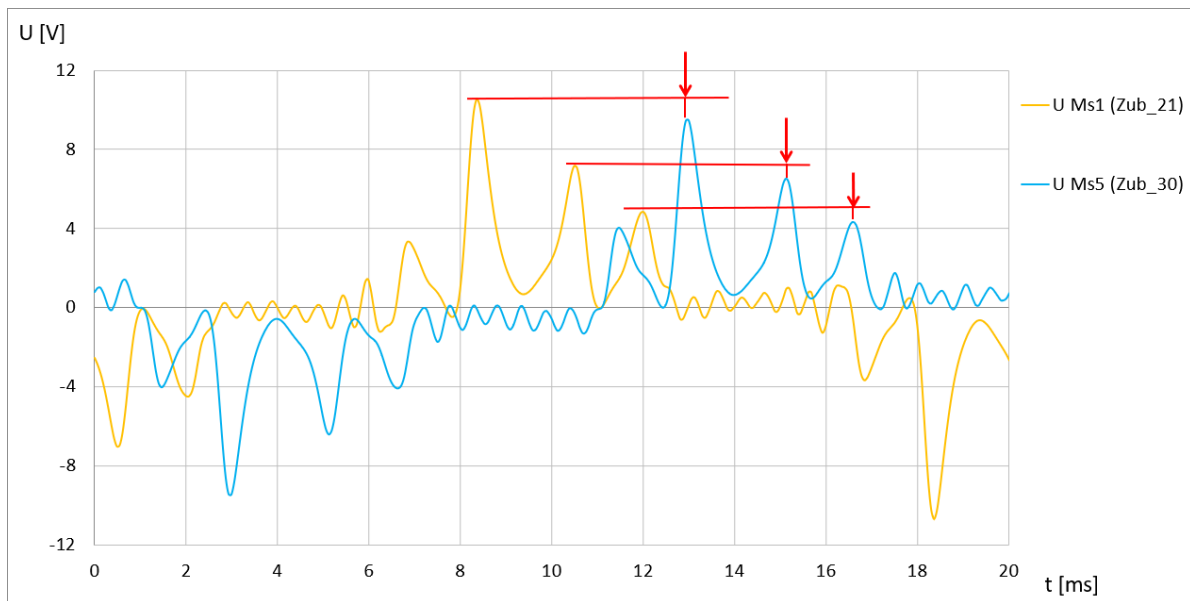
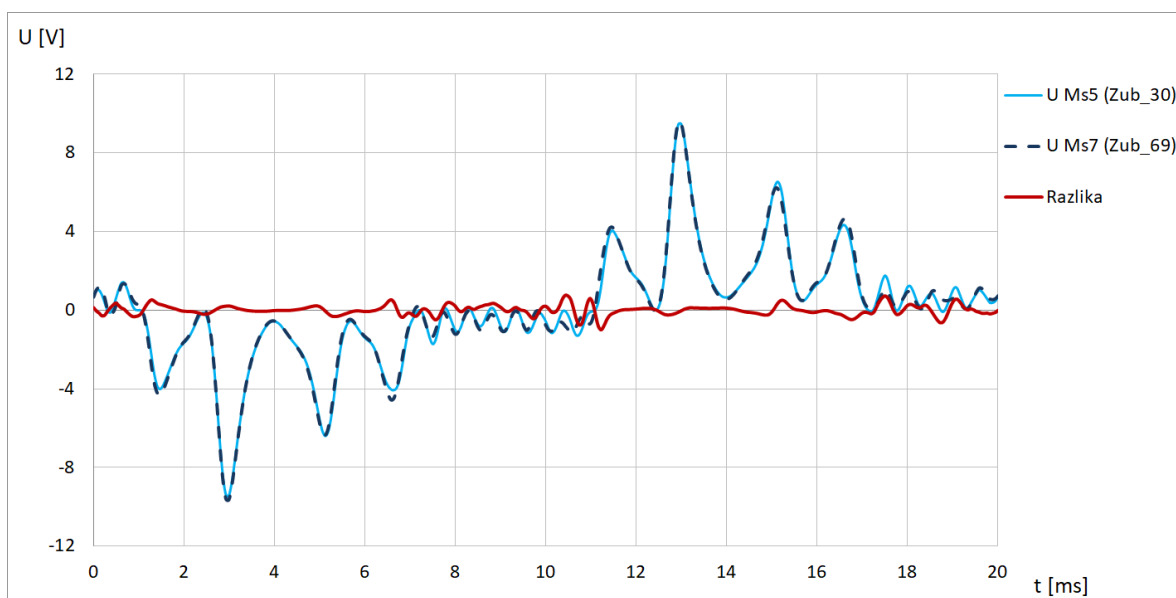


Slika 6.30 Snimljeni valni oblici napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje

$$U=400 \text{ V}, S=104 \text{ kVA}, \cos\varphi=1 \text{ uz faze } B-C \text{ protjecane strujom}$$

Slikom 6.30 prikazani su snimljeni inducirani naponi mjernih svitaka za nesimetrično pogonsko stanje  $U=400 \text{ V}$ ,  $S=104 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ , pri čemu struje teku kroz namote faza  $B$  i  $C$ . Pri ovakvom radu uočavaju se razlike u naponima mjernih svitaka razmaknutih za pola polnog koraka ( $\frac{1}{2}\tau_p$ ), a koje nisu uočene pri simetričnim opterećenjima. Ova razlike detaljnije su istaknute na slici 6.31.

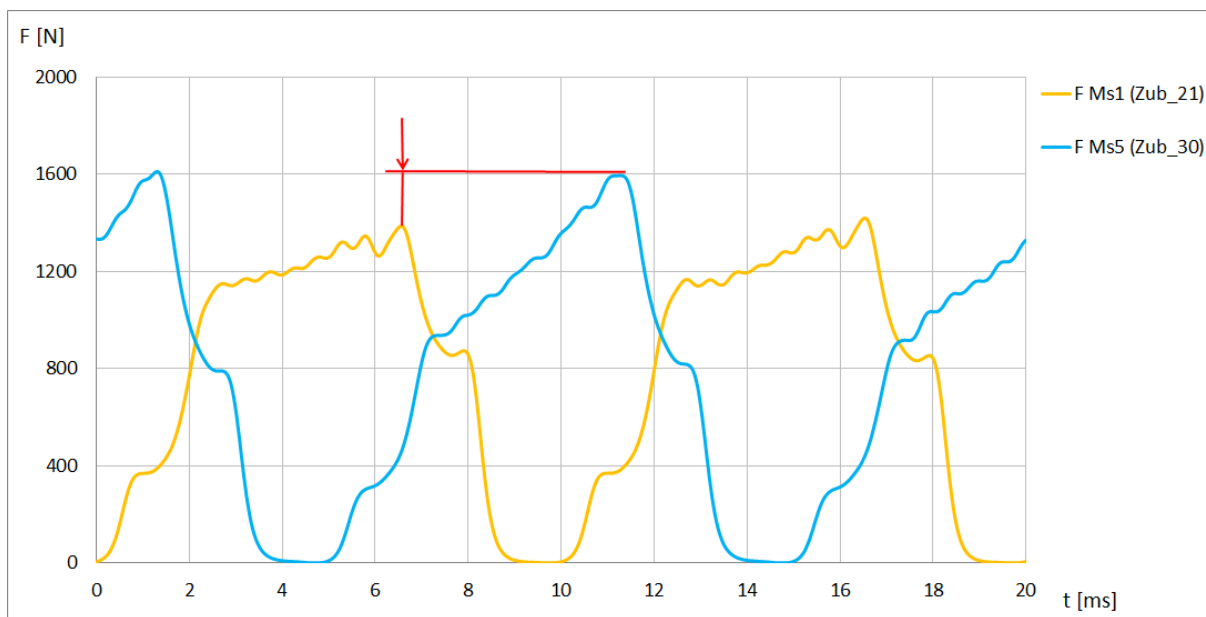
Na slici 6.30 uočava se međusobno poklapanje napona dijagonalno postavljenih parova svitaka kao i u slučaju simetričnog tereta (parovi valnih oblika označeni kao  $Ms1-Ms3$ ,  $Ms2-Ms4$  i  $Ms5-Ms7$ ). Između napona ovih parova svitaka ponovno postoji određena razlika kao posljedica netočnosti mjerenja (slika 6.32), koja je uočena i kod simetričnih opterećenja.

Slika 6.31 Razlike napona svitaka razmaknutih za  $\frac{1}{2} \tau_p$  pri nesimetričnom opterećenju

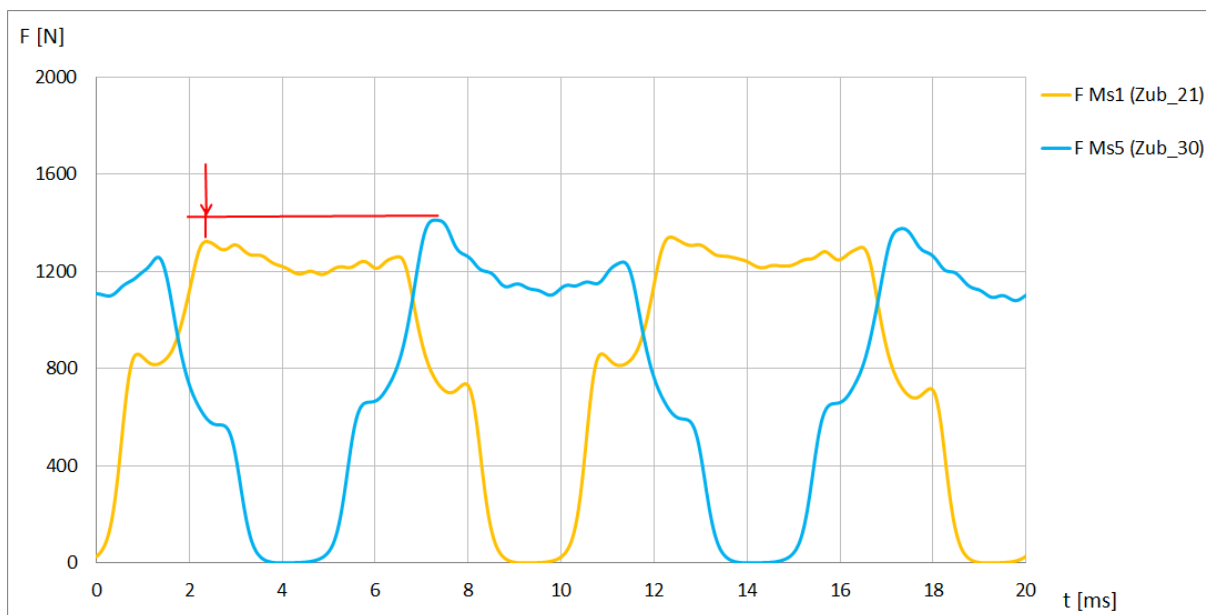
Slika 6.32 Poklapanje napona dijametralno postavljenih svitaka i njihova međusobna razlika uzrokovana netočnostima mjerenja

Provedbom postupka analize induciranih napona mjernih svitaka, opisanog u točki 5.2.3., određeni su valni oblici radijalnih sila. Ovakva analiza provedena je radi zornijeg utvrđivanja utjecaja nesimetričnog električnog opterećenja na razlike sila po zubima stroja. Slikama u nastavku usporedno su prikazani dobiveni valni oblici sila, na primjeru nekoliko izmjerenih karakterističnih nesimetričnih opterećenja, za svitke međusobno razmaknute pola polnog koraka ( $\frac{1}{2} \tau_p$ ).

Slikom 6.33 prikazani su valni oblici sila, određeni na temelju induciranih napona prikazanih slikom 6.31, za pogonski stanje  $U=400$  V,  $S=10$  kVA,  $\cos\varphi=1$ , pri čemu struje teku kroz namote faza  $B$  i  $C$ . Moguće je primijetiti kako se slikom 6.33 usporedno prikazani valni oblici određeni za lokacije svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  međusobno razlikuju po vršnoj vrijednosti i valnom obliku. Ovo predstavlja značajnu razliku u odnosu na rezultate simetričnih opterećenja prikazane u točki 6.2 ovog rada.

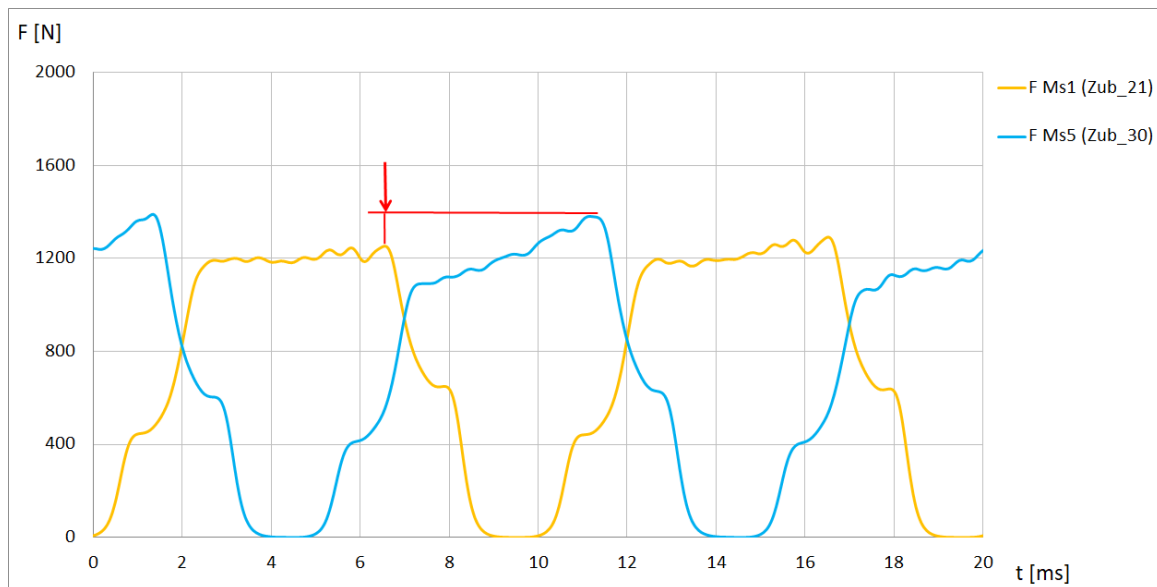


Slika 6.33 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$  uz faze  $B$ - $C$  protjecane strujom

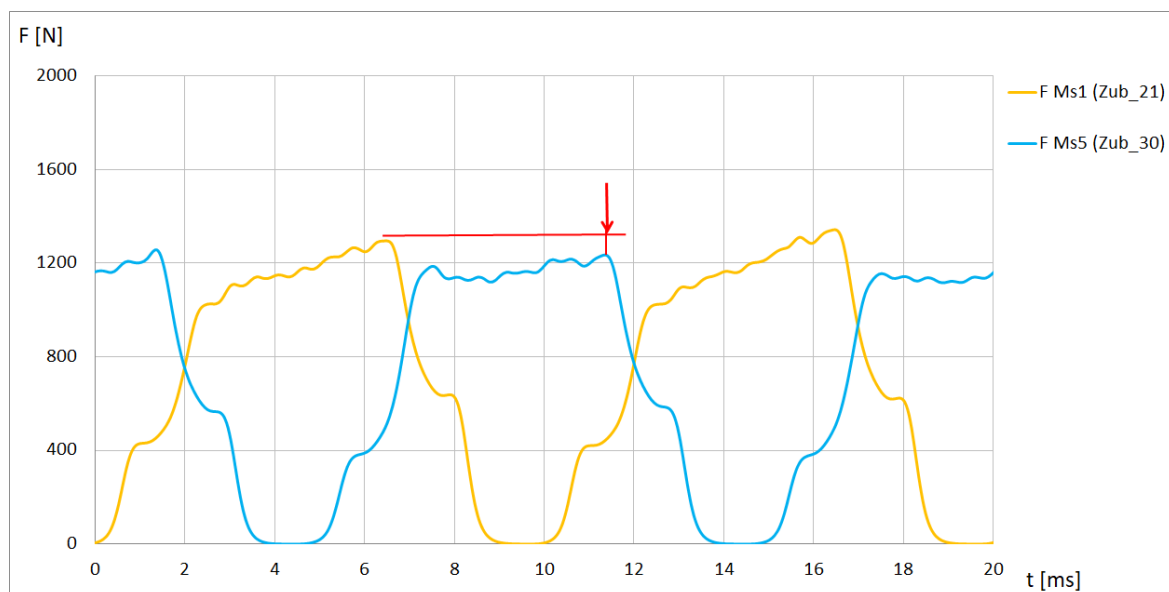


Slika 6.34 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=0,08$  uz faze  $B$ - $C$  protjecane strujom

Slikom 6.34 prikazani su valni oblici radijalnih sila za pogonsko stanje u kojem kroz namote teku isti iznosi struja kao i u prethodnom slučaju (slika 6.33), ali pri izrazito induktivnom faktoru snage  $\cos\varphi=0,08$ . Moguće je vidjeti kako su u ovom slučaju valni oblici značajno različitog oblika, u odnosu na slučaj radnog opterećenja s faktorom snage  $\cos\varphi=1$ . Maksimalna zabilježena vršna vrijednosti sile u slučaju induktivnog rada značajno je nižeg iznosa i javlja se na uzlaznom bridu valnog oblika sile. I u ovom slučaju uočava se međusobna razlika valnih oblika na mjestima  $Ms1$  i  $Ms5$ . No sada je međusobna razlika vršnih vrijednosti ovih valnih oblika značajno manja.



Slika 6.35 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=52\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$  uz faze  $B-C$  protjecane strujom



Slika 6.36 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=52\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ , uz faze  $A-C$  protjecane strujom

Slikama 6.35 i 6.36 usporedno su prikazani valni oblici za lokacije *Ms1* i *Ms5* pri istom opterećenju  $U=400\text{V}$ ,  $S=52\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ , za slučajeve kad struja jednom teku kroz namote faza *B* i *C*, a drugi put kroz namote faza *A* i *C*. Moguće je uočiti znatne razlike među valnim oblicima sile u dva razmatrana slučaja napajanja faza. Dok se u slučaju aktivnih faza *B* i *C* veća vršna vrijednost pojavljuje kod valnog oblika određenog preko napona svitka *Ms5*, u slučaju aktivnih faza *A* i *C* veća vršna vrijednost bilježi se kod valnog oblika svitka *Ms1*. Ukoliko se promotre valni oblici sa slika 6.33 i 6.35, moguće je vidjeti kako se u slučaju protjecanja struja kroz iste faze (u ovom slučaju *B* i *C*) i istog faktora snage ( $\cos\varphi=1$ ) zadržava pozicija pojavljivanja maksimalne vrijednosti sile. Zabilježene razlike u skladu su s rezultatima izračuna.

Tablicom 6.7 prikazane su amplitude valnih oblika radijalnih sila, određene na osnovi izmjerenih vrijednosti induciranih napona u mjernim svitcima za sva mjerena nesimetrična pogonska stanja. Pregledom ovih rezultata moguće je uočiti kako vršna vrijednost sile raste s povećanjem prividne snage  $S$ . Moguće je zamijetiti i kako promjena faktora snage  $\cos\varphi$  i promjena faza kroz koje teče struja utječe na iznos sila i lokaciju zuba ispod kojeg se bilježi veća vrijednost sile.

Tablica 6.7 Vršne vrijednosti radijalnih sila određene analizom izmjerenih induciranih napona u mjernim svitcima za niz nesimetričnih pogonskih stanja

| Red.<br>Br. | Pogonsko stanje |                  |                    |              | Sila određena pomoću svitka    |                                | Razlika                    |                            |
|-------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|             | $U [\text{V}]$  | $S [\text{kVA}]$ | $\cos \varphi [-]$ | Aktivne faze | $Ms1$<br>$F_{maks} [\text{N}]$ | $Ms5$<br>$F_{maks} [\text{N}]$ | $ \Delta F_{maks} $<br>[N] | $ \Delta F_{maks} $<br>[%] |
| 1           | 400             | 52               | 0,08               | <i>B-C</i>   | 1264                           | 1319                           | 55                         | 4,2                        |
| 2           | 400             | 52               | 0,70               | <i>B-C</i>   | 1163                           | 1210                           | 47                         | 3,9                        |
| 3           | 400             | 52               | 1,00               | <i>B-C</i>   | 1288                           | 1386                           | 98                         | 7,1                        |
| 4           | 400             | 52               | 1,00               | <i>A-C</i>   | 1379                           | 1254                           | 124                        | 9,0                        |
| 5           | 400             | 52               | 1,00               | <i>A-B</i>   | 1272                           | 1210                           | 62                         | 4,9                        |
| 6           | 400             | 90               | 0,7                | <i>B-C</i>   | 1141                           | 1213                           | 72                         | 5,9                        |
| 7           | 400             | 104              | 0,08               | <i>B-C</i>   | 1337                           | 1408                           | 70                         | 5,0                        |
| 8           | 400             | 104              | 0,70               | <i>B-C</i>   | 1155                           | 1230                           | 75                         | 6,1                        |
| 9           | 400             | 104              | 1,00               | <i>B-C</i>   | 1415                           | 1605                           | 190                        | 11,8                       |
| 10          | 400             | 104              | 1,00               | <i>A-B</i>   | 1423                           | 1364                           | 59                         | 4,1                        |

Provedenim mjerenjima za nesimetrična opterećenja potvrđeno je da:

- pri nesimetričnom električnom opterećenju postoji nesimetrija induciranih napona u mjernim svitcima koji se nalaze ispod različitih zubi generatora;
- analizom napona mjernih svitaka moguće je odrediti valne oblike sile koji odgovaraju valnim oblicima proračunske radijalne sile;
- kod nesimetričnog električnog opterećenja maksimalne vrijednosti valnih oblika radijalnih sila na zube statora uz istu izlaznu snagu  $S$ , veće su nego u slučaju simetričnog opterećenja;
- kod električki nesimetričnog opterećenja maksimalne vrijednosti valnih oblika radijalnih sila na zube, uz iste struje faznih namota, veće su nego u slučaju simetričnog opterećenja;
- maksimalne vrijednosti valnih oblika radijalnih sila i njihova nesimetrija po lokacijama mjerenja rastu s povećanjem snage  $S$ ;
- mjesto na obodu stroja (zub) na kojem se pojavljuje najveća vrijednost radijalne sile neće se promijeniti s povećanjem snage  $S$ ;
- mjesto na obodu stroja (zub) na kojem se bilježi najveća vrijednost radijalne sile promijeniti će se s promjenom faktora snage  $\cos\varphi$ ;
- analizom napona mjernih svitaka ugrađenih na zube paketa statora moguće je utvrditi pojavu nesimetričnog opterećenja po fazama.

### 6.5. Mjerenje vibracija za električki nesimetrična opterećenja

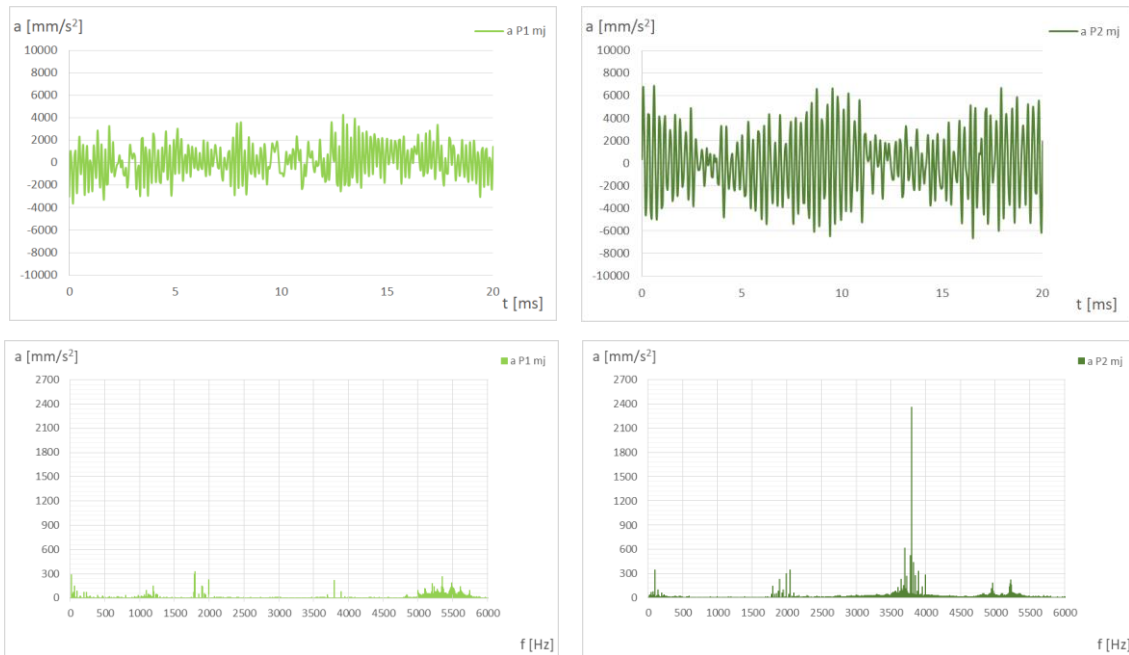
Mjerenja vibracija za električki nesimetrična opterećenja generatora provedena su usporedno s mjerenjima električnih veličina, na jednak način kao i kod ispitivanja za simetrična opterećenja.

Pri odabranoj snazi od  $S=52$  kVA provedena su mjerenja za tri moguće kombinacije uključenih faza  $A-B$ ,  $A-C$  i  $B-C$ . Za kombinaciju uključenih faza, kod koje je mjerenjem na paketu (mjerna mjesta  $P1$  i  $P2$ ) utvrđen maksimalni iznos vibracija, provedena su ispitivanja za preostala odabrana nesimetrična opterećenja.

Slikom 6.37 prikazani su snimljeni valni oblici akceleracija za analizirana mjesta  $P1$ ,  $P2$ , za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V  $S=52$  kVA  $\cos\varphi=1$ , strujom protjecane namote faza  $B$  i  $C$ . Slikom 6.38 prikazani su valni oblici za isto pogonsko stanje, ali uz strujom protjecane namote faza  $A$  i  $C$ . Kao i u slučaju simetričnog opterećenja, u snimljenim valnim oblicima uočljive su vibracije mehaničkog porijekla. Kod električne nesimetrije, u valnim oblicima vibracija uočava se i valovita komponenta frekvencije 100 Hz (ponavljanje od 2 puta unutar 20 ms). Navedena komponenta vibracija zorno se primjećuje na snimcima akcelerometara postavljenih izravno na paket statora (lokacije  $P1$  i  $P2$ ).

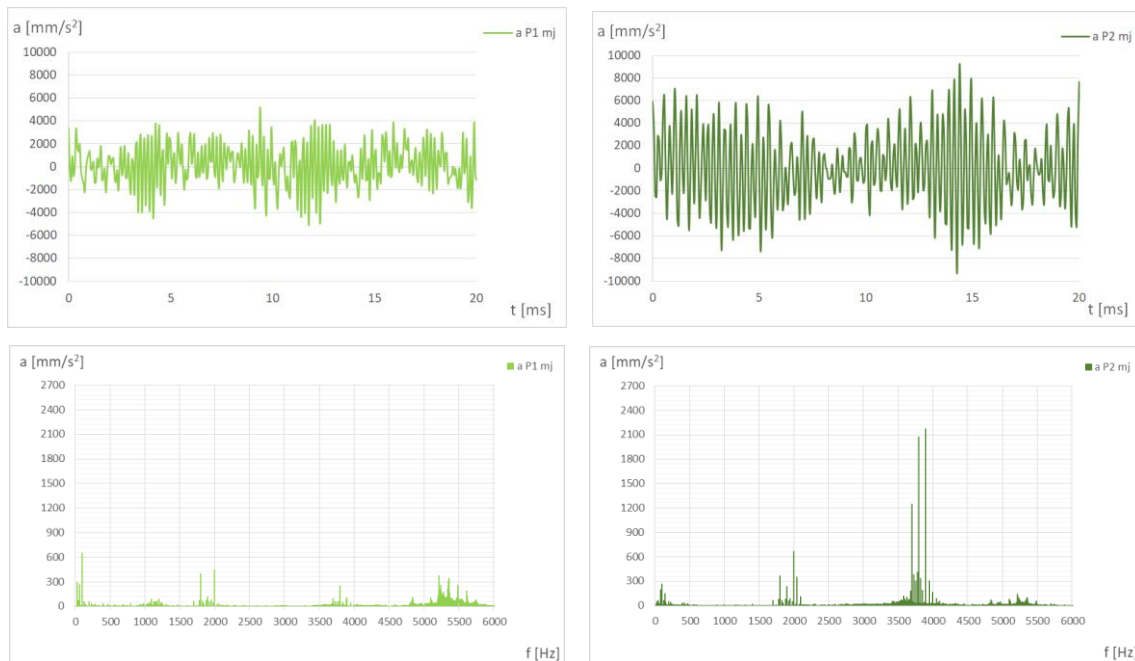


Slika 6.37 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima  $P1$  i  $P2$  paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $U=400$  V,  $S=52$  kVA,  $\cos\varphi=1$  uz faze  $B-C$  protjecane strujom



Slika 6.38 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima  $P1$  i  $P2$  paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $U=400$  V,  $S=52$  kVA,  $\cos\varphi=1$  uz faze  $A-C$  protjecane strujom

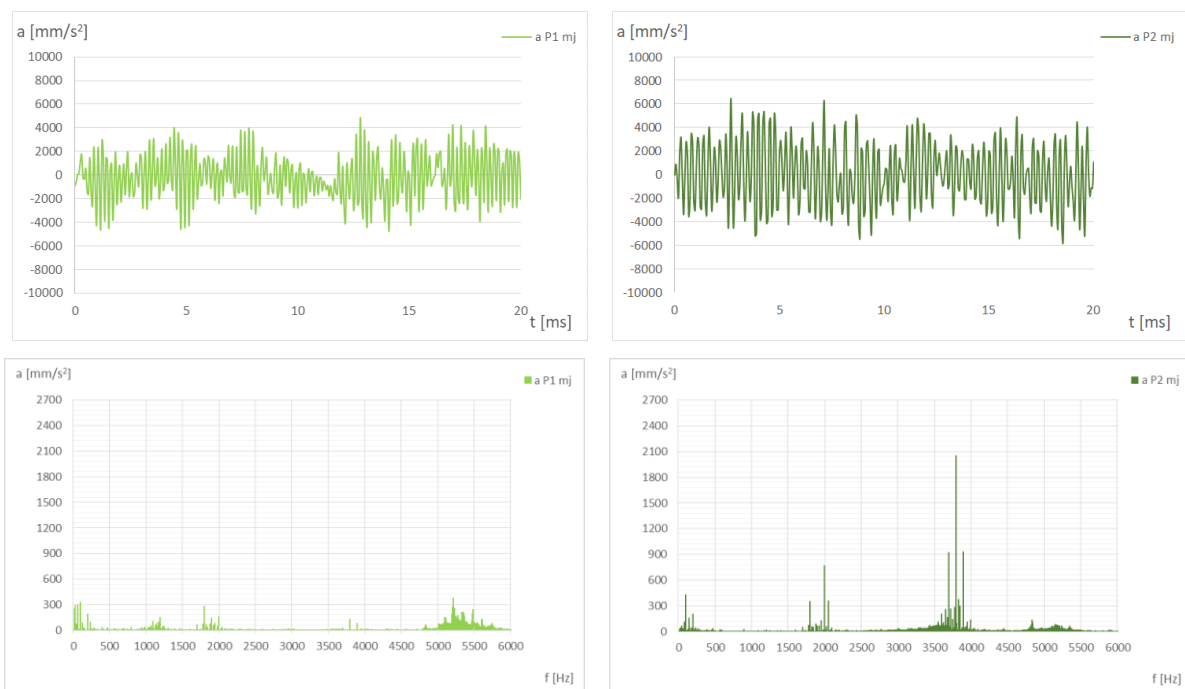
Usporedbom valnih oblika akceleracije snimljenih na lokacijama  $P1$  i  $P2$ , za dvije situacije prikazane slikama 6.37 i 6.38, moguće je uočiti kako su vibracije većih amplituda prisutne u slučaju kad struje teku kroz namote faza  $B$  i  $C$ . Ovo je u skladu s rezultatima sila određenih na temelju mjerenja napona induciranih u mjernim svitcima (slike 6.33 do 6.35), kod kojih su na lokaciji  $Ms5$  (ispod lokacije akcelerometra  $P2$ ) uočeni najveći iznosi sile upravo za slučaj protjecanja struja kroz ove faze.





Slika 6.39 Izmjerene valni oblici akceleracija na mjestima *P1* i *P2* paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$  uz faze *B-C* protjecane strujom

Slikom 6.39 prikazane su snimljene akceleracije na lokacijama *P1* i *P2* za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ , pri čemu struja teče kroz namote faza *B* i *C*. Uočava se izraženija valovitost akceleracije, od one pri manjoj snazi  $S=52\text{ kVA}$ . I ovo je u skladu s rezultatima dobivenih obradom induciranih napona mjernih svitaka, po kojima iznos sila na zube raste s povećanjem opterećenja.



Slika 6.40 Izmjerene valni oblici akceleracija na mjestima *P1* i *P2* paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=0,08$  uz faze *B-C* protjecane strujom

Slikom 6.40 prikazane su snimljene akceleracije na lokacijama *P1* i *P2* za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=0,08$ , pri čemu struja teče kroz namote faza *B* i *C*. Uočava se kako su vibracije manjeg iznosa od onih pri radnom faktoru snage  $\cos\varphi=1$ . Ovo je u skladu s rezultatima obrade induciranih napona mjernih svitaka, po kojima sile manjih iznosa djeluju na zube u zoni senzora *P2* kod induktivnog opterećenja.

Za svako izmjereno pogonsko stanje generatora provedena je harmonijska analiza valnih oblika akceleracija snimljenih na sve četiri mjerene lokacije. Uslijed mehaničke komponente vibracija, koja značajno utječe na sveukupni valni oblik, analiziran je harmonik frekvencije 100 Hz, za koji je utvrđeno da se značajno mijenja s promjenom opterećenja. Tablicom 6.8 prikazane su utvrđene amplitude ovog harmonika.

Tablica 6.8 Amplitude osnovnog harmonika akceleracije (100 Hz) izmjerene na četiri analizirane lokacije za nesimetrična pogonska stanja generatora

| Akceleracije vibracija – Amplitude harmonika na 100 Hz |                 |              |                      |              |  |                                  |                                  |  |                                           |                   |                                  |                                  |  |                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|--|----------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------------------------|
|                                                        | Pogonsko stanje |              |                      |              |  | Mjesta na paketu                 |                                  |  |                                           | Mjesta na kućištu |                                  |                                  |  |                                           |
| Red.br.                                                | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | Akt.<br>faze |  | $a_{p1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{p2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $\bar{a}_{p\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |                   | $a_{K1}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{K2}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |  | $\bar{a}_{K\ sr}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] |
| 1.                                                     | 400             | 52           | 0,08                 | $B-C$        |  | 153                              | 287                              |  | 220                                       |                   | 138                              | 260                              |  | 199                                       |
| 2.                                                     | 400             | 52           | 0,70                 | $B-C$        |  | 261                              | 226                              |  | 244                                       |                   | 113                              | 160                              |  | 137                                       |
| 3.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | $B-C$        |  | 352                              | 153                              |  | 253                                       |                   | 100                              | 98                               |  | 99                                        |
| 4.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | $A-C$        |  | 91                               | 346                              |  | 219                                       |                   | 149                              | 290                              |  | 220                                       |
| 5.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | $A-B$        |  | 360                              | 199                              |  | 280                                       |                   | 108                              | 248                              |  | 178                                       |
| 6.                                                     | 400             | 90           | 0,7                  | $B-C$        |  | 385                              | 300                              |  | 343                                       |                   | 105                              | 274                              |  | 190                                       |
| 7.                                                     | 400             | 104          | 0,08                 | $B-C$        |  | 331                              | 427                              |  | 379                                       |                   | 161                              | 435                              |  | 298                                       |
| 8.                                                     | 400             | 104          | 0,70                 | $B-C$        |  | 437                              | 331                              |  | 384                                       |                   | 104                              | 315                              |  | 210                                       |
| 9.                                                     | 400             | 104          | 1,00                 | $B-C$        |  | 653                              | 264                              |  | 459                                       |                   | 94                               | 303                              |  | 199                                       |
| 10.                                                    | 400             | 104          | 1,00                 | $A-B$        |  | 520                              | 246                              |  | 383                                       |                   | 128                              | 376                              |  | 252                                       |

Analizom izmjerenih rezultata vezanih za vibracije nesimetričnih pogonskih stanja, utvrđene su sljedeće pravilnosti prethodno zamijećene temeljem rezultata proračuna:

- vibracije rastu s porastom prividne izlazne snage;
- vibracije se mijenjaju s promjenom faktora snage;
- vibracije pojedinih mjesta paketa i kućišta međusobno se razlikuju;
- amplituda osnovnog harmonika akceleracija frekvencije 100 Hz značajno se mijenja s promjenom nesimetričnog pogonskog stanja.
- amplituda harmonika akceleracija frekvencije 100 Hz korelira s rezultatima električnih mjerenja;
- što je veći iznos sile utvrđen za zub ispod lokacije *P2* (na osnovi mjerenja induciranog napona), to su na toj lokaciji izmjerene i veće vibracije.

## **7. Usporedba rezultata određenih proračunima i mjerenjima**

U ovom poglavlju dan je kratki pregled usporedbe rezultata određenih MKE proračunima i mjerenjem na generatoru za nekoliko karakterističnih pogonskih stanja. U nastavku su prikazani rezultati usporedbe za:

- vrijednosti određenih vlastitih frekvencija;
- prazni hod pri naponu 400 V;
- simetrično opterećenje uz  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ;
- nesimetrično opterećenje uz  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$  i struju kroz namote faza  $B$  i  $C$ .

### **7.1 Usporedba vlastitih frekvencija statora generatora određenih proračunom i mjerenjem**

Mehaničkim proračunima moguće je utvrditi rezultate usporedive s izmjerenim vrijednostima, ukoliko se ispune sljedeći uvjeti:

- poklapanje geometrije stvarnog stroja i modela;
- poklapanje karakteristika materijala;
- ispravno definiranje spojeva među različitim dijelovima konstrukcije;
- ista vrsta i mjesto pobude.

Provjera ispravnosti modela po pitanju geometrije, upotrijebljenih materijala i vrste spojeva može se utvrditi usporedbom vlastitih frekvencija analizirane konstrukcije. U nastavku je dana tablica s usporedno prikazanim vrijednostima vlastitih frekvencija određenih mjerenjem i proračunom za geometriju kućišta i paketa statora u centralnoj zoni analiziranog sinkronog generatora.

Pregledom rezultata uočava se dobro poklapanje vlastitih frekvencija vezanih za paket statora unutar raspona frekvencija 0 - 1600 Hz. Ovo ukazuje da je izrađenim 2D modelom moguće odrediti vibracijski odziv paketa statora na magnetski uzrokovane sile (mjesto mjerenja označena sa  $P1$  i  $P2$ ), unutar navedenog raspona frekvencije.

Dobro poklapanje računskih i izmjerenih vlastitih frekvencija vanjskih dijelova kućišta postoji na desetak frekvencija. No mjerenjem u opsegu 0 - 6000 Hz utvrđene su i dodatne vlastite frekvencije kućišta. Ovo je očekivani rezultat, budući da je geometrija kućišta stvarnog stroja značajno kompleksnija od one obuhvaćene mehaničkim 2D modelom. No ovo ujedno znači i da se mogu očekivati veća odstupanja izračunatih vibracija vanjskih dijelova samog kućišta od stvarno izmjerenih vrijednosti (mjesto označena sa  $K1$  i  $K2$ ).

Tablica 7.1 Usporedba izmjerenih i izračunatih vlastitih frekvencija kućišta i paketa statora u centralnoj zoni stroja

| Vlastite frekvencije $f_{vl}$ [Hz] |          |          |  |         |          |          |  |         |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|--|---------|----------|----------|--|---------|----------|----------|
| Red.br.                            | Mjerenje | Proračun |  | Red.br. | Mjerenje | Proračun |  | Red.br. | Mjerenje | Proračun |
| 1                                  | 77       | 77       |  | 11      |          | 716      |  | 21      | 1168     |          |
| 2                                  |          | 157      |  | 12      |          | 736      |  | 22      | 1224     | 1234     |
| 3                                  | 164      | 163      |  | 13      | 753      | 767      |  | 23      | 1255     | 1248     |
| 4                                  | 197      |          |  | 14      |          | 801      |  | 24      |          | 1288     |
| 5                                  | 246      |          |  | 15      | 841      | 870      |  | 25      | 1292     | 1295     |
| 6                                  | 339      |          |  | 16      | 901      | 913      |  | 26      | 1393     |          |
| 7                                  | 465      |          |  | 17      | 952      |          |  | 27      |          | 1454     |
| 8                                  | 545      | 537      |  | 18      | 973      |          |  | 28      | 1473     | 1473     |
| 9                                  | 601      | 566      |  | 19      | 1029     |          |  | 29      | 1530     |          |
| 10                                 | 689      | 705      |  | 20      | 1119     | 1076     |  | 30      | 1581     | 1572     |

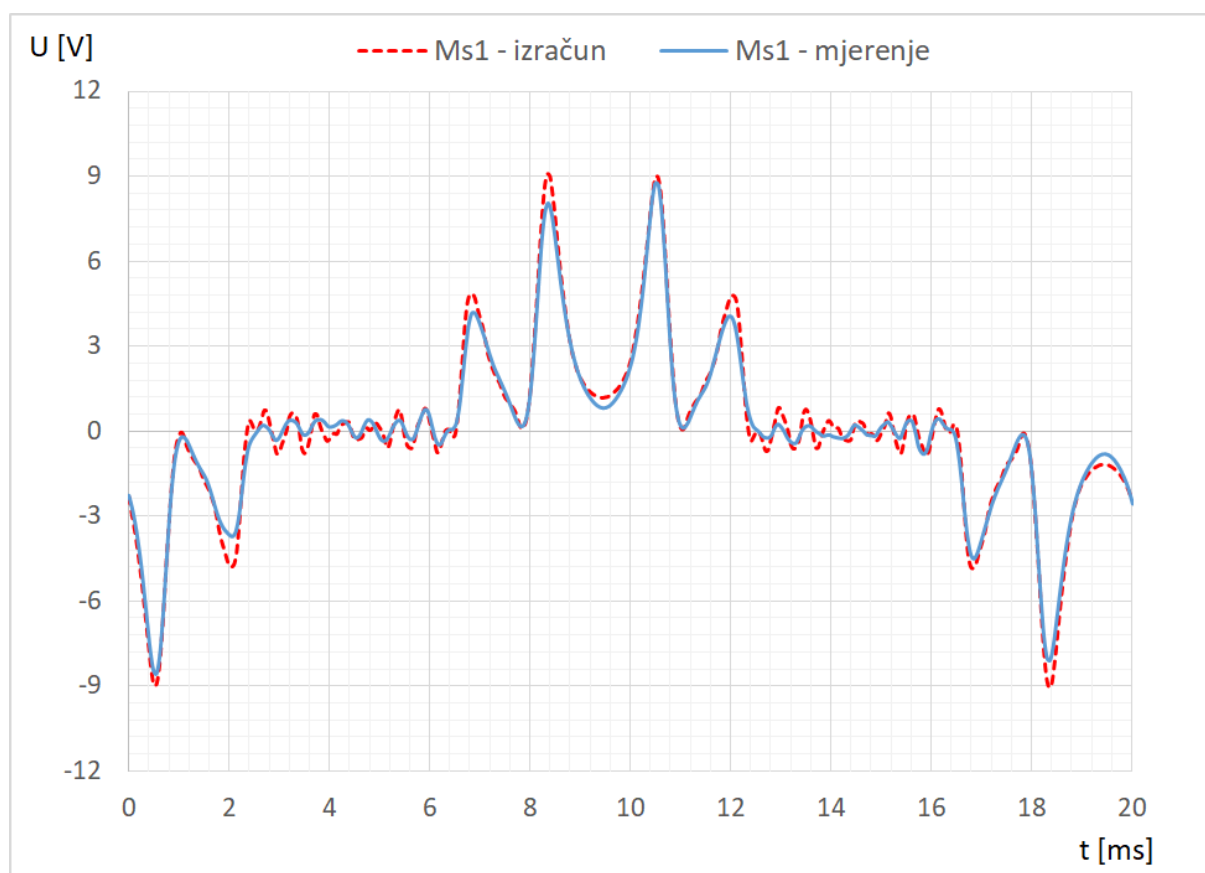
\* Plavom pozadinom označene su vlastite frekvencije paketa statora

\* Narančastom bojom označene su vlastite frekvencije kućišta, bliske pobudnim silama

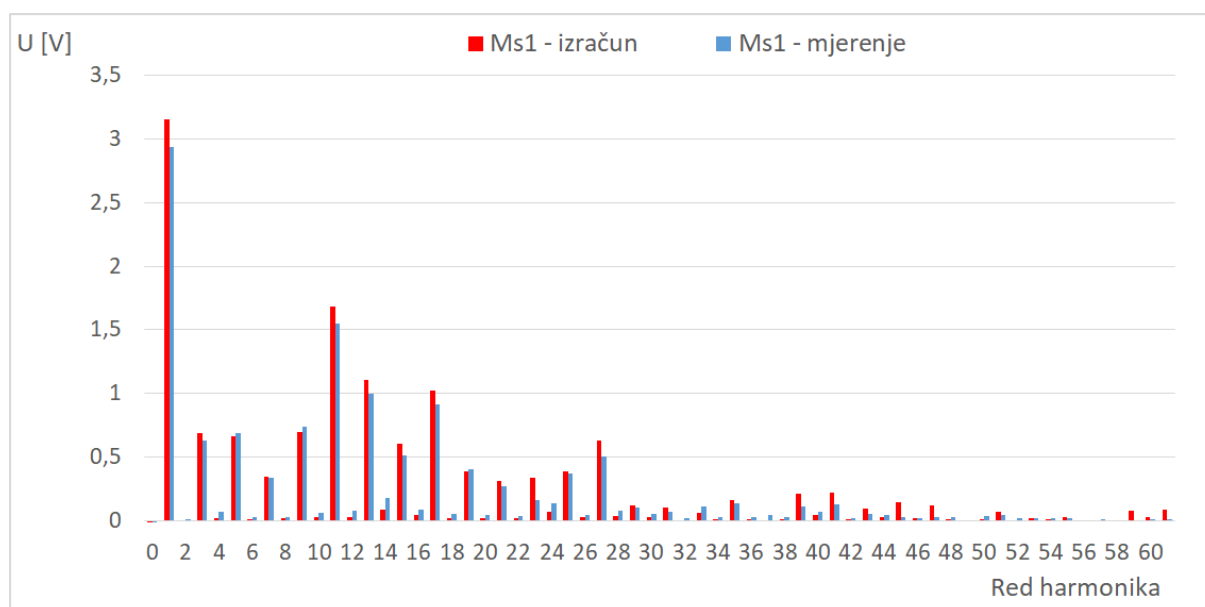
## 7.2 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za stanje praznog hoda

Prazni hod predstavlja jedno od osnovnih pogonskih stanja stroja, koje se često koristi za definiranje referentnih vrijednosti u analizama električnih sinkronih generatora. Za prvu usporedbu je stoga odabran prazni hod generatora, uz nazivnu vrijednosti linijskog napona od  $U=400$  V. Slika 7.1 prikazuje napone inducirane u mjernom svitku  $Ms1$  određene MKE proračunom i mjerenjem. Usporedba pokazuje dobro slaganje valnih oblika induciranog napona, dobivenih proračunom i mjerenjem. Istaknuti vrhovi valnog oblika napona međusobno su jednako razmaknuti i postoji fazno poklapanje manjih vrhova koji koreliraju s pozicijama utora prigušnog namota na obodu polne papuče. No postoji i odstupanje u iznosu amplitude pojedinih vrhova induciranog napona. Sličnost valnih oblika potkrepljuje i usporedba harmonijskog sastava prikazana slikom 7.2.

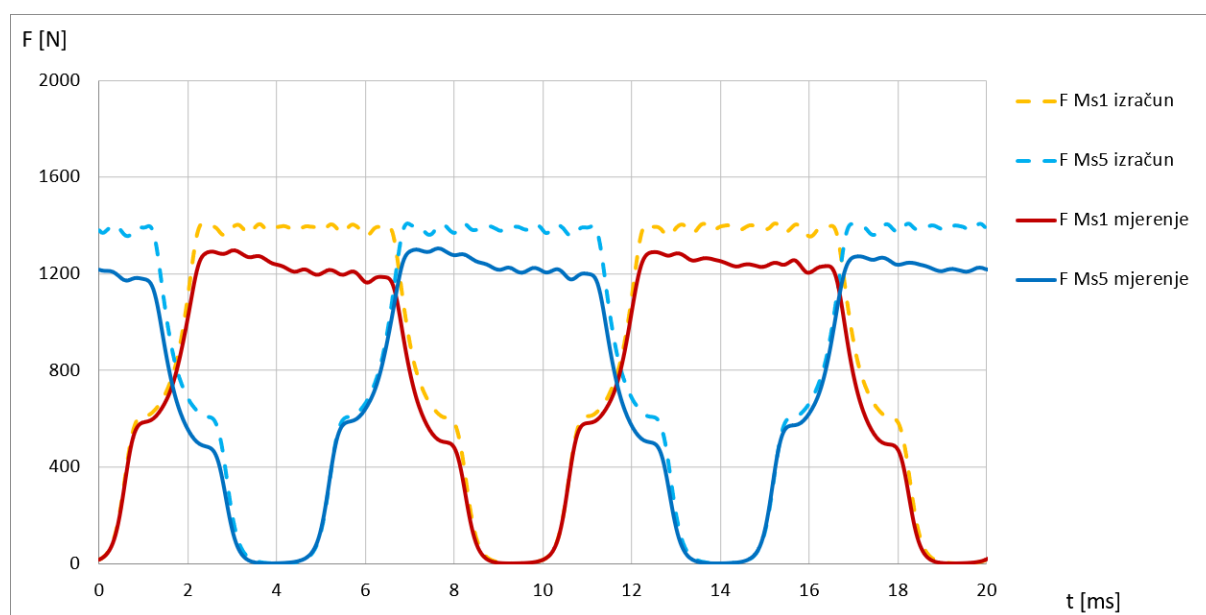
Slikama 7.3 i 7.4 dana je usporedba valnih oblika radijalnih sila dobivenih obradom valnih oblika izračunatog i izmjerenog induciranog napona svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$ . Pregledom ovih oblika uočava se poklapanje harmonijskog sastava i konstantna razlika amplitude.



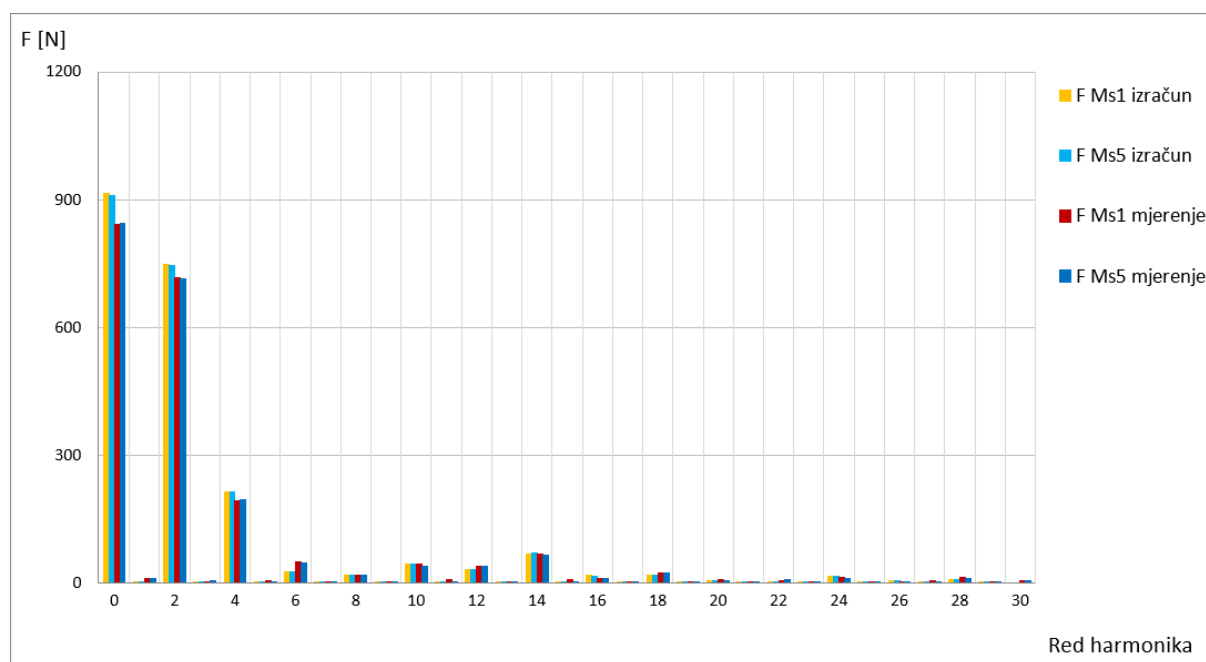
Slika 7.1 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



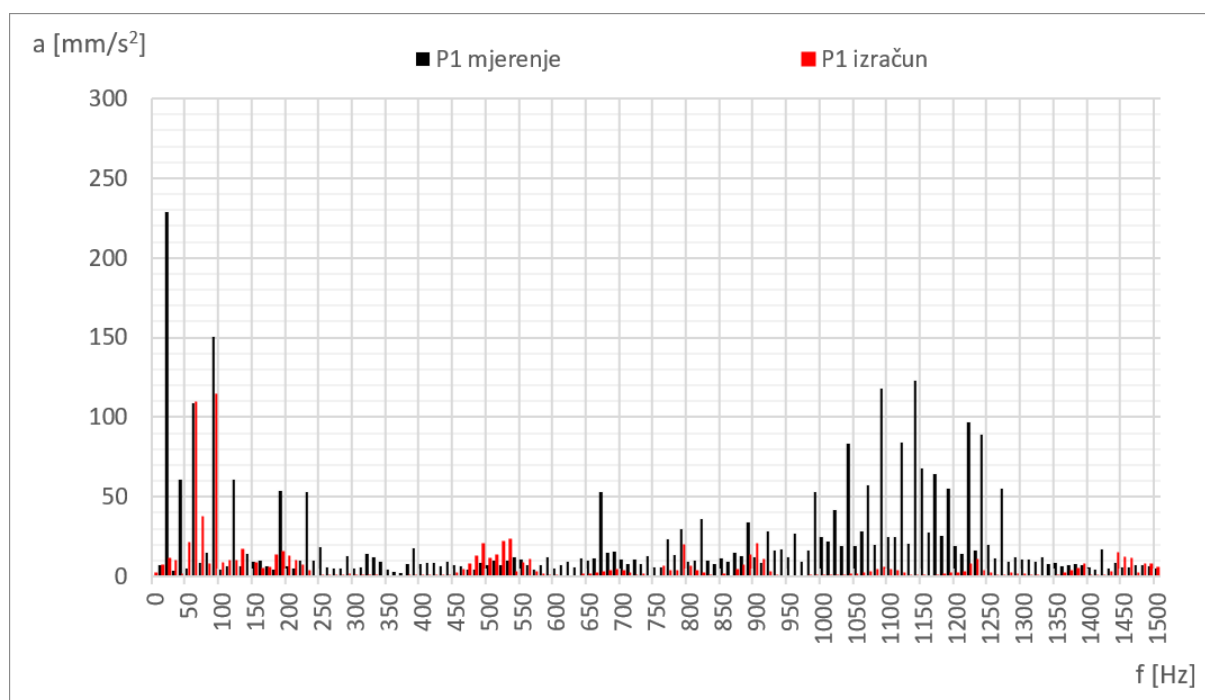
Slika 7.2 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



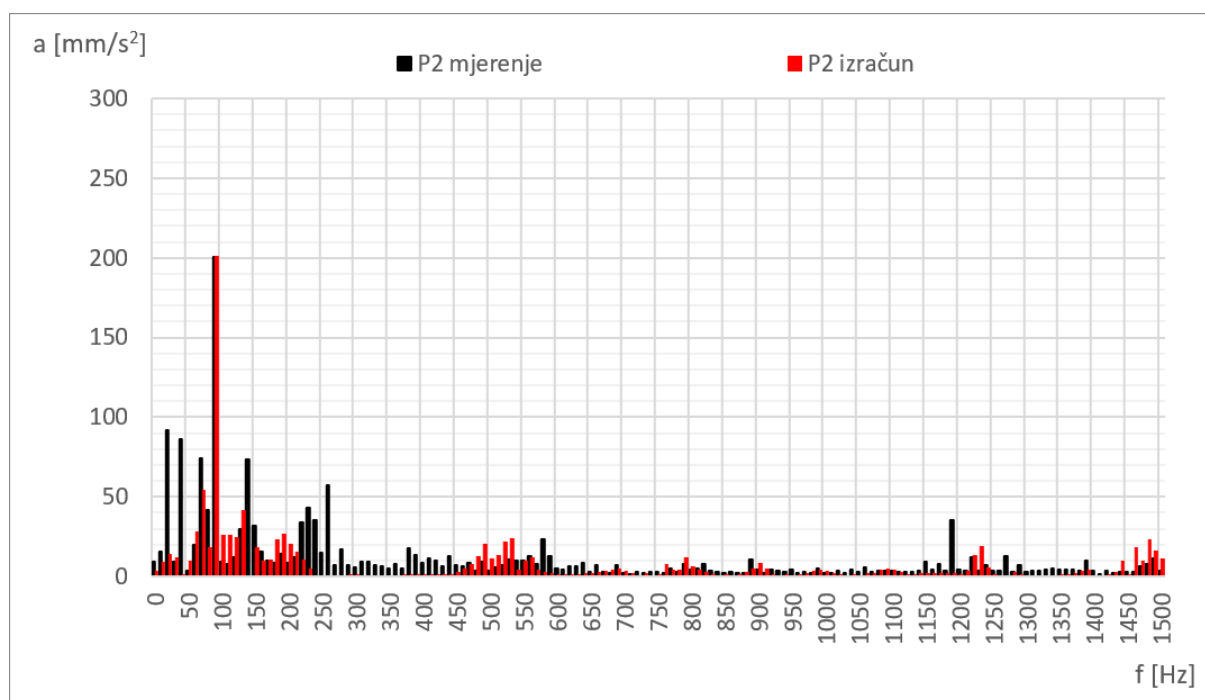
Slika 7.3 Usporedba valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  za prazni hod uz  $U=400$  V



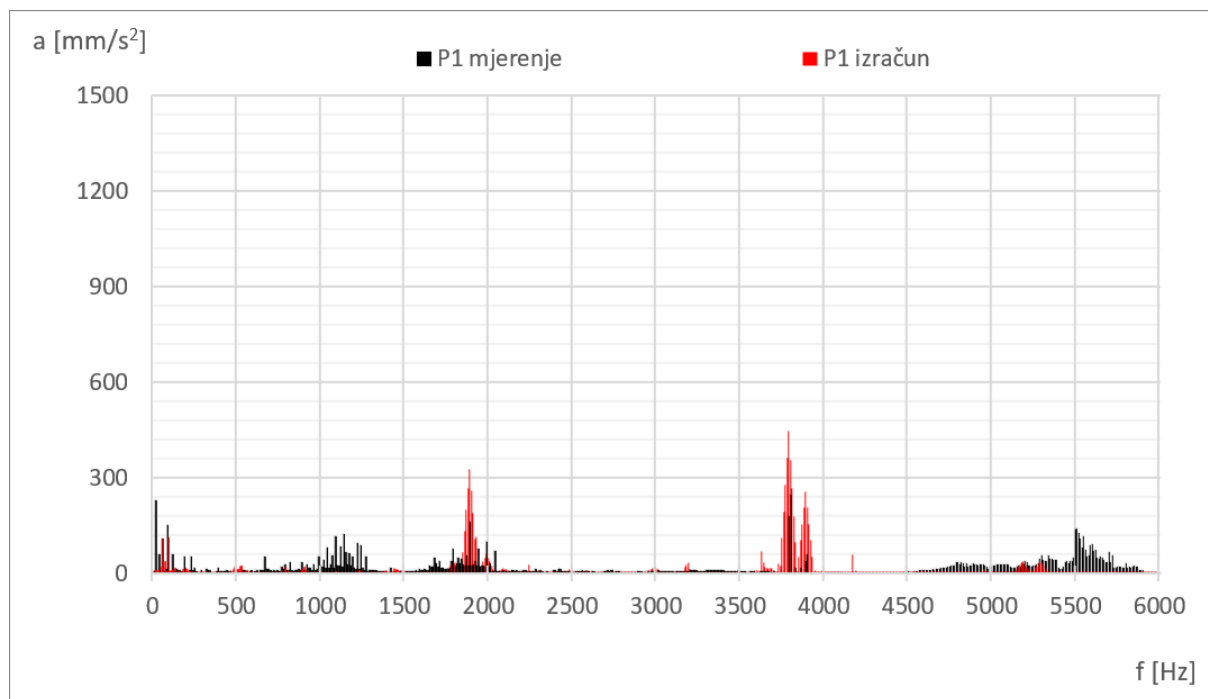
Slika 7.4 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



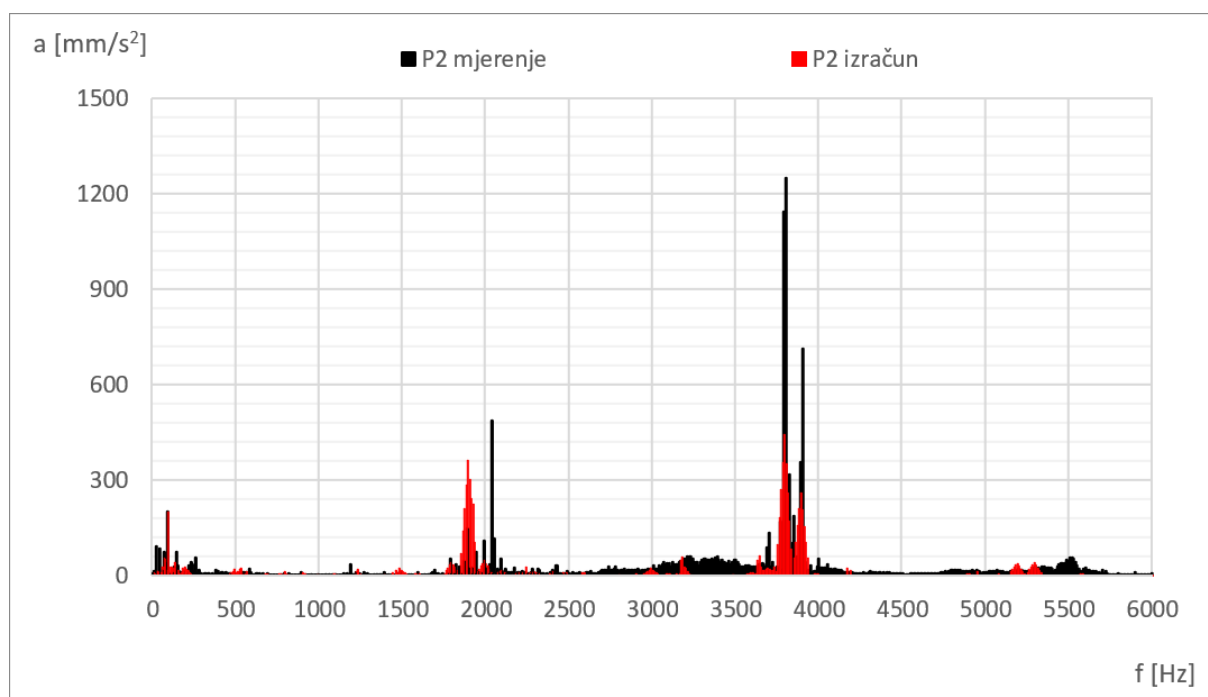
Slika 7.5 Spektralni prikaz akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na mjestu *P1* za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



Slika 7.6 Spektralni prikaz akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na mjestu *P2* za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



Slika 7.7 Spektralni frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na mjestu *P1* za prazni hod generatora uz  $U=400$  V



Slika 7.8 Spektralni frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na mjestu *P2* za prazni hod generatora uz  $U=400$  V

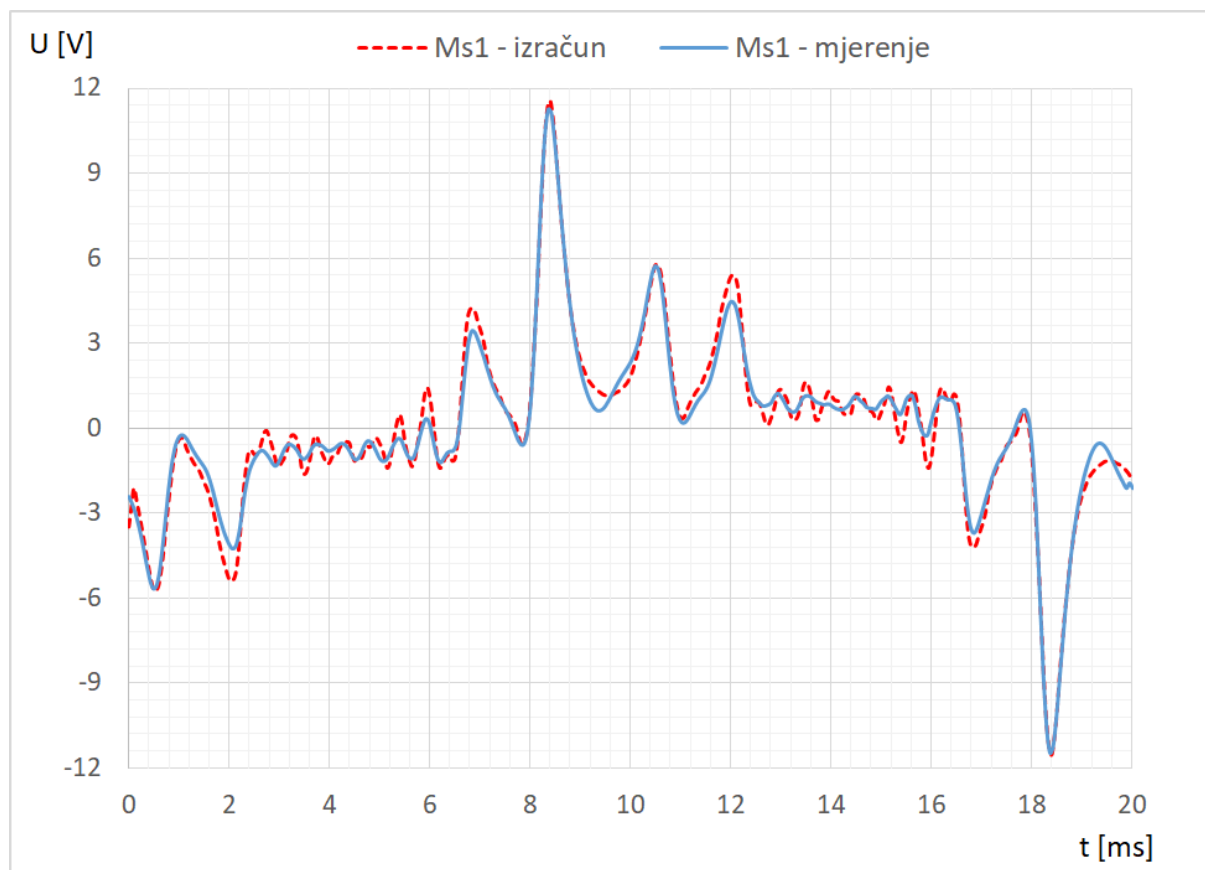


Slikama 7.5 i 7.7 prikazan je spektar frekvencija akceleracija na poziciju *P1* dobiven MKE proračunom i mjerenjem, a slikama 7.6 i 7.8 na poziciji *P2*. U oba slučaja uočava se pojava istaknutih harmonika na 75, 100, 1900, 3800 i 3900 Hz. Dobro poklapanje amplituda izračunatih i izmjerenih harmonika vibracija ostvaruje se na frekvencijama 75 i 100 Hz. Viši harmonici pojavljuju se na istim frekvencijama, no dok su rezultati proračuna ujednačeni za lokacije *P1* i *P2*, rezultati mjerenja pokazuju značajne razlike u amplitudama ovih harmonika. Kod istaknutih harmonika na 3800 i 3900 Hz, senzorom *P1* izmjerene su oko 2 puta manje, a senzorom *P2* oko 3 puta veće amplitude od izračunatih. Mogući uzrok ovakvih razlika su drugačije krutosti konstrukcije kućišta na mjestima *P1* i *P2*, koje utječu na harmonijski odziv mehaničkog sustava. Mjerenjima određene akceleracije sadrže dodatne niže i više harmonike, koji nisu obuhvaćeni izračunatim spektrom. Ovo je očekivana pojava, budući da usporedba vlastitih frekvencija određenih proračunom i mjerenjem ukazuje na to da stvarna konstrukcija ima veći spektar vlastitih frekvencija od korištenog pojednostavljenog 2D proračunskog modela. Radi boljeg poklapanja s mjerenjem, trebalo bi upotrijebiti složeniji 3D model za mehaničke proračune.

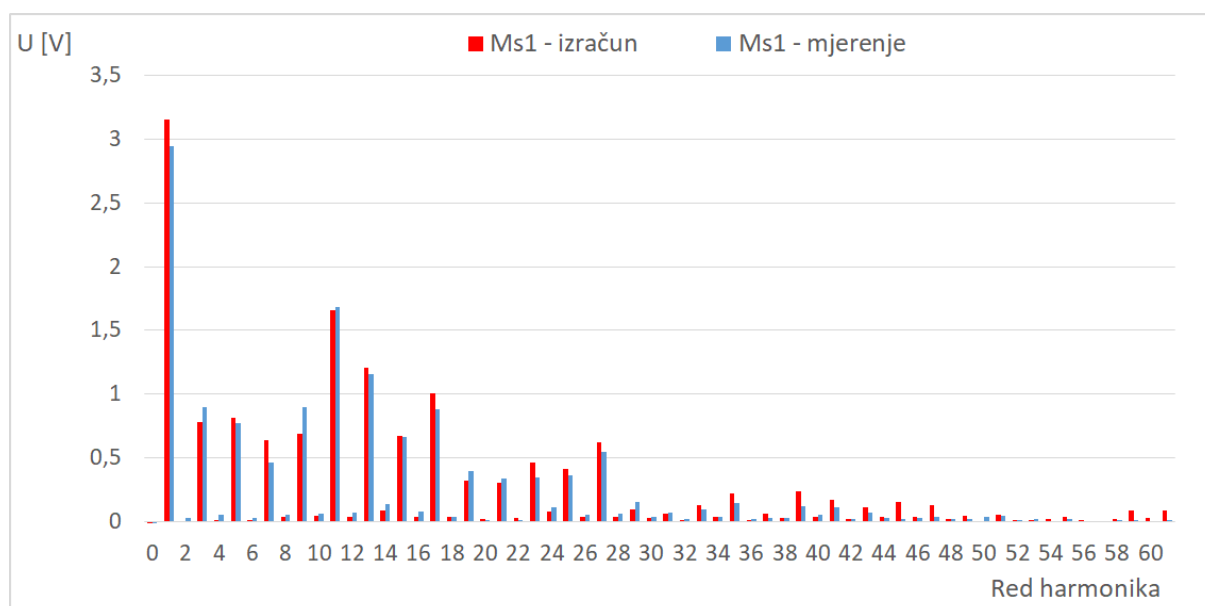
### ***7.3 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za simetrično opterećenje***

Simetrično trofazno opterećenje opisano parametrima  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$  odabrano je za drugu usporedbu. Slika 7.9 prikazuje napone inducirane u mjernom svitku *Ms1*, određene MKE proračunom i mjerenjem. Usporedba pokazuje dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku, kao i u slučaju praznog hoda. Istaknuti vrhovi valnog oblika međusobno su jednako razmaknuti te postoji fazno poklapanje manjih vrhova koji koreliraju s pozicijama utora prigušnog namota na obodu polne papuče. Razlike amplituda pojedinih vrhova induciranog napona pojavljuju se na sličan način kao i u praznom hodu. Sličnost valnih oblika potkrepljuje i usporedba spektra harmonika prikazana slikom 7.10.

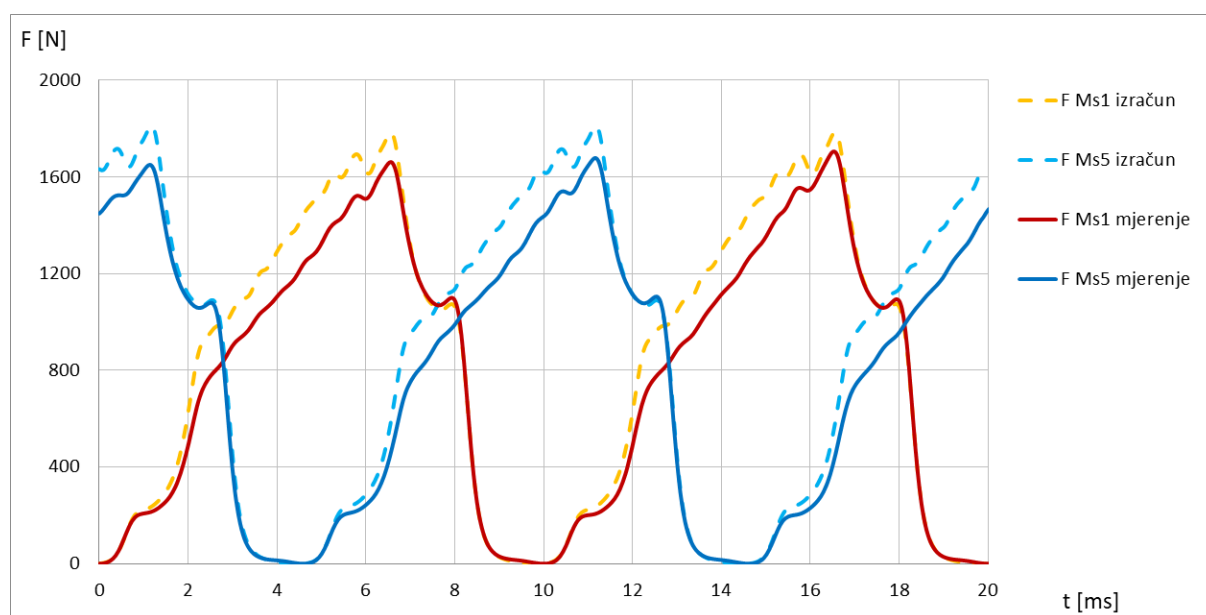
Slikama 7.11 i 7.12 dana je usporedba valnih oblika radijalne sile, dobivenih obradom izračunatog i izmjerenog induciranog napona mjernih svitaka *Ms1* i *Ms5*. U harmonijskom sastavu radijalnih sila uočava se dobro poklapanje frekvencija i razlike u amplitudama pojedinih harmonika.



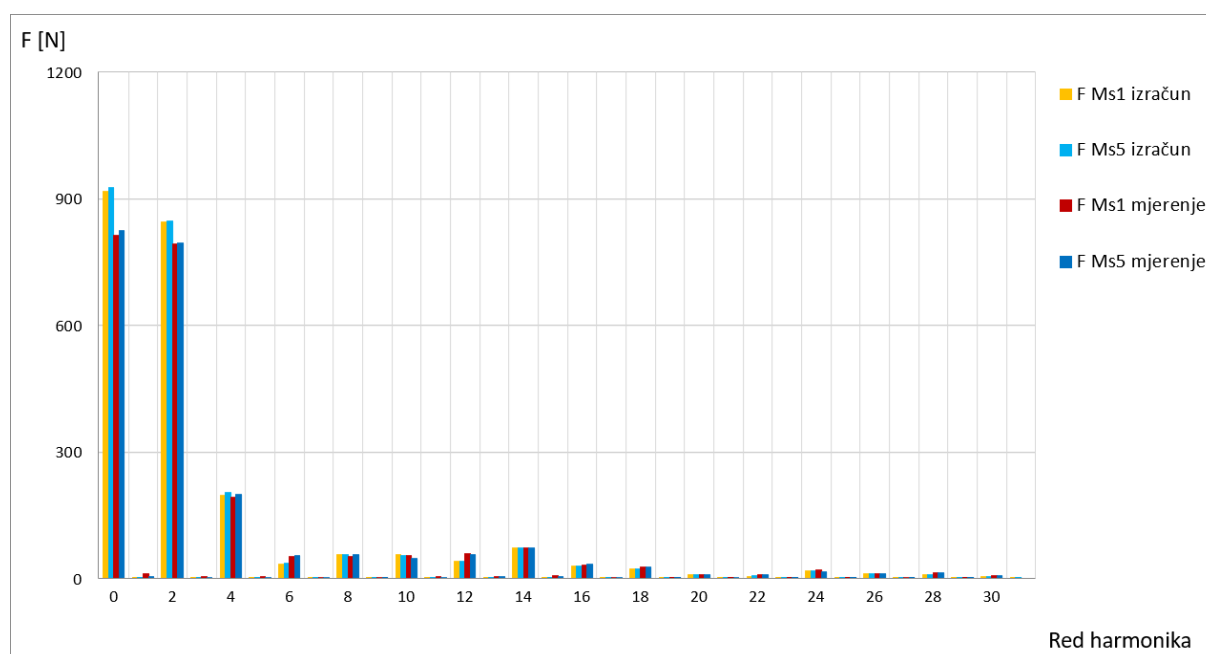
Slika 7.9 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.10 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.11 Usporedba valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  za simetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=180\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$



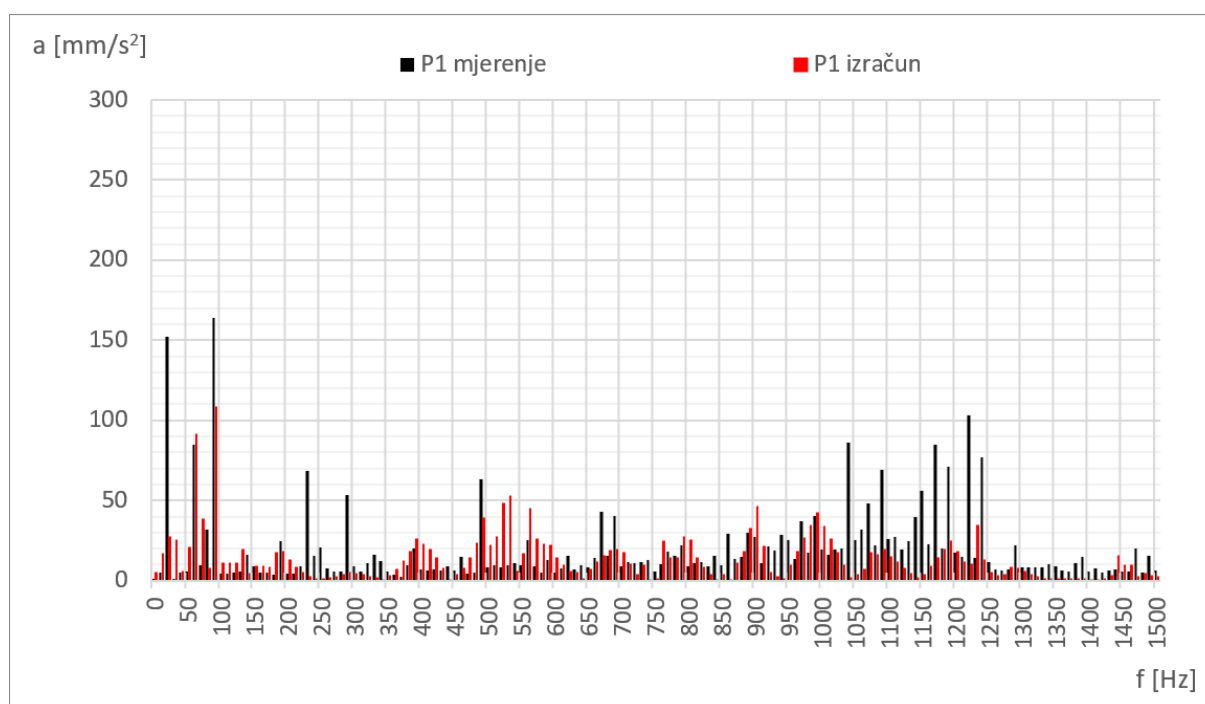
Slika 7.12 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određeni MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$  za simetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=180\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$

Slikama 7.13 i 7.15 prikazani su spektri frekvencija akceleracija na poziciji *P1* dobiveni MKE proračunom i mjerenjem, a slikama 7.14 i 7.16 na poziciji *P2*. U oba slučaja uočavaju se istaknuti harmonici na 75, 100, 1900, 2000, 3800 i 3900 Hz. Dobro poklapanje izračunatih i izmjerenih amplituda ostvaruje se na frekvencijama 75 i 100 Hz. Kao i u slučaju praznog hoda, viši harmonici proračunskih i izmjerenih rezultata pojavljuju se na istim frekvencijama, no dok su rezultati proračuna ujednačeni za lokacije *P1* i *P2*, mjerenjem su dobivene znatno različite amplitude ovih harmonika. Ove razlike posebice su uočljive kod istaknutih harmonika na 3800 i 3900 Hz, kod kojih su senzorom *P1* izmjerene oko 3 puta manje, a sa senzorom *P2* oko 3 puta veće amplitude od izračunatih. Navedene razlike veće su nego u praznom hodu generatora. Mjerenjima određene akceleracije sadrže dodatne niže harmonike i neke više harmonike koji nisu obuhvaćeni spektrom izračunatih rezultata. Ovo je očekivana pojava, budući da su harmonici istih frekvencija uočeni i u rezultatima mjerenja za prazni hod generatora.

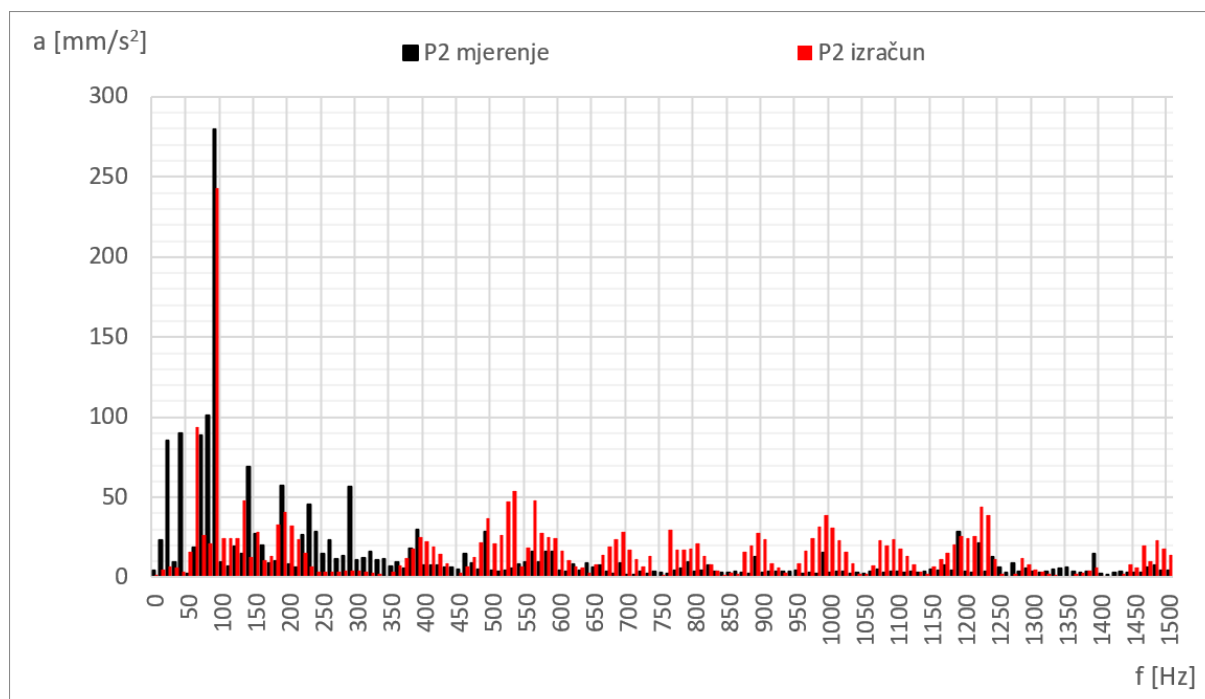
Tablicom 7.2 usporedno su prikazane izračunate i izmjerene vrijednosti amplituda harmonika frekvencije 100 Hz za sva analizirana pogonska stanja. Moguće je uočiti kako se na lokaciji *P2* postiže bolje poklapanje rezultata proračuna i mjerenja nego kod lokacije *P1*. Ovo je očekivani rezultat jer se lokacija *P1* u stvarnosti nalazi unutar priključne kutije i blizu priključnih sabirnica, tj. okružena dodatnim elementima čiji utjecaj nije uzet u obzir proračunskim modelom.

Tablica 7.2 Usporedba izračunatih i izmjerenih amplituda harmonika akceleracija na 100 Hz za lokacije *P1* i *P2* na paketu statora za analizirana simetrična radna stanja

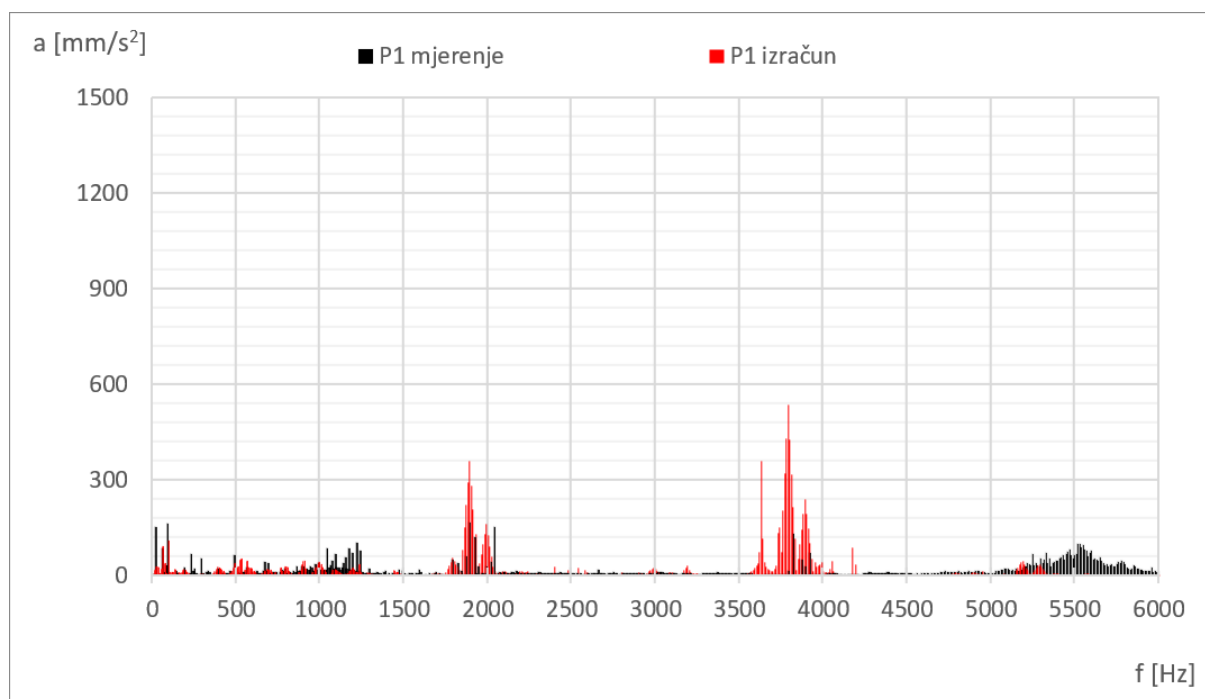
| Akceleracije vibracija – Amplitude harmonika na 100 Hz |            |              |                      |                                       |                                        |                        |                                       |                                        |                        |
|--------------------------------------------------------|------------|--------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| Pogonsko stanje                                        |            |              |                      | Mjesto na paketu <i>P1</i>            |                                        |                        | Mjesto na paketu <i>P2</i>            |                                        |                        |
| Red.br.                                                | $U$<br>[V] | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | $a_{izračun}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{mjerenje}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\Delta a_{p1}$<br>[%] | $a_{izračun}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{mjerenje}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\Delta a_{p2}$<br>[%] |
| 0.                                                     | 0          | 0            | -                    | -                                     | 7                                      | -                      | -                                     | 22                                     | -                      |
| 1.                                                     | 200        | 0            | -                    | 32                                    | 37                                     | -13,5                  | 63                                    | 47                                     | 34,0                   |
| 2.                                                     | 400        | 0            | -                    | 115                                   | 150                                    | -23,3                  | 201                                   | 202                                    | -0,5                   |
| 3.                                                     | 400        | 90           | 0,08                 | 91                                    | 167                                    | -45,5                  | 195                                   | 160                                    | 21,9                   |
| 4.                                                     | 400        | 90           | 0,70                 | 100                                   | 196                                    | -49,0                  | 196                                   | 183                                    | 7,1                    |
| 5.                                                     | 400        | 90           | 1,00                 | 112                                   | 161                                    | -30,4                  | 212                                   | 252                                    | -15,9                  |
| 6.                                                     | 400        | 180          | 0,08                 | 63                                    | 161                                    | -60,9                  | 186                                   | 150                                    | 24,0                   |
| 7.                                                     | 400        | 180          | 0,70                 | 92                                    | 186                                    | -50,5                  | 204                                   | 176                                    | 15,9                   |
| 8.                                                     | 400        | 180          | 1,00                 | 109                                   | 164                                    | -33,5                  | 243                                   | 279                                    | -12,9                  |



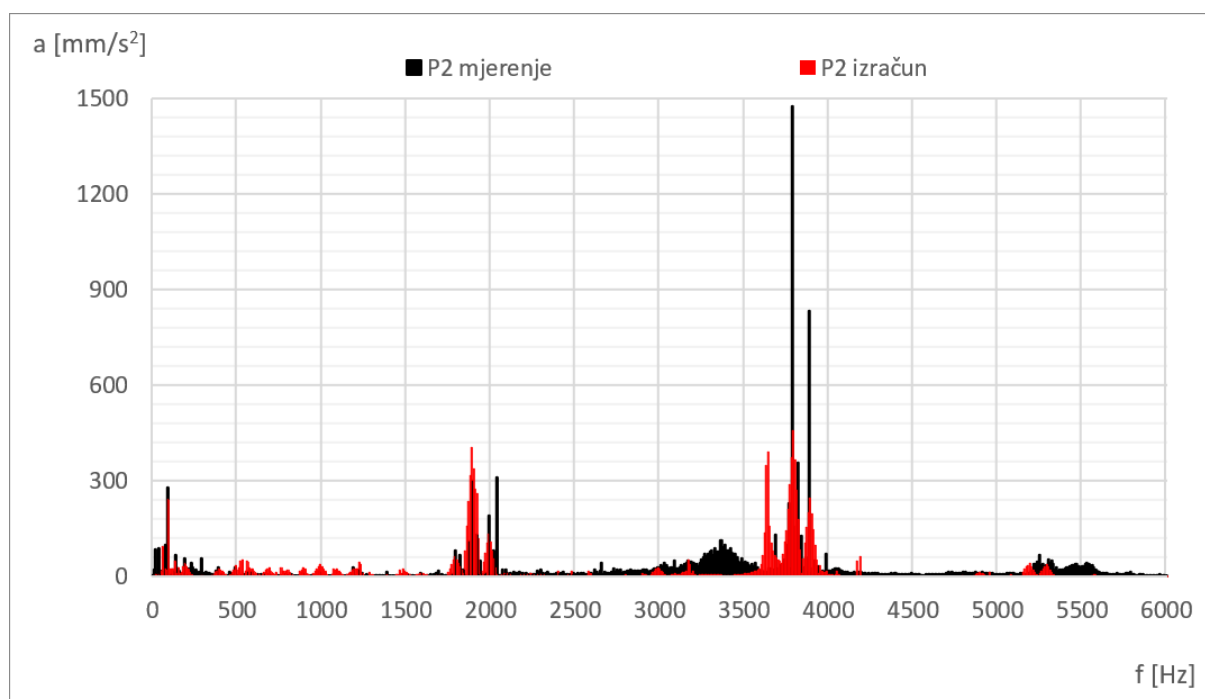
Slika 7.13 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu *P1* za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.14 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu *P2* za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.15 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu *P1* za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$

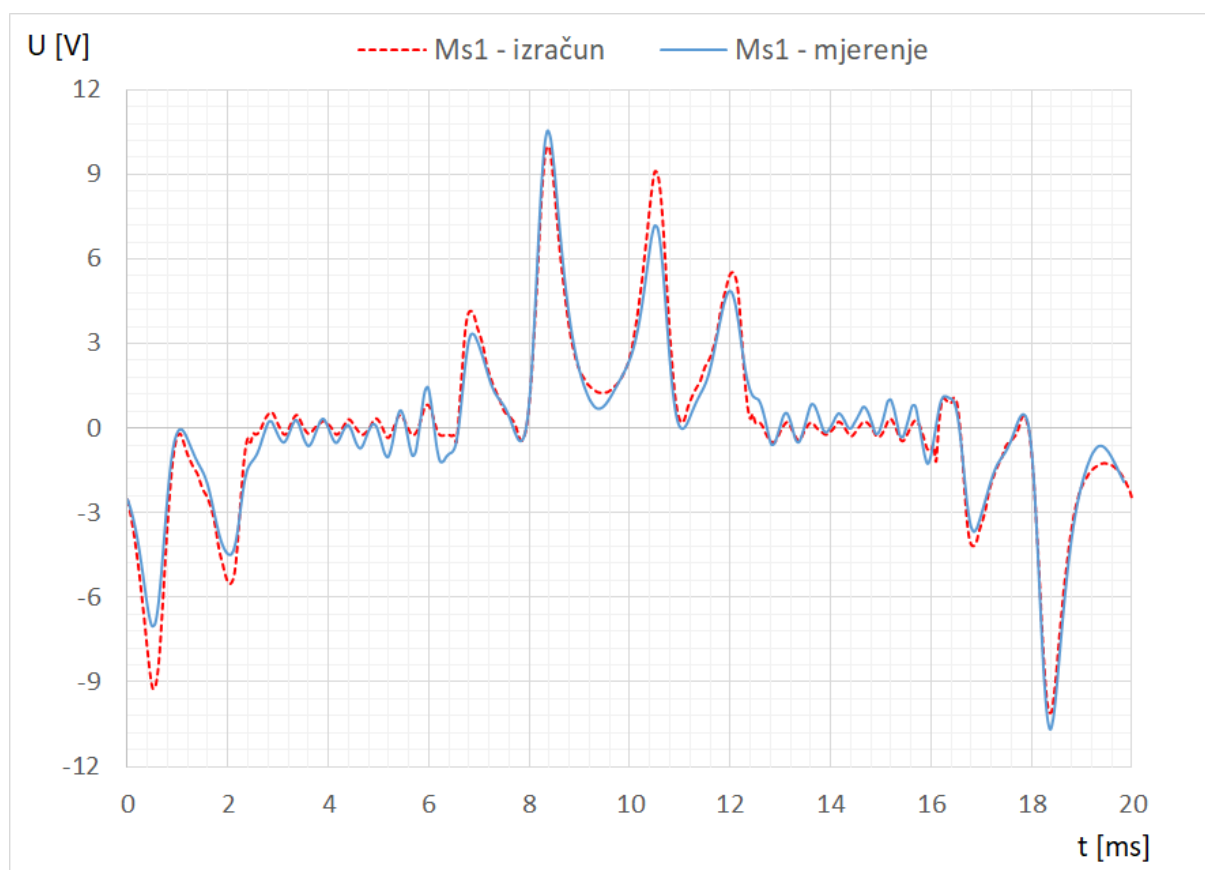


Slika 7.16 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu *P2* za simetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$

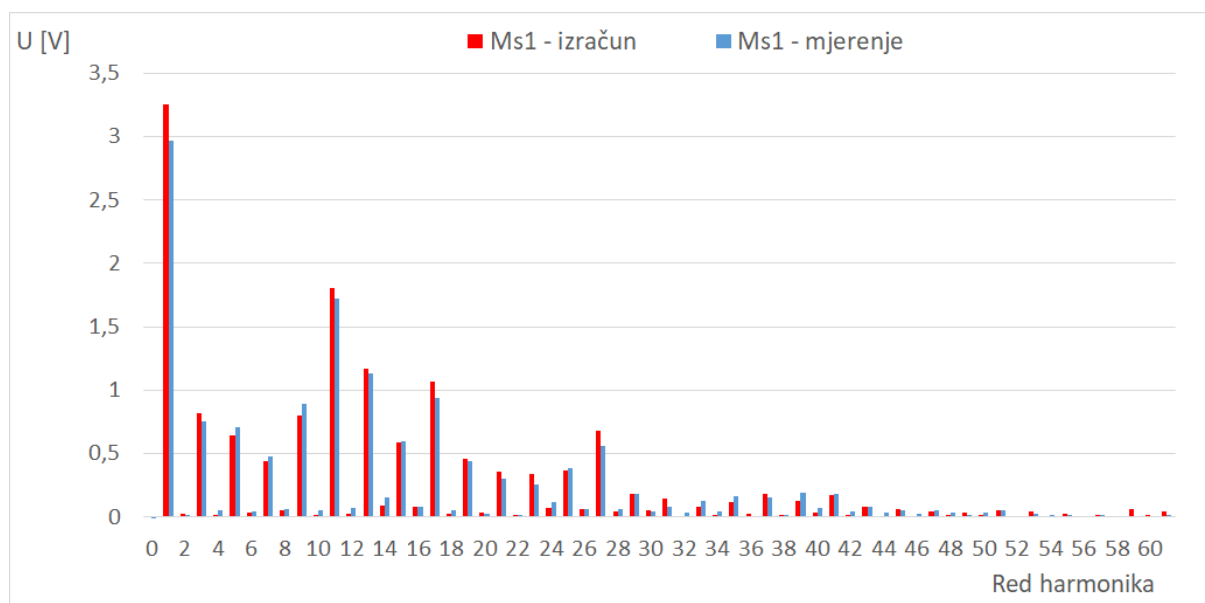
#### **7.4 Usporedba rezultata proračuna i mjerenja za električki nesimetrično opterećenje**

Nesimetrično dvofazno opterećenje opisano parametrima  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ , uz faze  $B$  i  $C$  protjecane strujom, odabrano je za treću usporedbu. U ovom pogonskom stanju kroz namote teče struja istog efektivnog iznosa  $I=260\text{ A}$ , kao i u prethodno prikazanom slučaju trofaznog simetričnog opterećenja. Slika 7.17 prikazuje napone inducirane u mjernom svitku  $Ms1$ , određene MKE proračunom i mjerenjem. Usporedba pokazuje dobro slaganje rezultata proračuna i mjerenja po valnom obliku, kao i u slučaju simetričnih opterećenja. Istaknuti vrhovi valnog oblika međusobno su jednako razmaknuti i postoji fazno poklapanje manjih vrhova, koji koreliraju s pozicijama utora prigušnog namota na obodu polne papuče. Odstupanja amplituda pojedinih vrhova induciranog napona prisutna su na sličan način kao u praznom hodu i pri simetričnom trofaznom opterećenju. Sličnost valnih oblika potkrepljuje i usporedba harmonijskog sastava prikazana slikom 7.18. Ista pravila podudarnosti vrijede i za valni oblik napona induciranog u mjernom svitku  $Ms5$ , prikazan slikama 7.19 i 7.20.

Na slikama 7.21 i 7.22 dana je usporedba valnih oblika radijalne sile, dobivenih obradom izračunatog i izmjerenog induciranog napona svitaka  $Ms1$  i  $Ms5$ . Pregledom ovih oblika sile uočava se dobro poklapanje harmonijskog sastava i razlike u amplitudama za izmjerene i izračunate vrijednosti. Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sile prikazane slikom 7.21. također se poklapaju.

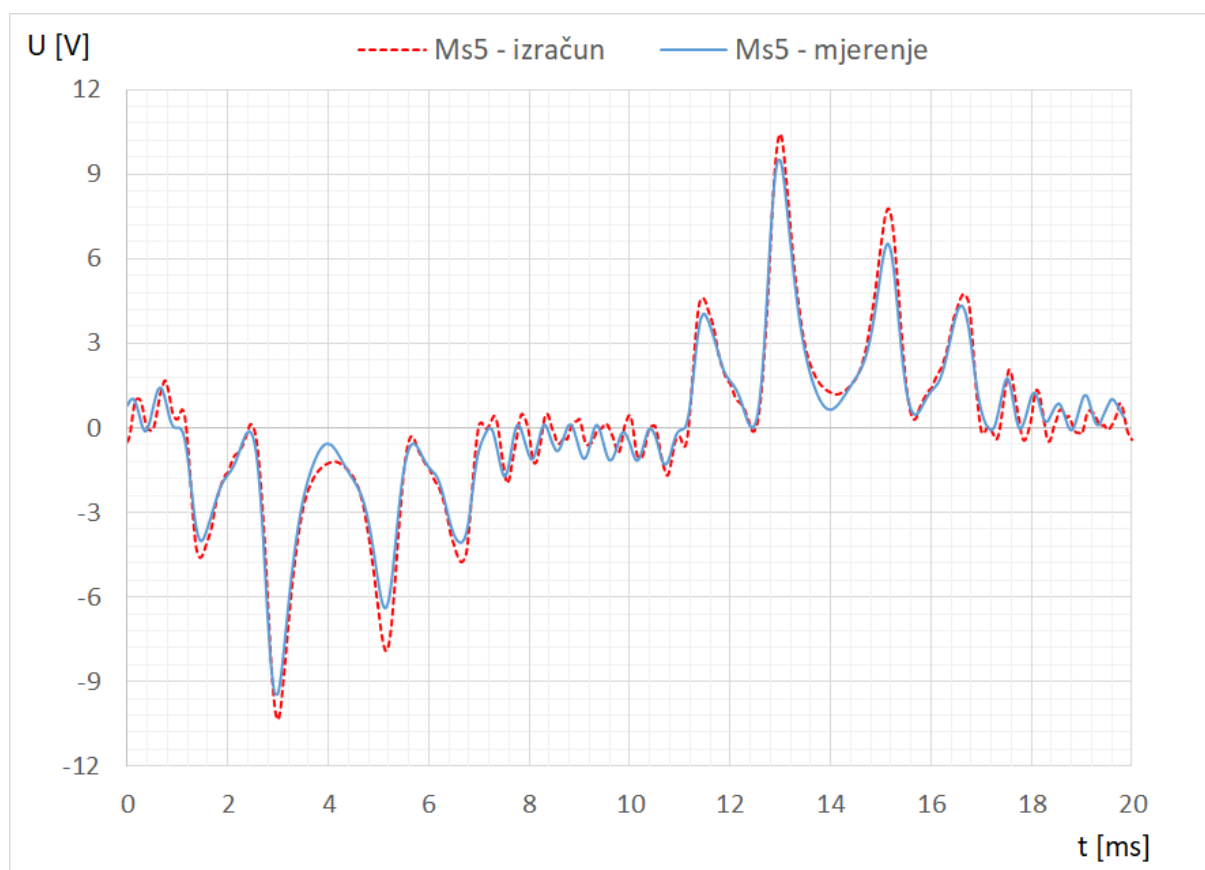


Slika 7.17 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$

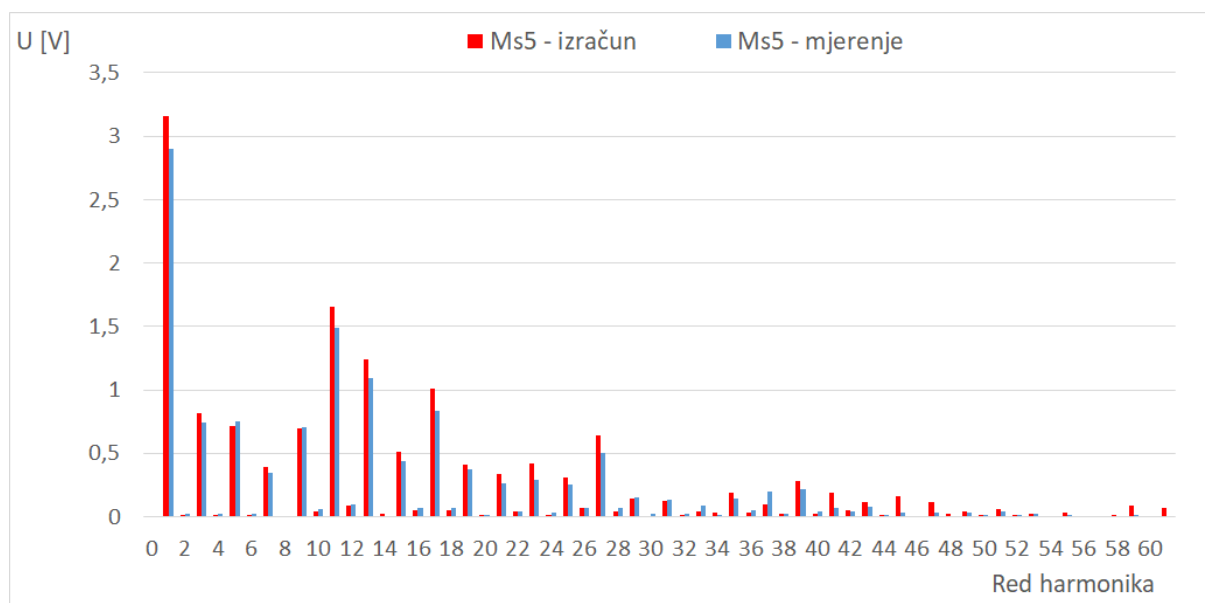


Slika 7.18 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku *Ms1* određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$

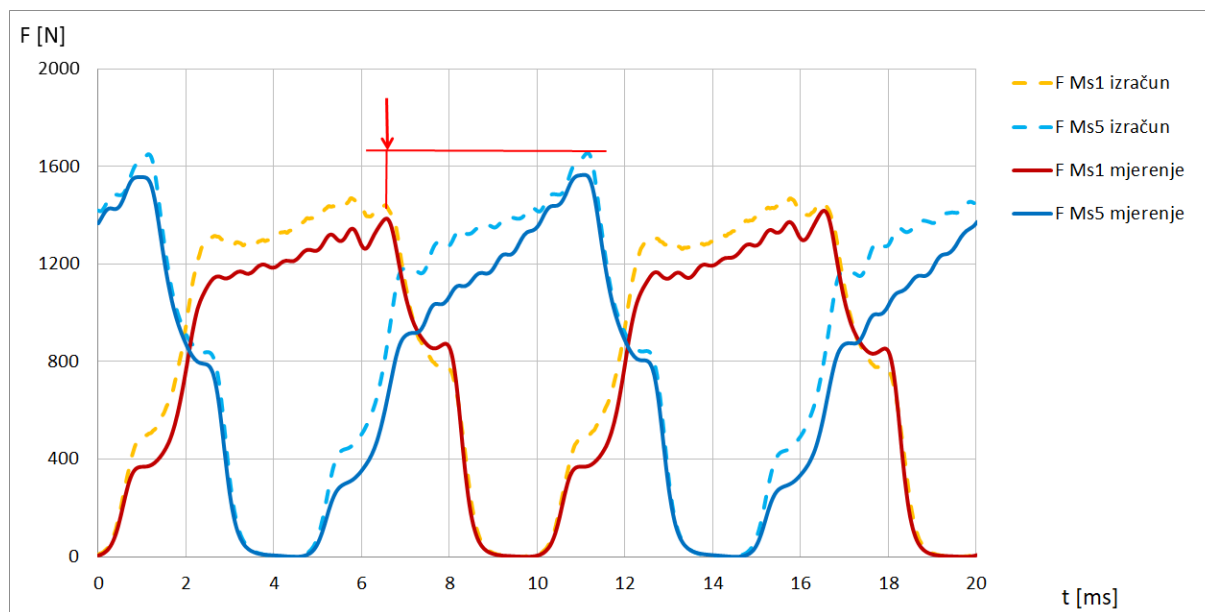




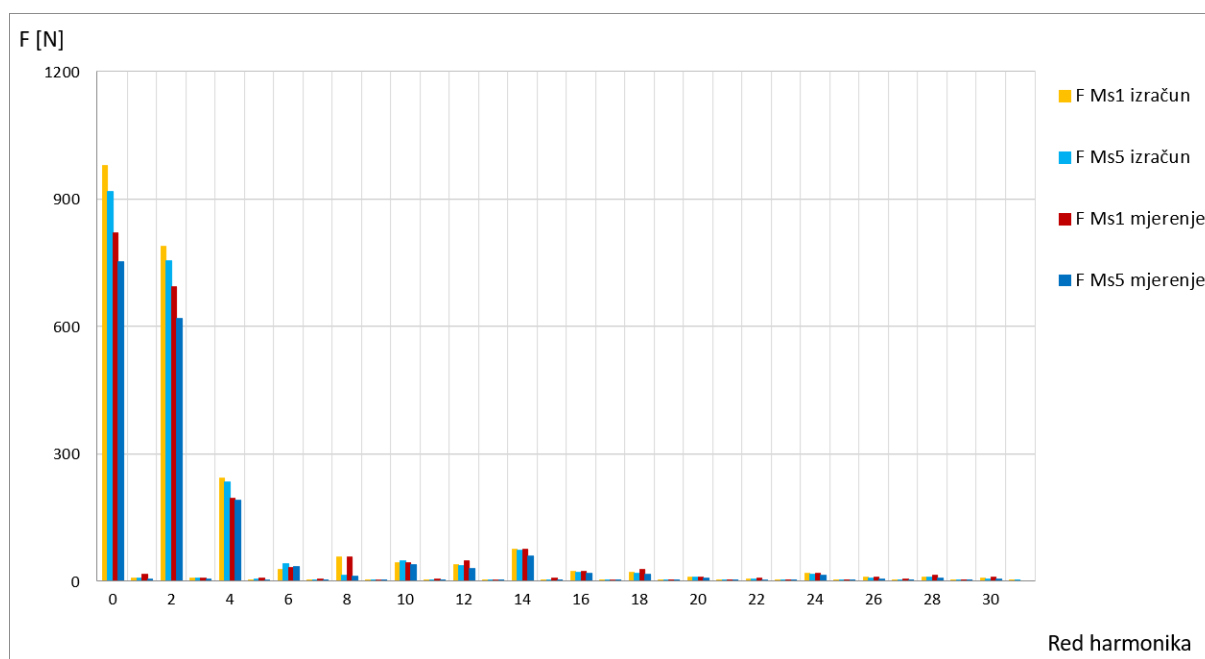
Slika 7.19 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku *Ms5* određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.20 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku *Ms5* određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.21 Usporedba valnih oblika radijalne sile na zube određenih MKE proračunom i na osnovi mjerenja napona mjernih svitaka *Ms1* i *Ms5* za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$



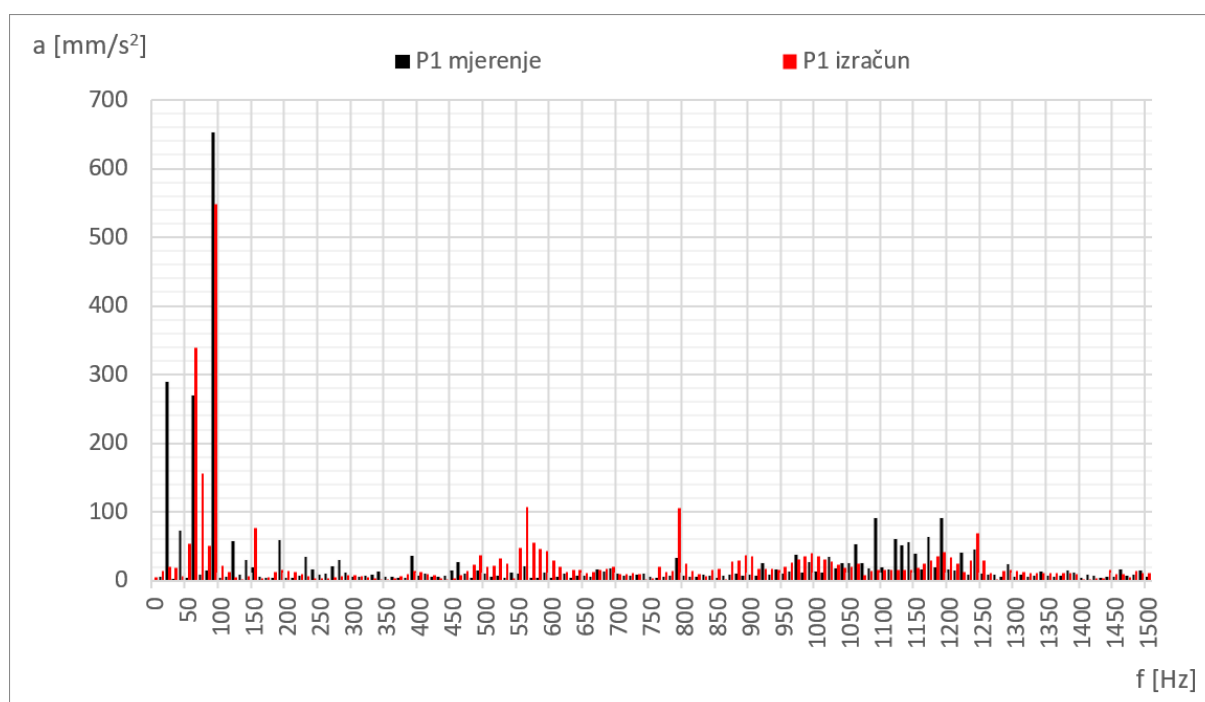
Slika 7.22 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i na osnovi mjerenja napona mjernih svitaka *Ms1* i *Ms5* za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$

Spektri frekvencija akceleracija, dobiveni na osnovi MKE proračuna i mjerenja na poziciji P1 prikazani su slikama 7.23 i 7.25, a na poziciji P2 slikama 7.24 i 7.26. Zbog većih amplituda harmonika frekvencije 100 i 3800 Hz, na prikazima spektra akceleracija za nesimetrično opterećenje povećane su skale u odnosu na prethodno prikazane spektre za prazni hod i simetrično opterećenje. U izračunatim i izmjerenim spektrima vibracija kod nesimetričnog opterećenja uočava se pojava najistaknutijih harmonika na 75, 100, 1800, 1900, 2000, 3700, 3800 i 3900 Hz. Dobro poklapanje izračunatih i izmjerenih amplituda ostvaruje se na frekvencijama 75 i 100 Hz. Kao i u praznom hodu generatora, viši harmonici određeni proračunom i mjerenjem pojavljuju se na istim frekvencijama. Međutim, dok su rezultati proračuna ujednačeni za lokacije P1 i P2, rezultati mjerenja pokazuju razlike u amplitudama pojedinih harmonika. Kod istaknutih harmonika na 3800 i 3900 Hz senzorom P1 izmjerene su oko 2 puta manje, a sa senzorom P2 oko 4 puta veće amplitude od izračunatih. Navedene razlike veće su nego u slučajevima simetričnog opterećenja. Mjerenjem određene akceleracije sadrže dodatne niže harmonike i neke više harmonike, koji nisu obuhvaćeni izračunatim spektrom. Ovo je očekivana pojava, jer su harmonici istih frekvencija uočeni već i u mehaničkoj vrtnji.

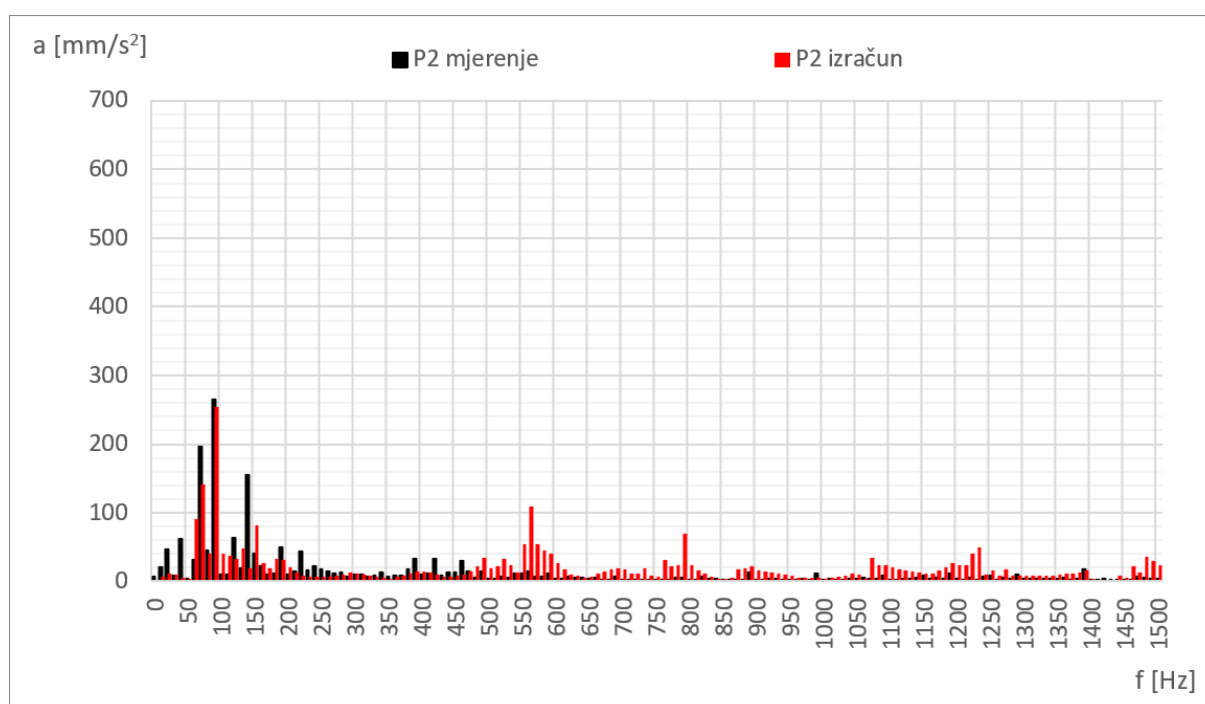
Tablicom 7.3 usporedno su prikazane izračunate i izmjerene amplitude harmonika frekvencije 100 Hz, za sva analizirana nesimetrična pogonska stanja. Usporedbom sa simetričnim pogonskim stanjima, moguće je uočiti kako je postignuto nešto manje odstupanje između izračunatih i izmjerenih vrijednosti kod obje analizirane lokacije.

Tablica 7.3 Usporedba izračunatih i izmjerenih amplituda harmonika akceleracija na 100 Hz za lokacije P1 i P2 na paketu stroja za analizirana nesimetrična opterećenja

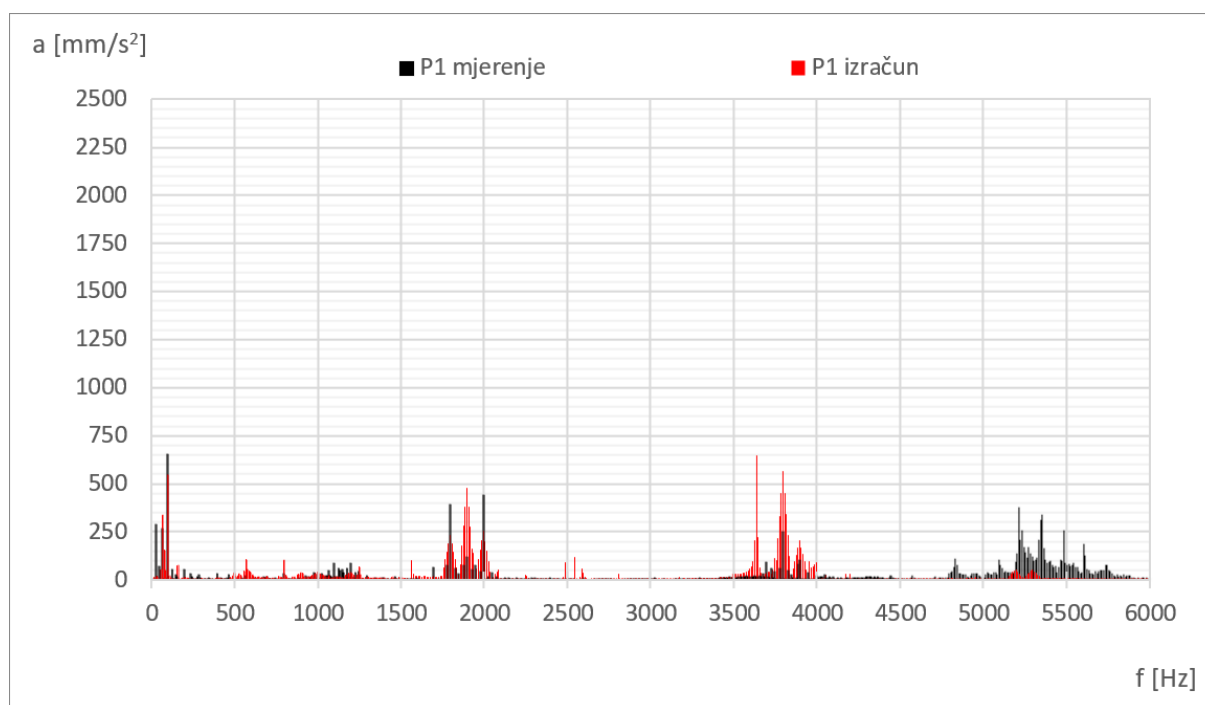
| Akceleracije vibracija – Amplitude harmonika na 100 Hz |                 |              |                      |              |                                       |                                        |                        |                                       |                                        |                        |  |
|--------------------------------------------------------|-----------------|--------------|----------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|--|
| Red.br.                                                | Pogonsko stanje |              |                      |              | Mjesta na paketu P1                   |                                        |                        | Mjesta na paketu P2                   |                                        |                        |  |
|                                                        | $U$<br>[V]      | $S$<br>[kVA] | $\cos\varphi$<br>[-] | Akt.<br>faze | $a_{izračun}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{mjerenje}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\Delta a_{p1}$<br>[%] | $a_{izračun}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $a_{mjerenje}$<br>[mm/s <sup>2</sup> ] | $\Delta a_{p2}$<br>[%] |  |
| 1.                                                     | 400             | 52           | 0,08                 | B-C          | 247                                   | 153                                    | 61,4                   | 268                                   | 287                                    | -6,6                   |  |
| 2.                                                     | 400             | 52           | 0,70                 | B-C          | 321                                   | 261                                    | 23,0                   | 234                                   | 226                                    | 3,5                    |  |
| 3.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | B-C          | 304                                   | 352                                    | -13,6                  | 160                                   | 153                                    | 4,6                    |  |
| 4.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | A-C          | 153                                   | 91                                     | 68,1                   | 229                                   | 346                                    | -33,8                  |  |
| 5.                                                     | 400             | 52           | 1,00                 | A-B          | 217                                   | 360                                    | -39,7                  | 298                                   | 199                                    | 49,7                   |  |
| 6.                                                     | 400             | 90           | 0,7                  | B-C          | 484                                   | 385                                    | 25,7                   | 273                                   | 300                                    | -9,0                   |  |
| 7.                                                     | 400             | 104          | 0,08                 | B-C          | 502                                   | 331                                    | 51,7                   | 360                                   | 427                                    | -15,7                  |  |
| 8.                                                     | 400             | 104          | 0,70                 | B-C          | 549                                   | 437                                    | 25,6                   | 292                                   | 331                                    | -11,8                  |  |
| 9.                                                     | 400             | 104          | 1,00                 | B-C          | 548                                   | 653                                    | -16,1                  | 253                                   | 264                                    | -4,2                   |  |
| 10.                                                    | 400             | 104          | 1,00                 | A-B          | 424                                   | 520                                    | -18,5                  | 339                                   | 246                                    | 37,8                   |  |



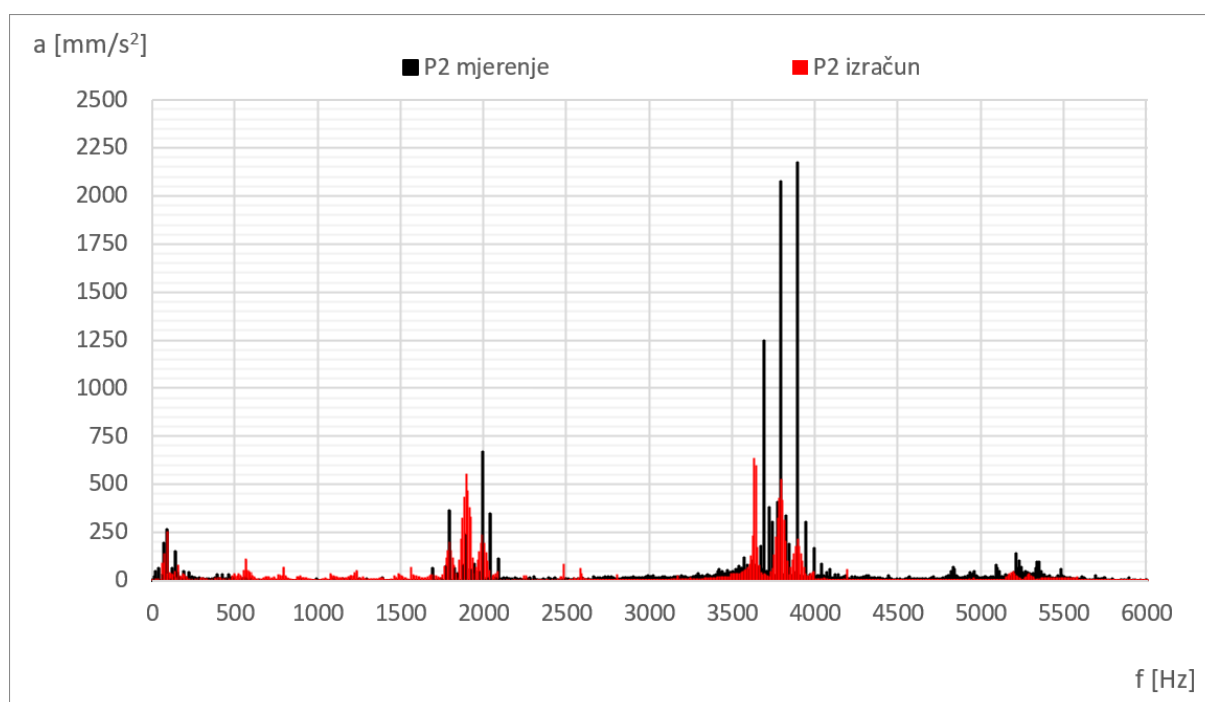
Slika 7.23 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu *P1* za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.24 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu *P2* za nesimetrično opterećenje  $U=400$  V,  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$



Slika 7.25 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu *P1* za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$



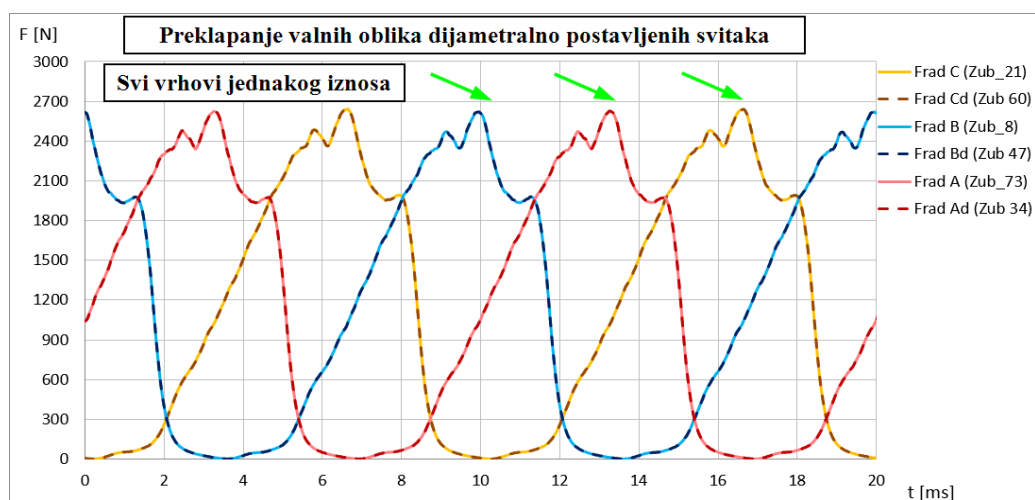
Slika 7.26 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu *P2* za nesimetrično opterećenje  $U=400\text{ V}$ ,  $S=104\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$

## **8. Algoritam za prepoznavanje nesimetričnog električnog opterećenja generatora analizom induciranih napona u mjernim svitcima**

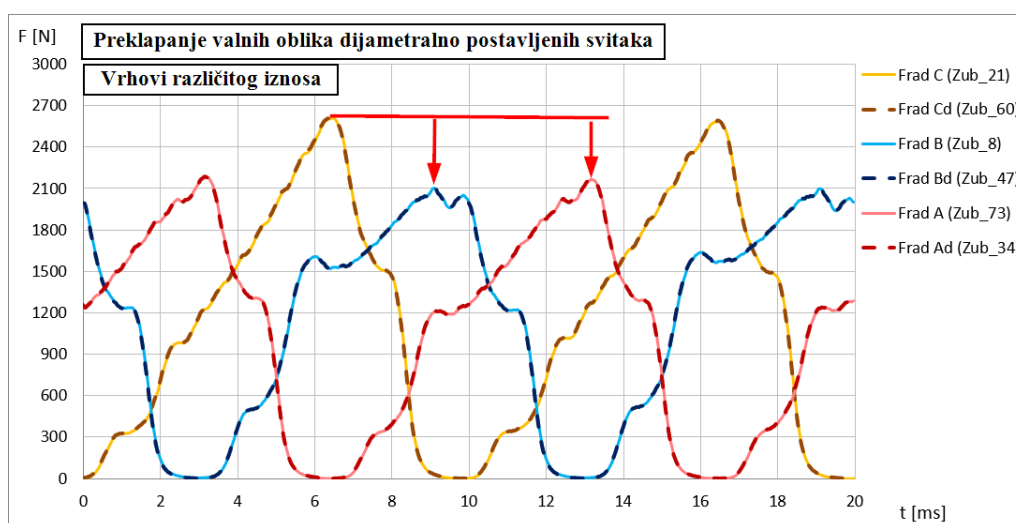
U ovom poglavlju opisani su algoritam i metoda raspoznavanja nesimetričnih električnih opterećenja na osnovi induciranih napona u mjernim svitcima. Korištenjem rezultata određenih MKE proračunom i mjerenjima na sinkronom generatoru s istaknutim polovima, izrađen je algoritam za prepoznavanje nesimetričnih električnih opterećenja. Analizirana su različita stanja nesimetričnog električnog opterećenja i utvrđen je način njihovog prepoznavanja, u odnosu na simetrično opterećenje generatora. Metoda prepoznavanja temelji se na analizi induciranih napona u mjernim svitcima ugrađenim na zube paketa statora. Prethodnim poglavljima prikazano je kako se upotrebom MKE proračuna mogu odrediti naponi mjernih svitaka, koji se dobro poklapaju s rezultatima mjerenja te da se obradom ovih napona mogu odrediti valni oblici radijalnih sila na zube. Prije objašnjenja algoritma, u nastavku su ukratko još jednom prikazane karakteristike svojstvene nesimetričnom električnom opterećenju.

### ***8.1 Svojstvene karakteristike električnog nesimetričnog opterećenja***

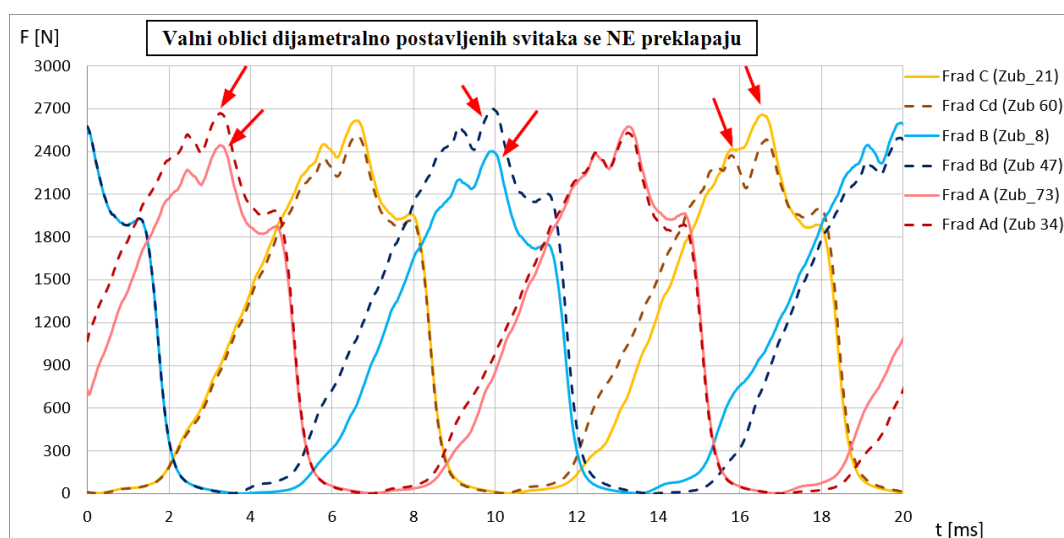
Nesimetrično električno opterećenje može se pouzdano utvrditi analizom vršnih vrijednosti radijalnih sila, koje djeluju na zube međusobno razmaknute za dvije trećine polnog koraka. U slučaju praznog hoda ili simetričnog trofaznog opterećenja sinkronog generatora, ove vršne vrijednosti jednakog su iznosa (slika 8.1). Međutim, kod nesimetričnog opterećenja javljaju se razlike prikazane slikom 8.2. Razlike vršnih vrijednosti radijalnih sila na zube mogu biti uzrokovane i drugim vrstama poremećaja, kao što su npr. ekscentrični pomak rotora ili kvarovi namota. Situaciju nesimetričnog električnog opterećenja moguće je razlikovati od ostalih vrsta poremećaja promatranjem radijalnih sila na dijametralno postavljene zube. Valni oblici sila na ove zube međusobno su jednaki u slučaju simetričnog i električki nesimetričnog opterećenja (slike 8.1 i 8.2), dok se međusobno razlikuju u slučaju drugih vrsta poremećaja (slika 8.3) kao što su ekscentrično gibanje rotora ili kratki spoj zavoja uzbudnog namota.



Slika 8.1 Valni oblici sile određeni mjernim svitcima za simetrično opterećenje



Slika 8.2 Svojstvena razlika valnih oblika sila u slučaju nesimetričnog električnog opterećenja uz poklapanje valnih oblika dijametralno postavljenih svitaka



Slika 8.3 Nesimetrija valnih oblika uzrokovana poremećajem koji se razlikuje od nesimetričnog električnog opterećenja - valni oblici dijametralno postavljenih svitaka se ne poklapaju

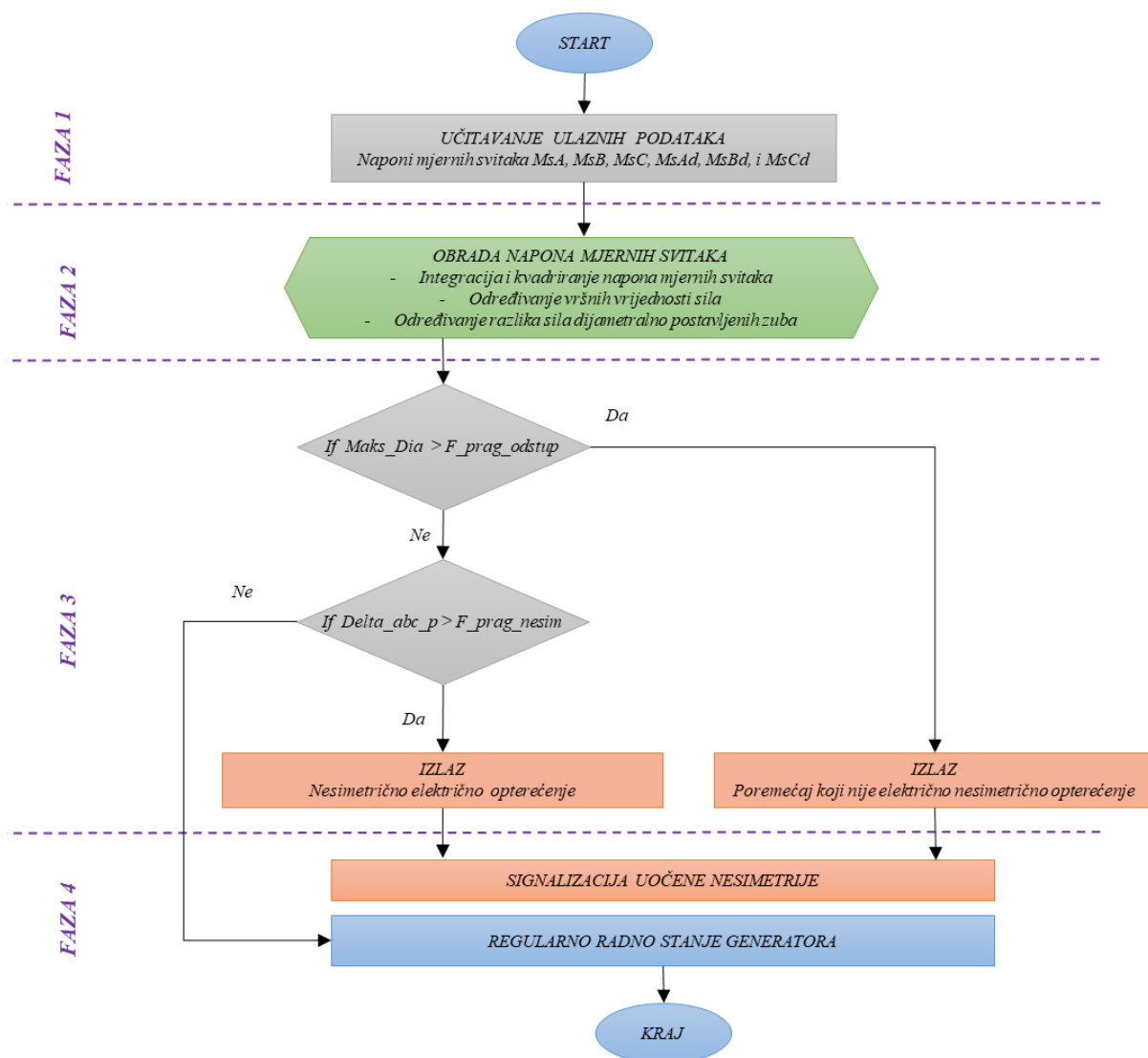
## **8.2 Algoritam za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja sinkronog generatora**

U ovom potpoglavlju objašnjen je algoritam za otkrivanje i prepoznavanje nesimetričnog električnog opterećenja po fazama namota sinkronog generatora, čiji dijagram toka je prikazan na slici 8.4. Na osnovi prethodno prikazanih rezultata proračuna i mjerenja utvrđeno je da ulazni parametri algoritma moraju biti inducirani naponi u mjernim svitcima  $MsA$ ,  $MsAd$ ,  $MsB$ ,  $MsBd$ ,  $MsC$  i  $MsCd$ , određene za minimalno jednu električnu periodu izlaznog napona generatora. Dijagram toka algoritma na slici 8.4 može se podijeliti u sljedeće četiri faze:

- **Faza 1:** Inicijalizacija varijabli i učitavanje ulaznih podataka – unos vrijednosti induciranih napona za šest mjernih svitaka deklariranih oznakama  $MsA$ ,  $MsAd$ ,  $MsB$ ,  $MsBd$ ,  $MsC$  i  $MsCd$  za jednu periodu valnog oblika napona, pri čemu su svitci  $MsA$ ,  $MsB$  i  $MsC$  međusobno razmaknuti za  $\frac{2}{3}\tau_p$ , a parovi svitaka  $MsA$ - $MsAd$ ,  $MsB$ - $MsBd$  i  $MsC$ - $MsCd$  međusobno dijametralno pozicionirani. Definiranje praga dozvoljenog odstupanja maksimuma sila pri detekciji električne nesimetrije i praga dozvoljene razlike dijametralno postavljenih svitaka.
- **Faza 2:** Obrada i analiza podataka – određivanje valnih oblika radijalne sile integracijom i kvadriranjem valnih oblika induciranih napona, određivanje vršnih vrijednosti valnih oblika sila; izračun razlike između dijametralno postavljenih svitaka.
- **Faza 3:** Donošenje odluka – provjera međusobnih odnosa valnih oblika sila prema definiranim kriterijima. Dio algoritma za utvrđivanje razlike vršnih sila određenih preko svitaka međusobno razmaknutim za  $\frac{2}{3}\tau_p$ . Dio algoritma za utvrđivanje razlike sila između dijametralno postavljenih svitaka.

**Faza 4:** Signaliziranje – prikaz informacije o tome je li radno stanje simetrično, nesimetrično uzrokovano električnim teretom na stezaljkama stroja ili poremećajem neke druge vrste.





Slika 8.4 Dijagram toka algoritma za prepoznavanje nesimetričnog električnog opterećenja sinkronog generatora

Algoritam se po vrsti obrade podataka može podijeliti na dva dijela. Prvi dio odnosi se na određivanje valnih oblika sila iz snimljenih valnih oblika induciranog napona, a u drugom dijelu se na osnovi valnih oblika sila utvrđuje postojanja nesimetričnog električnog opterećenja. U nastavku je opisan puni tijek algoritma, čiji su grafički prikazi i kôd izvedeni upotrebom programa *Octave* [36]. Kôd algoritma za određivanje radijalnih magnetskih sila na zube paketa statora dan je u Prilogu A1. Kôd algoritma za utvrđivanje postojanja električne nesimetrije temeljem analize radijalnih magnetskih sila koje djeluju na zube paketa statora dan je u Prilogu A2. Oznake nizova i varijabli u nastavku teksta odgovaraju onima korištenim u kôdu.

### 8.2.1. Dio 1. Određivanje radijalnih magnetskih sila analizom napona 6 mjernih svitaka

Algoritam kao ulazne vrijednosti koristi inducirane napone u mjernim svitcima  $MsA$ ,  $MsB$ ,  $MsC$ ,  $MsAd$ ,  $MsBd$  i  $MsCd$ , učitane za minimalno jednu punu periodu izlaznog napona. Ove vrijednosti učitavaju se iz ulazne datoteke naziva ' $U\_MS.csv$ ' u dvodimenzionalni niz naziva  $Niz\_U\_Ms$ . Po učitavanju ovih vrijednosti određuje se ukupan broj vremenskih točaka  $N$  kojeg dijele svi učitani nizovi i vremenski korak između dva učitana podatka  $\Delta t$ . Temeljem napona svakog pojedinog mjernog svitka potrebno je odrediti radijalnu magnetsku silu na dotični zub. Ovaj postupak, baziran na analizi opisanoj poglavljem 4.1, provodi se za jedan po jedan svitak unutar *for* petlje. U svakom koraku ove petlje vrijednost brojača oznake  $i$  jedinično se povećava u rasponu od 1 do 6. Tablicom 8.1 prikazan je poredak napona mjernih svitaka po oznaci ovog brojača.

Tablica 8.1 Pripadnost rednog broja učitano napona mjernim svitcima

| Redni broj ( $i$ ) | 1     | 2     | 3     | 4      | 5      | 6      |
|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Mjerni svitak      | $MsA$ | $MsB$ | $MsC$ | $MsAd$ | $MsBd$ | $MsCd$ |

Na početku *for* petlje, vrijednost napona  $i$ -tog svitka dijeli se brojem zavoja svitka  $N_{sv}$  i sprema u pomoćni niz oznake  $Niz\_U$ . Ovom operacijom određen je napon po jednom zavoju mjernog svitka. Nakon toga određuje se valni oblik magnetskog toka obuhvaćenog petljom mjernog svitka postupkom integracije napona po vremenu. Vremenski niz vrijednosti magnetskog toka sprema se u pomoćnu varijablu  $Niz\_Fi$ . Za prvu vremensku točku magnetskog toka postavlja se iznos koji odgovara negativnom umnošku prve vrijednosti niza napona  $Niz\_U$  i vremenskog koraka između dva učitana podatka  $\Delta t$ .

$$Niz\_Fi(1) = -Niz\_U(1) \cdot \Delta t \quad (8.1)$$

Vrijednosti ovog niza za svih ostalih  $N$  točaka određuju se unutar druge (*for*) petlje u kojoj se kao brojač koraka koristi varijabla oznake  $j$ . U svakom koraku određuje se umnožak vremenskog koraka  $\Delta t$  i napona iz niza  $Niz\_U$  te oduzima od iznosa magnetskog toka određenog za prethodni korak:

$$Niz\_Fi(j) = Niz\_Fi(j - 1) - Niz\_U(j) \cdot \Delta t \quad (8.2)$$

Uklanjanje istosmjerne komponente iz valnog oblika magnetskog toka  $Niz\_Fi$  provodi se određivanjem srednje vrijednosti  $Fi\_sr$  ovog valnog oblika upotrebom funkcije *mean* ugrađene u program Octave i korekcijom niza  $Niz\_Fi$  za ovaj iznos:

$$Fi\_sr = \text{mean}(Niz\_Fi) , \quad (8.3)$$

$$Niz\_Fi = Niz\_Fi - Fi\_sr . \quad (8.4)$$

Valni oblik radijalne komponente magnetske indukcije za analizirani mjerni svitak  $Niz\_B\_Ms$  određuje se dijeljenjem vremenskog niza magnetskog toka  $Niz\_Fi$  s površinom koju zatvara petlja tog svitka  $Ssv$ :

$$Niz\_B\_Ms = \frac{Niz\_Fi}{Ssv} . \quad (8.5)$$

Valni oblik radijalne magnetske sile koja djeluje na zub iznad mjernog svitka  $Niz\_F\_Ms\_zub$  određuje se kvadriranjem valnog oblika magnetske indukcije  $Niz\_B\_Ms$  i množenjem s radijalnom površinom zuba  $Sz$ . Kako se iznos sile određuje u zračnom rasporu, tik uz radijalnu plohu zuba, iznos određen kvadriranjem dijeli se s konstantom magnetske permeabilnosti u zraku označenom u kodu sa  $u0$ :

$$Niz\_F\_Ms\_zub = \frac{1}{2 \cdot u0} \cdot (Niz\_B\_Ms^2) \cdot Sz . \quad (8.6)$$

Za kvadriranje niza vrijednosti pohranjenih u  $Niz\_B\_Ms$  unutar Octave kôda koristi se sintaksa oblika ' $Niz\_B\_Ms.^2$ ', u kojoj točka ispred znaka potencije ' $^$ ' označava da se operacija kvadriranja provodi simultano za sve elemente niza. Ovime se izbjegava upotreba dodatne *for* petlje tj. provedba kvadriranja jedan po jedan element niza i time ubrzava izvođenje algoritma.

Izračunati valni oblik sile za pojedini zub  $Niz\_F\_Ms\_zub$  smješta se u dvodimenzionalni niz  $Niz\_F\_Ms$  na poziciju  $i$ -tog stupca. Nakon što se postupak provede za svih 6 mjernih svitaka, algoritam izlazi iz *for* petlje te se izračunati valni oblici sila spremaju u dokument naziva ' $F\_MS.csv$ ' po redoslijedu učitanih napona mjernih svitaka. Na ekranu glavnog prozora ispisuje se poruka '*Sile za 6 mjernih svitaka izračunate su i spremljene u dokument F\_MS.csv*'. Time završava dio algoritma vezana za obradu napona mjernih svitaka.

### 8.2.2. Dio 2. Usporedba sila koje djeluju na zube

Na početku ovog dijela algoritma sile određene temeljem napona mjernih svitaka, pohranjene u dvodimenzionalni niz  $Niz\_F\_Ms$ , smještaju se u šest zasebnih nizova. Tablicom 8.2. prikazan je poredak sila po zubima iznad mjernih svitaka i nazivi pomoćnih nizova.

Tablica 8.2 Podjela radijalnih sila na zube po pomoćnim nizovima

| Redni broj ( $i$ ) | 1           | 2           | 3           | 4            | 5            | 6            |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Mjerni svitak      | $MsA$       | $MsB$       | $MsC$       | $MsAd$       | $MsBd$       | $MsCd$       |
| Naziv niza sile    | $Niz\_F\_A$ | $Niz\_F\_B$ | $Niz\_F\_C$ | $Niz\_F\_Ad$ | $Niz\_F\_Bd$ | $Niz\_F\_Cd$ |

Za svaki od prva tri niza ( $Niz\_F\_A$ ,  $Niz\_F\_B$  i  $Niz\_F\_C$ ) određuje se vršna vrijednost sile upotrebom funkcije *max* ugrađene u program *Octave*. Ove tri vršne vrijednosti sila spremaju se u pomoćni tročlani niz  $Niz\_F\_Vrh$ . Najveći iznos od ove tri vrijednosti zapisane u  $Niz\_F\_Vrh$  određuje se na istovjetan način i sprema u pomoćnu varijablu  $Maks\_abc$ . Najmanji iznos od tri vrijednosti zapisane u  $Niz\_F\_Vrh$  određuje se upotrebom funkcije *min* ugrađene u program *Octave* i pridružuje varijabli  $Min\_abc$ . Razlika između ovako određene maksimalne i minimalne vršne vrijednosti pohranjuje se u varijablu  $Delta\_abc$ , a postotno odstupanje u odnosu na minimalnu vršnu vrijednost u varijablu  $Delta\_abc\_p$ :

$$Delta\_abc = Maks\_abc - Min\_abc, \quad (8.7)$$

$$Delta\_abc\_p = \frac{Delta\_abc}{Min\_abc} \cdot 100. \quad (8.8)$$

Daljnjom obradom utvrđuje se odstupanje sila dijametralno postavljenih svitaka. Za svaki par sila ovih svitaka određuje se po jedan niz koji sadrži razlike sila kroz sve vremenske trenutke:

$$Niz\_F\_A\_r = Niz\_F\_A - Niz\_F\_Ad, \quad (8.9)$$

$$Niz\_F\_B\_r = Niz\_F\_B - Niz\_F\_Bd, \quad (8.10)$$

$$Niz\_F\_C\_r = Niz\_F\_C - Niz\_F\_Cd. \quad (8.11)$$

Unutar svakog od navedena tri niza određuje se maksimalna vrijednost odstupanja upotrebom funkcije *max* i postotno odstupanje u odnosu na vršnu vrijednost zapisanu u  $Niz\_F\_Vrh$ . Ove vrijednosti zapisuju se u pomoćnu tročlani niz  $Niz\_F\_Odstup\_p$ .

$$Niz\_F\_Odstup\_p(1) = \frac{\max(Niz\_F\_A\_r)}{Niz\_F\_Vrh(1)} \cdot 100, \quad (8.12)$$

$$Niz\_F\_Odstup\_p(2) = \frac{\max(Niz\_F\_B\_r)}{Niz\_F\_Vrh(2)} \cdot 100, \quad (8.13)$$

$$Niz\_F\_Odstup\_p(3) = \frac{\max(Niz\_F\_C\_r)}{Niz\_F\_Vrh(3)} \cdot 100. \quad (8.14)$$

Najveći iznos od tri vrijednosti zapisane u  $Niz\_F\_Odstup\_p$  sprema se u pomoćnu varijablu  $Maks\_Dia$ .

Ovdje započinje treća faza algoritma u kojoj se provodi usporedba izračunatih razlika vršnih iznosa sila s iznosima dopuštenih odstupanja  $F\_prag\_odstup$  i  $F\_prag\_nesim$  u svrhu utvrđivanja vrste pogonskog stanja sinkronog generatora.

Prag odstupanja sile dijametralno postavljenih svitaka  $F\_prag\_odstup$  od 4,74 % postavljen je kao korijen sume kvadrata maksimalnog odstupanja iznosa sila od 2,58 % utvrđenog mjerenjem za 8 simetričnih radnih stanja (tablica 6.5) i određenog iznosa mjerne nesigurnosti mjerene stanice od 3,98 % prikazane tablicom 3.8.

Prag dopuštene nesimetrije  $F\_prag\_nesim$  od 6,07 % postavljen je kao korijen sume kvadrata iznosa mjerne nesigurnosti mjerene stanice od 3,98 % i računski utvrđenog međusobnog odstupanja vršnih vrijednosti sila za slučaj električne nesimetrije od 15 %, koja na osnovi analiza prevedenih u poglavlju 5.3.5. iznosi 4,59 % (tablica 5.12). U dotičnom poglavlju analizirane su situacije odstupanja koje su u skladu sa standardnim nesimetričnim opterećenjem generatora [1]. Po pitanju vrste nesimetrije svejedno je radi li se o slučaju kod kojeg je struja jedne faze za 15 % manja ili za 15 % veća od iznosa struja preostalih dviju faza.

$$F\_prag\_odstup = \sqrt{2,58^2 + 3,98^2} = 4,74. \quad (8.15)$$

$$F\_prag\_nesim = \sqrt{4,59^2 + 3,98^2} = 6,07. \quad (8.16)$$

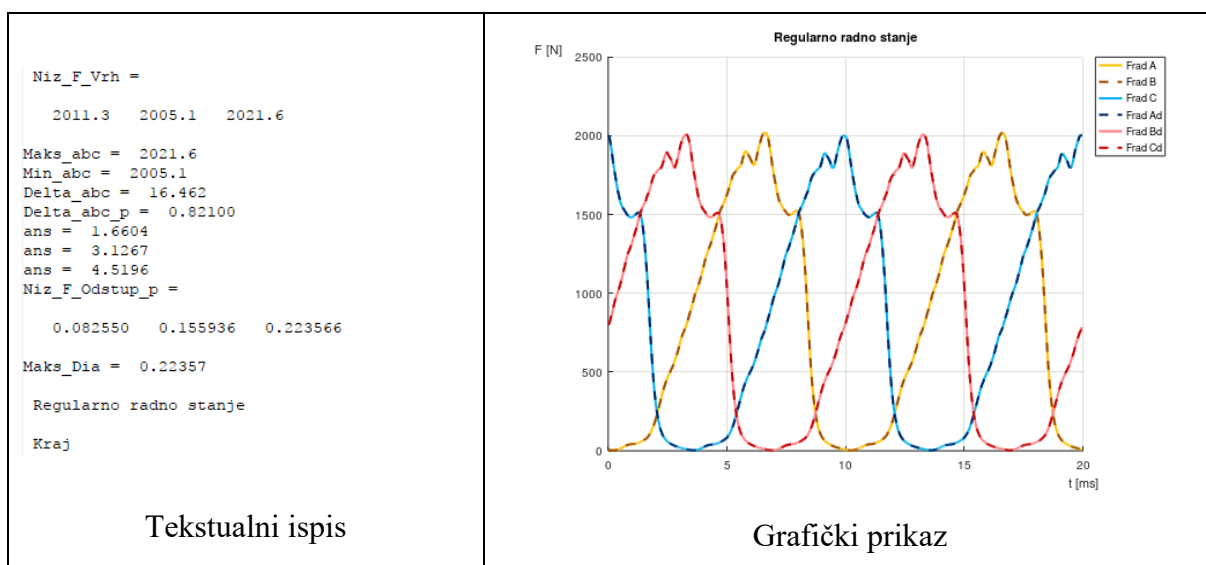
Navedene vrijednosti određene su za slučaj ispitivanog generatora, te mogu imati drugačiji iznos za neki drugi ispitivani stroj. Stoga je poželjno da se vrijednosti ovih iznosa za svaki generator najprije računski provjere i definiraju ovisno o korištenoj mjernoj opremi i dopuštenom iznosu nesimetričnog električnog opterećenja.

Provjera postojanja nesimetrije radnog stanja provodi se kroz dva *if* uvjeta. Prvim uvjetom provjerava se iznos odstupanja sila na dijametralno suprotno smještene zube. Ukoliko je vrijednost varijable  $Maks\_Dia$  veća od praga definiranog ulaznim podatkom  $F\_prag\_odstup$ , detektiran je poremećaj koji nije posljedica nesimetričnog opterećenja. U ovom slučaju, u varijablu za tekstualni ispis  $Tekst\_ispis$  upisuje se “*POREMEĆAJ NIJE NESIMETRIČNO ELEKTRIČNO OPTEREĆENJE - RAZLIKA SILA DIJAMETRALNIH ZUBI OD:*” i postotna vrijednost odstupanja zabilježena u varijabli  $Maks\_Dia$ . Time prestaju daljnje provjere radnog stanja.

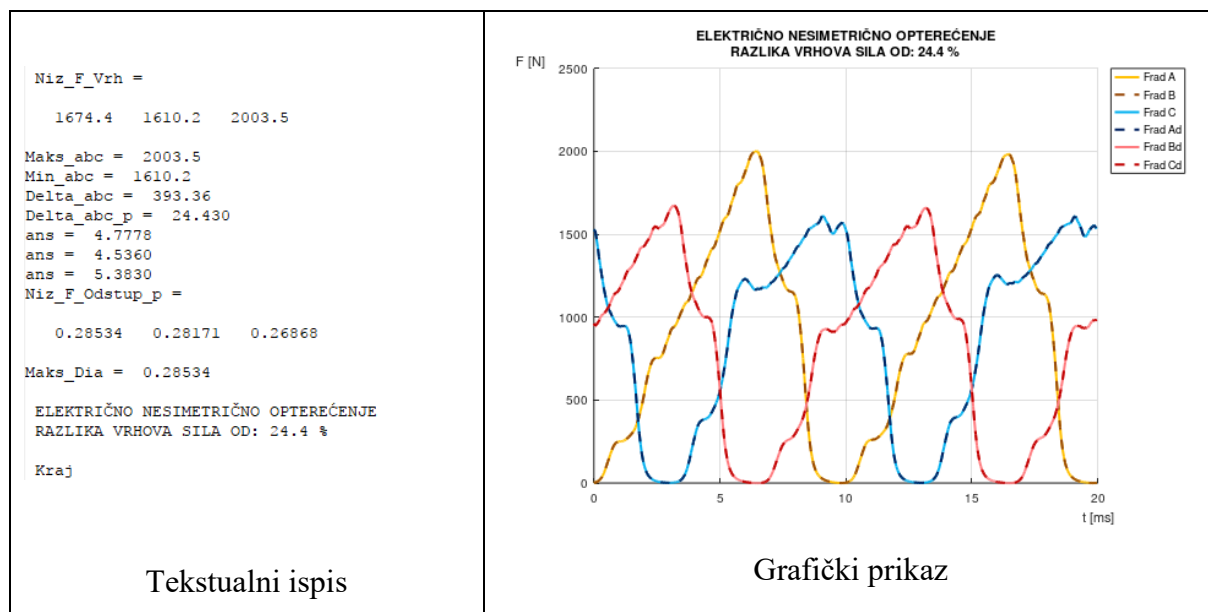
Ako se vrijednost varijable *Max\_Odstupanje* nalazi unutar dopuštenog odstupanja, tj. utvrđena je podudarnost sila na dijametralno smještene zube, slijedi provjera drugog *if* uvjeta. Ovim drugim uvjetom provjerava se iznos međusobnog odstupanja vršnih vrijednosti radijalnih sila na tri zuba, međusobno razmaknuta za  $\frac{2}{3}\tau_p$ . Ukoliko je određeno postotno odstupanje *Delta\_abc\_p* veće od dopuštenog praga nesimetrije *F\_prag\_odstup*, detektiran je poremećaj koji predstavlja električno nesimetrično opterećenje. U ovom slučaju, u varijablu za tekstualni ispis *Tekst\_ispis* unosi se tekst '*NESIMETRIČNO ELEKTRIČNO OPTEREĆENJE - RAZLIKA VRHOVA SILA OD:*' te postotna vrijednost odstupanja zabilježena u varijabli *Delta\_abc\_p*. Time prestaju daljnje provjere radnog stanja. Ukoliko se vrijednost varijable *Delta\_abc\_p* nalazi unutar dopuštenog odstupanja, u varijablu za tekstualni ispis *Tekst\_ispis* unosi se tekst '*Regularno radno stanje*' i time prestaju daljnje provjere.

U četvrtoj fazi ispisuje se sadržaj varijable *Tekst\_ispis* na glavnom ekranu programa Octave. Za potrebe izrade grafa definira se niz vremenskih trenutaka *t*. Na istom grafu iscrtava se svih 6 valnih oblika sila u različitim bojama, pri čemu su valni oblici dijametralno postavljenih svitaka dodatno naznačeni crtkanom linijom. Kao naslov grafa ispisuje se sadržaj *Tekst\_Ispis* varijable.

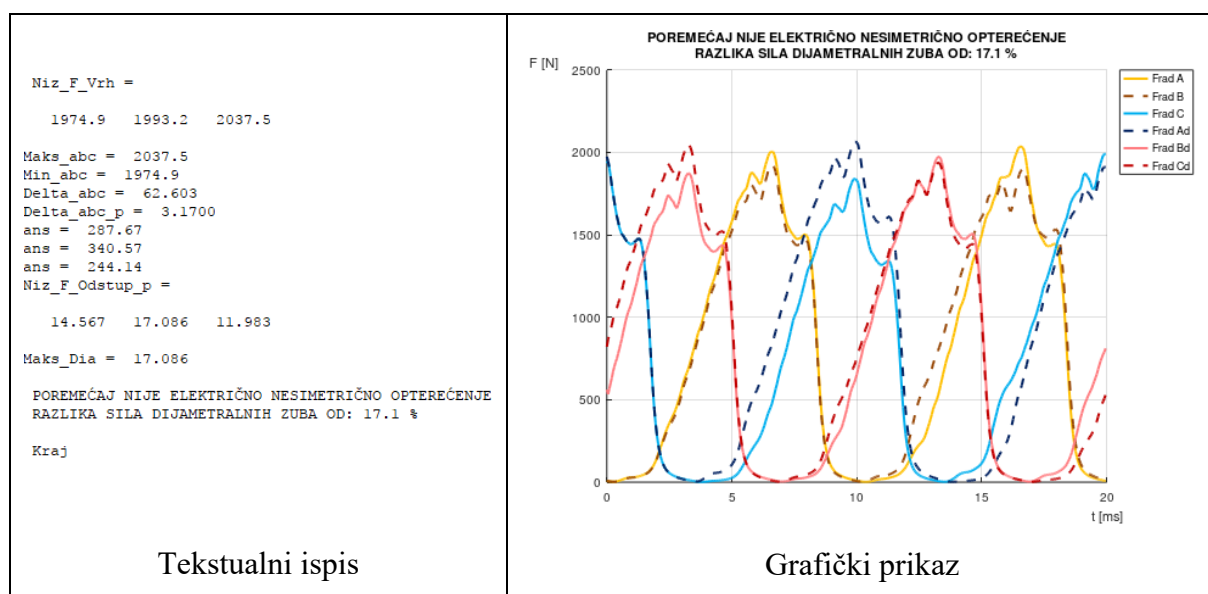
Slikom 8.5 prikazan je izlazni rezultat algoritma za slučaj ispravnog stanja generatora, slikom 8.6. za slučaj utvrđene električne nesimetrije, a slikom 8.7 slučaj poremećaja različitog od električne nesimetrije.



Slika 8.5 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – ispravno simetrično radno stanje



Slika 8.6 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – utvrđeno nesimetrično električno opterećenje



Slika 8.7 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – utvrđen poremećaj koji ne odgovara nesimetričnom električnom opterećenju

## **9. Algoritam za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih od mehanički uzrokovanih harmonika vibracija**

Na osnovi rezultata MKE proračuna i mjerenja provedenih na sinkronom generatoru izrađen je algoritmom za prepoznavanje vibracija paketa statora, koje su posljedica radijalnih magnetskih sila na zube statora. U prethodnim poglavljima prikazani su rezultati određivanja sile na pojedini zub statora. Pokazano je da se matematičkim MKE modelom može utvrditi kako promjene radnog stanja utječu na iznose magnetskih sila koje djeluju na zube statora. Na osnovi izračunatih sila provedeni su i mehanički proračuni te su na taj način određene proračunske vrijednosti vibracija paketa statora. Veza između magnetskih sila na zube i vibracija paketa time je utvrđena. Međutim, za raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih elektromagnetskim silama iz izmjerenog spektra frekvencija nije nužno provoditi mehanički proračun. Prije opisa postupka koji ovo omogućuje, dodatno je pojašnjena veza između sila i vibracija paketa, koja je osnova za funkcioniranje razvijenog algoritma.

### ***9.1. Mogućnost usporedbe frekvencijskog sastava sila i vibracija paketa statora***

Frekvencijski spektar izmjerenih vibracija sadrži harmonike koji se poklapaju s izračunatim vrijednostima, no i harmonike koji u izračunatom spektru nedostaju. Harmonici prisutni pri mehaničkoj vrtnji neuzbuđenog generatora posljedica su mehaničkih karakteristika (vlastitih frekvencija) stroja. No moguća je i pojava mehanički uzrokovanih harmonika vibracija koji nisu uočljivi u mehaničkoj vrtnji. Primjerice, kroz radne cikluse električnog stroja mogu se uslijed nejednakog termičkog širenja pojaviti povećane vibracije, koje ne postoje u hladnom stanju niti kod trajnih radnih temperatura. Uzrok vibracija može biti i nejednoliko zagrijanje stroja pri nesimetričnom opterećenju, kod kojeg kroz sve tri faze namota ne teče ista struja pa gubici snage u statoru generatora nisu jednoliko raspodijeljeni.

Za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih od mehanički uzrokovanih vibracija, potrebno je poznavati puni spektar frekvencija pobudne sile koja djeluje na određeni dio stroja. Za bilo koje radno stanje stroja moguće je usporediti ovaj spektar frekvencija magnetskih sila sa spektrom frekvencija vibracija i utvrditi poklapaju li se njihovi najistaknutiju harmonici vibracija sa spektrom frekvencija magnetskih sila ili ne. Ako se ne utvrdi poklapanje najistaknutijih harmonika vibracija s harmonicima pobudne magnetske sile, radi se o mehaničkom uzroku vibracija i rješavanje problema može se svesti na promjene konstrukcijskih dijelova stroja. Ako se utvrdi poklapanja istaknutih harmonika vibracija s harmonicima sile, vibracije su posljedica elektromagnetskog stanja stroja.

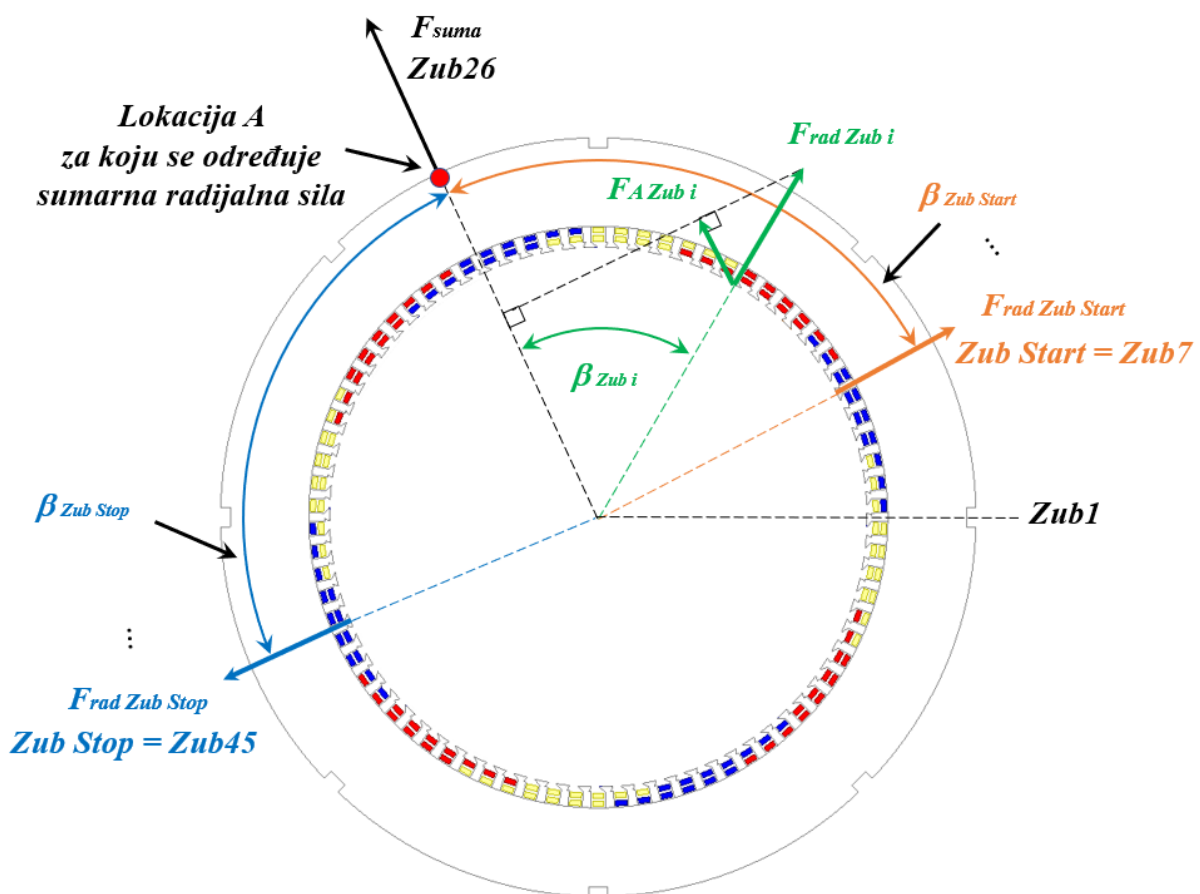


U slučaju da dotične vibracije prelaze prihvatljive granice, rješenje za njihovo smanjenje ili uklanjanje mora se tražiti u promjenama aktivnog dijela stroja.

Ovakve intervencije mogu obuhvaćati zaklinjenje statorskih utora magnetskim klinovima, skošenje statorskih utora ili polova te potpuni električni redizajn stroja. U nastavku je opisan mogući postupak određivanja magnetskih sila koje djeluju na paket statora i postupak usporedbe spektra frekvencija ukupne magnetske sile na paket statora s njegovim vibracijama.

### 9.1.1. Harmonijski sastav sile na paket statora

Poglavljem 5 prikazano je kako se sile na pojedine zube međusobno razlikuju po amplitudi i faznom zakretu. Radijalna sila koja djeluje u nekoj točki oboda paketa predstavlja superpoziciju sila na pojedine zube statora. Njen iznos moguće je odrediti vektorskim zbrajanjem radijalnih sila zubi određenih za polovicu stroja, pri čemu su za razmatranu zonu početni zub (*Zub Start*) i zadnji zub (*Zub Stop*) podjednako udaljeni od lokacije za koju se određuje ukupna sila (slika 9.1).



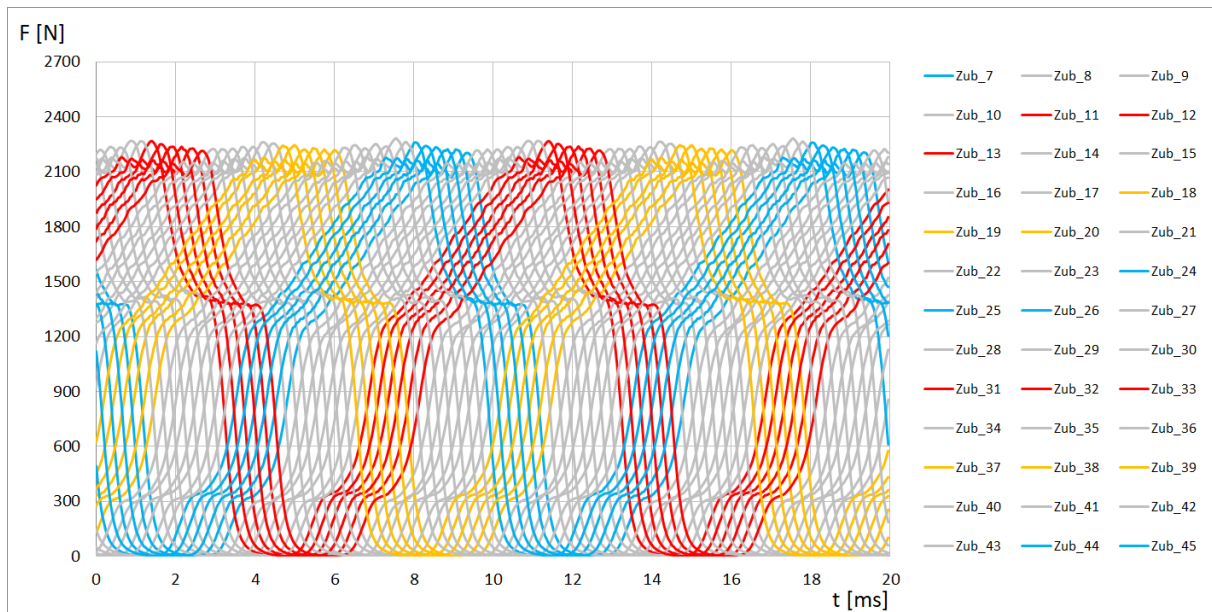
Slika 9.1 Komponenta radijalne sile zubi u smjeru odabrane lokacije oboda statora

Za svaki zub  $i$  ove zone potrebno je odrediti kut  $\beta_{Zub\ i}$  između vektora radijalne sile zuba  $F_{rad\ Zub\ i}$  i radijalnog smjera sumarne sile  $F_{suma}$ . Komponenta sile svakog zuba  $F_{A\ Zub\ i}$  koja djeluje u radijalnom smjeru lokacije  $A$  za svaki trenutak  $t$  unutar vremena  $T$  određuje se po izrazu 9.1. Sumom ovako određenih komponenti sila za sve zube u okolici lokacije  $A$  određuje se valni oblik resultantne radijalne sile koja djeluje na odabrano mjesto jarma statora (9.2).

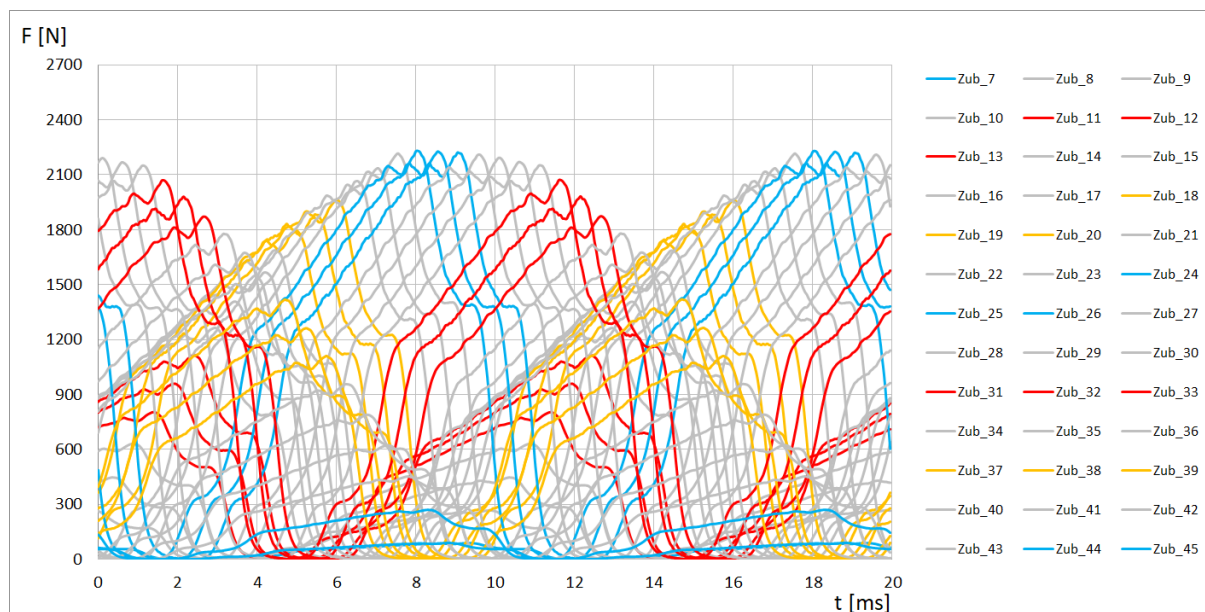
$$F_{A\ Zub\ i}(t) = F_{rad\ Zub\ i}(t) \cdot \cos(\beta_{Zub\ i}) \quad t \in [0, T] \quad (9.1)$$

$$F_{suma}(t) = \sum_{i=Zub\ Start}^{i=Zub\ Stop} F_{A\ Zub\ i}(t), \quad t \in [0, T] \quad (9.2)$$

Slikom 9.2 prikazane su radijalne sile na zube generatora pri simetričnom radnom stanju  $S=180\text{ kVA}$   $\cos\varphi=1$ ,  $U=400\text{ V}$ . Prikazane sile odgovaraju situaciji sa slike 9.1, gdje pozicija  $Zub\ Start$  odgovara zubu pod rednim brojem 7, pozicija  $Zub\ Stop$  odgovara zubu broj 45, a lokacija za koju se određuje sumarna sila odgovara poziciji iznad zuba broj 26. Slika 9.2 prikazuje kako su prilikom simetričnog opterećenja radijalne sile svih zubi sličnog iznosa i valnog oblika. Komponente ovih sila koje djeluju u smjeru lokacije  $A$  (određene izrazom 9.1) prikazane su slikom 9.3. Moguće je uočiti kako sila na zub broj 26 ima nepromijenjenu vrijednost, budući da se radijalni smjer sile ovog zuba poklapa s pozicijom na jarma statora za koju se određuje sumarni iznos sile. Doprinosi sila preostalih zubi manjih su iznosa, jer se njihov radijalni smjer ne poklapa sa smjerom vektora sumarne sile. Što je zub udaljeniji od lokacije  $A$ , to je doprinos njegove radijalne sile u iznosu sumarne sile manji.

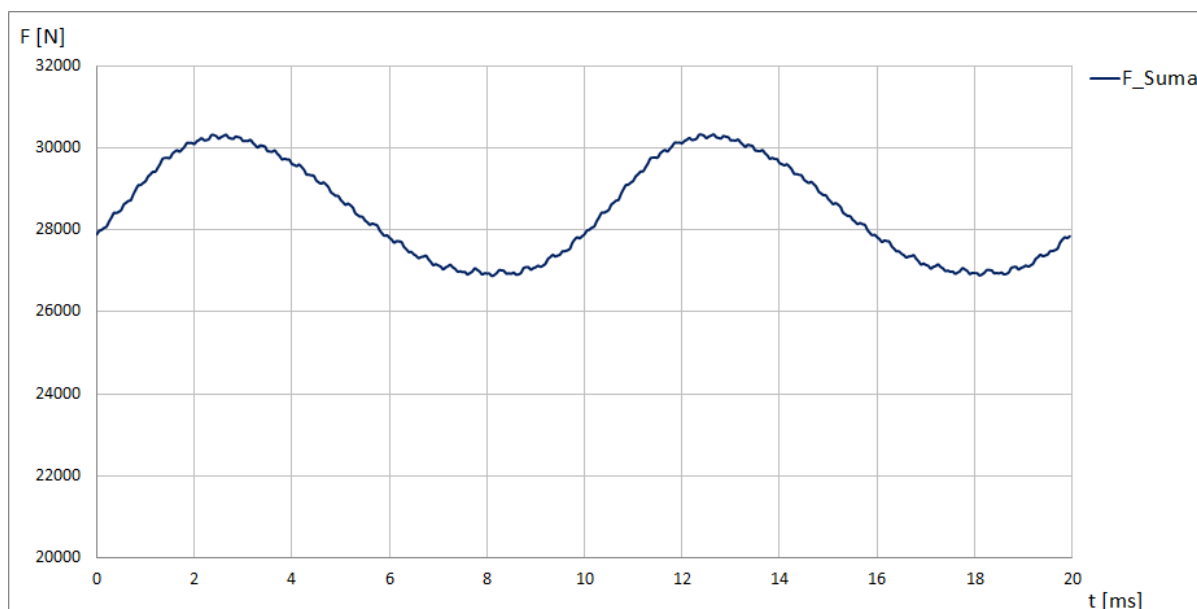


Slika 9.2 Radijalne sile zubi na polovici stroja koja okružuje odabranu lokaciju na obodu paketa statora pri simetričnom opterećenju  $S=180\text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400\text{ V}$



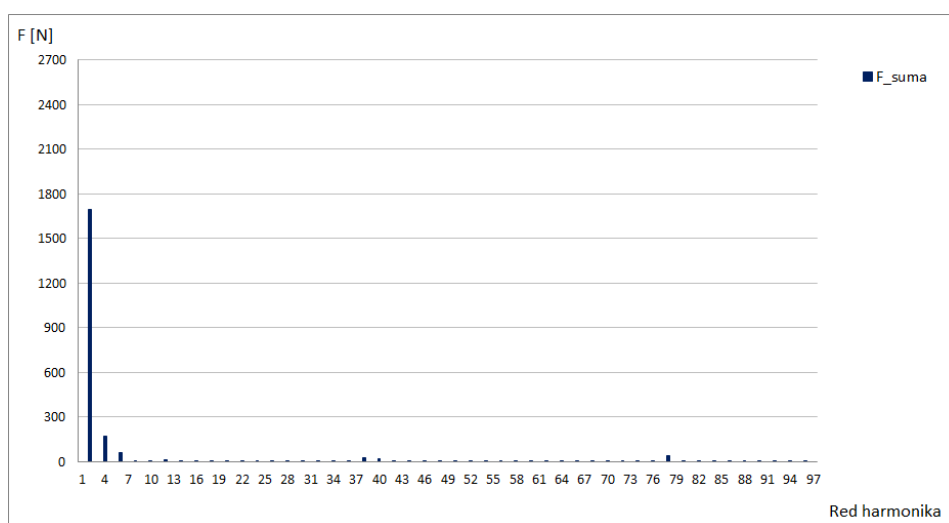
Slika 9.3 Komponente sile analiziranih zubi u smjeru odabrane lokacije na obodu jarma paketa statora pri simetričnom opterećenju  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V

Slikom 9.4 prikazan je valni oblik sumarne sile koja djeluje u smjeru odabrane lokacije  $A$  na jarmu paketa statora. U valnom obliku sile vidljiva je izrazita valovitost dvostruko veće frekvencije od frekvencije osnovnog magnetskog polja. Zanimljivo je primijetiti kako se vršne vrijednosti ovog valnog oblika javljaju u trenucima koji su za  $\sim 90^\circ$  el. pomaknuti u odnosu na vršnu vrijednosti sile zuba broj 26.

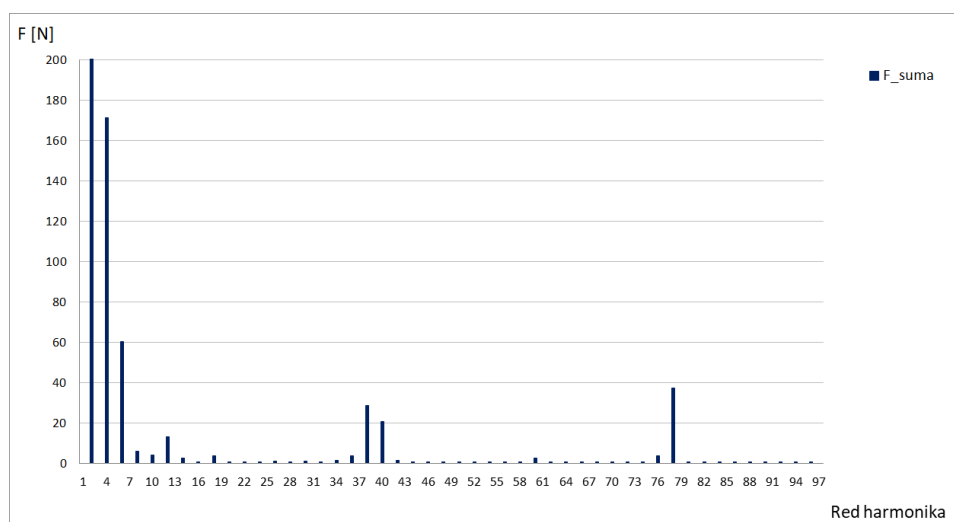


Slika 9.4 Rezultantna radijalna sila odabrane lokacije na obodu paketa statora pri simetričnom opterećenju  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V

Slikom 9.5 prikazan je harmonijski sastav valnog oblika rezultantne sile bez srednje vrijednosti (0. harmonik). Frekvencijski spektar određen je na osnovi jedne električne periode valnog oblika napona, pa prvom harmoniku prikazanog reda odgovara frekvencija 50 Hz. Kako harmonik 2. reda iznosom zasjenjuje sve ostale istaknute harmonike, slikom 9.6 поближе je prikazan spektar frekvencija za raspon sile 0-200 N. Na ovoj slici moguće je primijetiti kako uz prethodno opisane više harmonike do 28. reda, uočene u spektru frekvencija sile pojedinog zuba (slika 5.19), u ovom spektru frekvencija postoje i dodatni harmonici višeg reda. Navedeni harmonici definirani su brojem utora stroja, pa ih se obično naziva utorskim harmonicima.

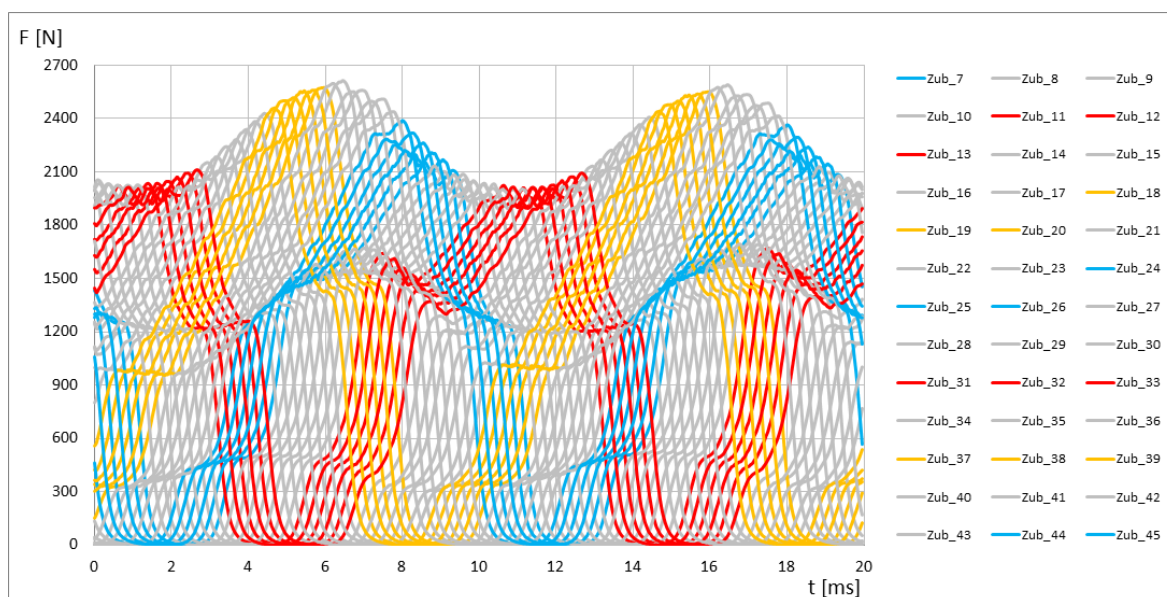


Slika 9.5 Spektar harmonika sumarne sile u smjeru odabrane lokacije paketa statora pri simetričnom opterećenju  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V

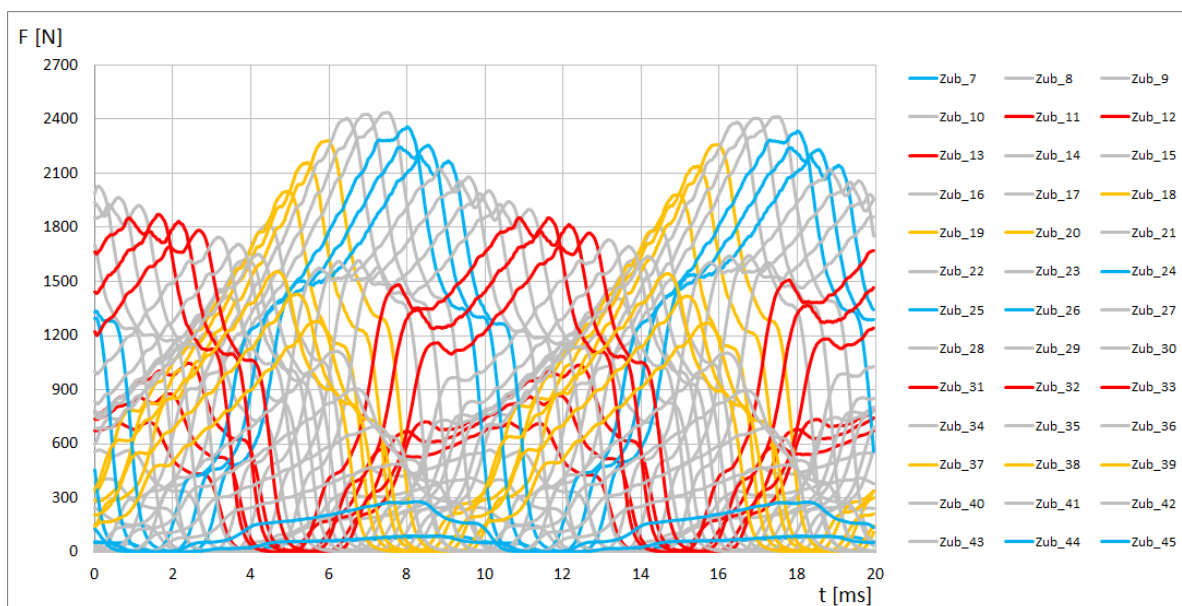


Slika 9.6 Uvećani prikaz amplituda harmonika sumarne radijalne sile (drugi harmonik djelomično prikazan) pri simetričnom opterećenju  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V - 1. harmoniku odgovara 50 Hz

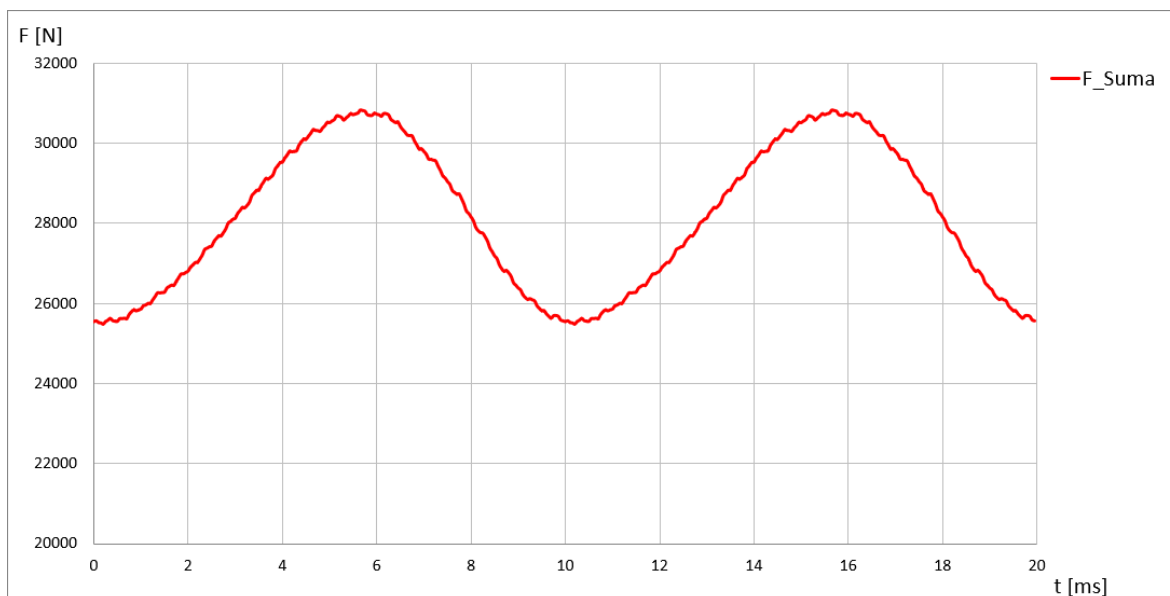
Slikom 9.7 prikazane su radijalne sile na zube generatora za slučaj električki nesimetričnog radnog stanja  $S=104 \text{ kVA}$   $\cos\varphi=1$ ,  $U=400 \text{ V}$ . Na slici 9.8 prikazane su komponente sila u smjeru odabrane točke na jarmu paketa statora, a slikom 9.9 valni oblik rezultantne sile.



Slika 9.7 Radijalne sile zubi na polovici stroja koja okružuje odabranu lokaciju na obodu paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $S=104 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400 \text{ V}$

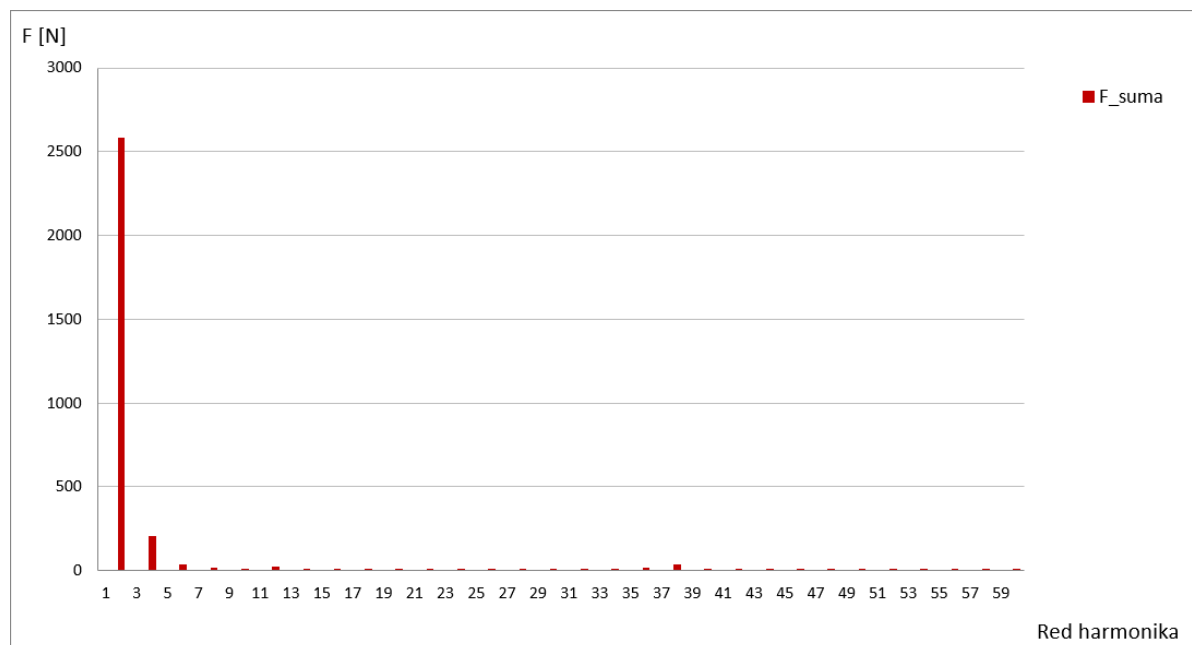


Slika 9.8 Komponente sila analiziranih zubi u smjeru odabrane lokacije na obodu jarma paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $S=104 \text{ kVA}$ ,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400 \text{ V}$



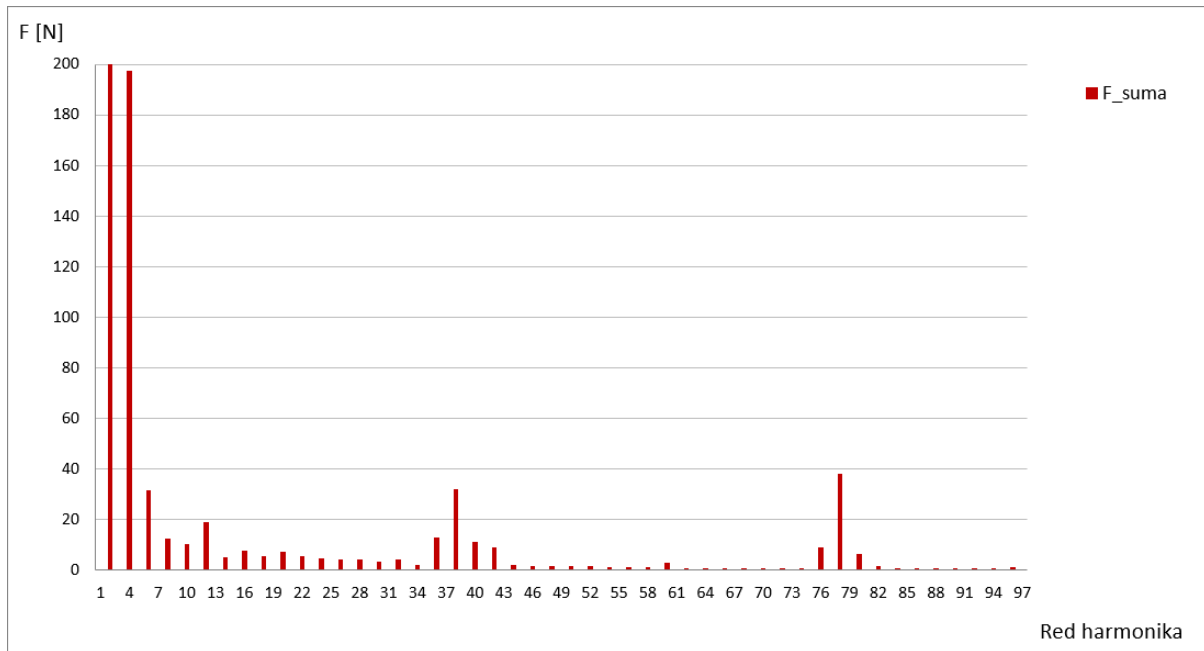
Slika 9.9 Rezultantna radijalna sila na odabranoj lokaciji oboda paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V

Pri nesimetričnom električnom opterećenju generatora, radijalne sile zubi imaju nejednake iznose, tj. raspodjelu različitu od situacije simetričnog rada. Ove nejednakosti dovode do promjene iznosa komponenti sila koje djeluju u smjeru odabrane točke jarma paketa statora (slika 9.8). Posljedično, valni oblik sumarne sile (slika 9.9) ima izraženiju valovitost i veće vršne vrijednosti od situacije simetričnog opterećenja (slika 9.4).



Slika 9.10 Sastav harmonika rezultantne sile u smjeru odabrane lokacije paketa statora pri nesimetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V





Slika 9.11 Povećani prikaz amplituda harmonika sumarne radijalne sile (drugi harmonik djelomično predočen) pri simetričnom opterećenju  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V - 1. harmoniku odgovara 50 Hz

Slikama 9.10 i 9.11 prikazan je sastav harmonika sumarne sile pri nesimetričnom opterećenju, ( $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ). U detaljnije prikazanom spektru frekvencija sumarne sile za slučaj simetričnog i nesimetričnog opterećenja (slike 9.6. i 9.11) moguće je uočiti sljedeće istaknute harmonike:

- 38.i 40. – određeni prvim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 10} = 2 \cdot Q \pm 3^0 = 2 \cdot \frac{N_2}{2p} \pm 1, \quad (9.3)$$

- 36. i 42. – određeni prvim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 11} = 2 \cdot Q \pm 3^1 = 2 \cdot \frac{N_2}{2p} \pm 3, \quad (9.4)$$

- 78. – definiran ukupnim brojem utora statora generatora

$$h_{u\ 2} = N_2, \quad (9.5)$$

- 76.i 80. – određeni drugim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 20} = 2 \cdot (2 \cdot Q \pm 3^0) = 4 \cdot \frac{N_2}{2p} \pm 2, \quad (9.6)$$

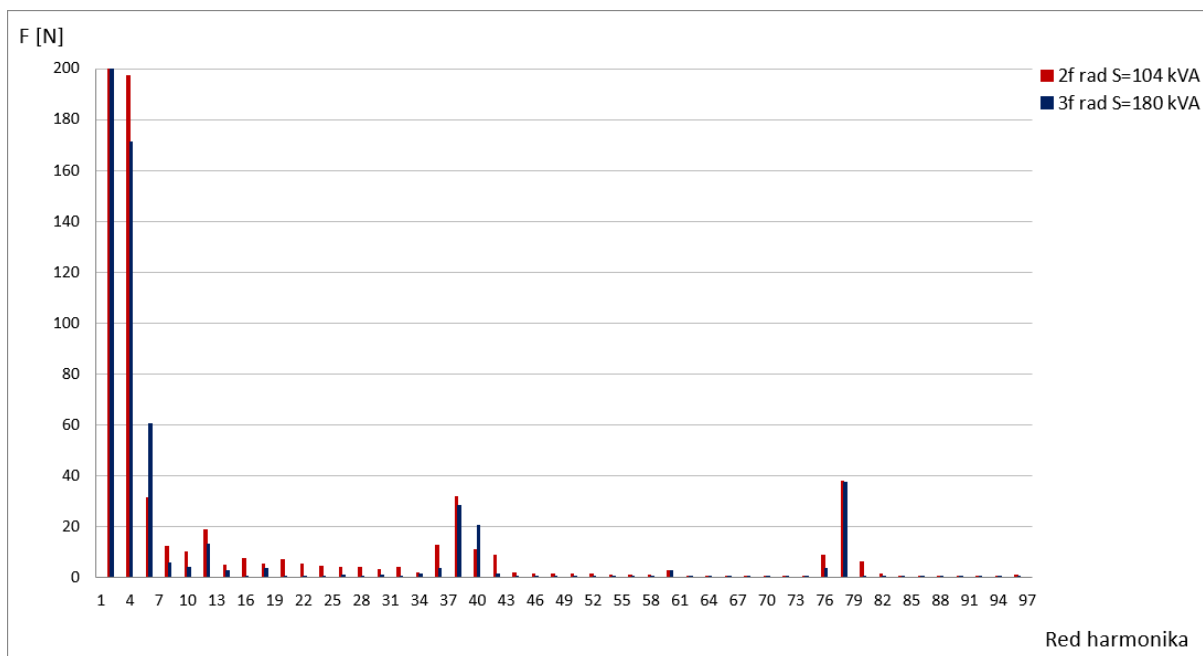
- 60.i 96. – određeni drugim redom utorskih harmonika

$$h_{u\ 22} = 2 \cdot (2 \cdot Q \pm 3^2) = 4 \cdot \frac{N_2}{2p} \pm 18, \quad (9.8)$$

Slikom 9.12 usporedno je prikazan frekvencijski spektar sumarne sile za nesimetrično električno opterećenje ( $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V) sa spektrom pri simetričnom opterećenju ( $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V). Radi zornije usporedbe viših harmonika, prikaz sile ograničen je na raspon 0-200 N. Uslijed ovako odabranih granica prikaza, harmonik 2. reda (frekvencije 100 Hz), kojem amplituda za analizirano stanje simetričnog opterećenja dostiže iznos od 1697 N, a za slučaj analiziranog nesimetričnog opterećenja iznos od 2560 N, prikazan je samo djelomično.

Iako u navedena dva radna stanja kroz fazne namote teče struja iste efektivne vrijednosti  $I=260$  A, drugačija magnetska slika uslijed različitog opterećenja po fazama rezultira s različitim sastavom harmonika valnog oblika sumarne magnetske sile paketa statora.

Moguće je uočiti kako se u slučaju električki nesimetričnog opterećenja u spektru frekvencija pojavljuju harmonici sile koji u stanju simetričnog opterećenja nisu primjetni (16.; 20.; 22.; 28.; 32.; 44. harmonik). Zamjetan je i porast amplituda harmonika zabilježenih u stanju simetričnog opterećenja (2.; 4.; 8.; 10.; 12; 14; 18.; 36.; 38.; 42.; 76; 80. harmonik). Ovakve promjene harmonika sile ukazuju kako se uz jednake iznose faznih struja u slučaju električki nesimetričnog opterećenja mogu očekivati veći iznosi vibracija od stanja simetričnog opterećenja.



Slika 9.12 Usporedba spektra harmonika sumarne radijalne sile za simetrično opterećenje  $S=180$  kVA i nesimetrično opterećenje  $S=104$  kVA, uz  $U=400$  V,  $I=260$  A i  $\cos\varphi=1$  (povećani prikaz harmonika s djelomično predodčenim drugim harmonikom)

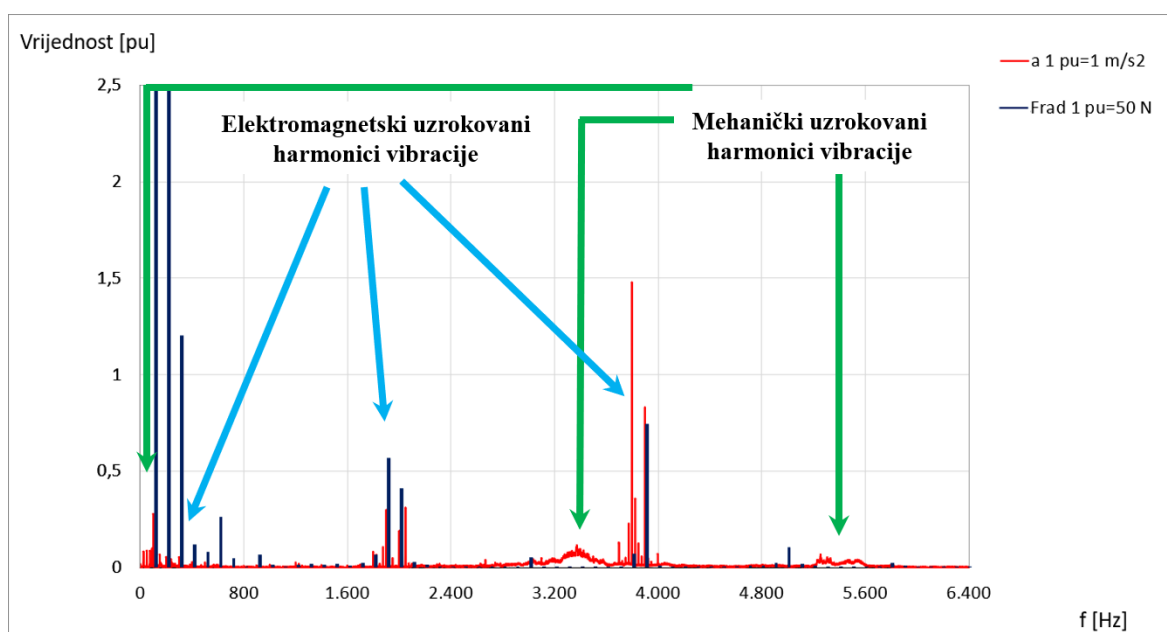


### 9.1.2. Usporedba sastava magnetske sile i vibracija paketa statora

Vibracijski odziv paketa statora snima se kroz vrijeme znatno dulje od jedne periode valnog oblika napona. Osim zbog uklanjanja mogućih smetnji, ovakav pristup omogućuje frekvencijsku analizu i utvrđivanje istaknutih harmonika na frekvencijama nižim od 50 Hz.

Kod analiziranog stroja vrijeme snimanja iznosilo je 10 sekundi za svaku mjerenu radnu točku. Spektar frekvencija određen je metodom usrednjavanja, kod koje je snimka podijeljena na 30 međusobno preklapljenih segmenata, od kojih svaki obuhvaća vrijeme snimanja od 1 s. Za svaki segment određen je spektar frekvencija uz korak 1 Hz te je rezultat usrednjen kroz svih 30 analiziranih segmenata snimke.

Radi lakše usporedbe sastava harmonika izmjerenih vibracija i pobudnih magnetskih sila, njihove iznose moguće je normirati na jedinične vrijednosti (pu) i tako prikazati na istom grafu.

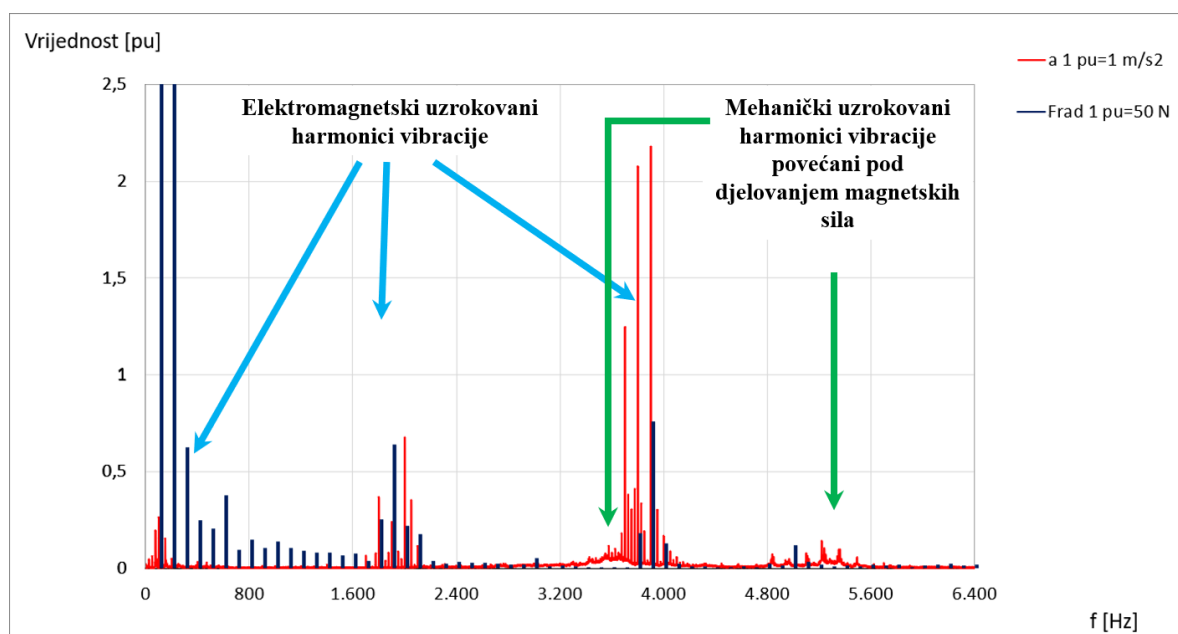


Slika 9.13 Usporedba sastava harmonika radijalne magnetske sile i akceleracije na mjestu P2 paketa statora za simetrično opterećenje  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V (povećani prikaz djelomičnim predodžnjem harmonika na 100 i 200 Hz)

Slikom 9.13 na ovaj način usporedno je prikazan harmonijski sastav magnetske sile koja djeluje na jaram statora i spektar frekvencija snimljenih vibracija na mjernom mjestu P2 paketa statora, za trofazno simetrično radno stanje  $S=180$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V. moguće je uočiti kako u spektru harmonika akceleracija postoje harmonici koji se poklapaju sa spektrom radijalne sile.

Za ove harmonike može se ustvrditi da su posljedica radijalnih magnetskih sila koje djeluju na paket statora. Također se u spektru uočavaju harmonici akceleracije koji se ne poklapaju s harmonicima magnetske sile. Ovi harmonici nalaze se na rasponu frekvencije od 25-100 Hz; 3300-3600 Hz i 5300-5600 Hz. Uzrok pojave ovih harmonika nisu radijalne magnetske sile na paket statora.

Na jednak način moguće je usporediti sastav harmonika radijalne sile i izmjerene akceleracije paketa za slučaj nesimetričnog električnog opterećenja  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V. Na slici 9.14 moguće je uočiti kako postoji poklapanje istaknutih harmonika akceleracija s harmonicima radijalnih sila na većem broju frekvencija nego kod simetričnog opterećenja. Također je vidljivo kako su veće amplitude pojedinih harmonika sile doveli do povećanja harmonika akceleracija istih frekvencija. Kao i kod simetričnog opterećenja, u harmonijskom sastavu akceleracije postoje istaknuti harmonici na rasponu 3300-3600 Hz i 5100-5600 Hz, kojima je primarni uzrok vjerojatno mehaničke prirode. No unutar ovih frekvencija sada su prisutni i određeni istaknuti harmonici rezultantne radijalne sile zubi (3300 Hz, 5200 Hz i 5300 Hz).



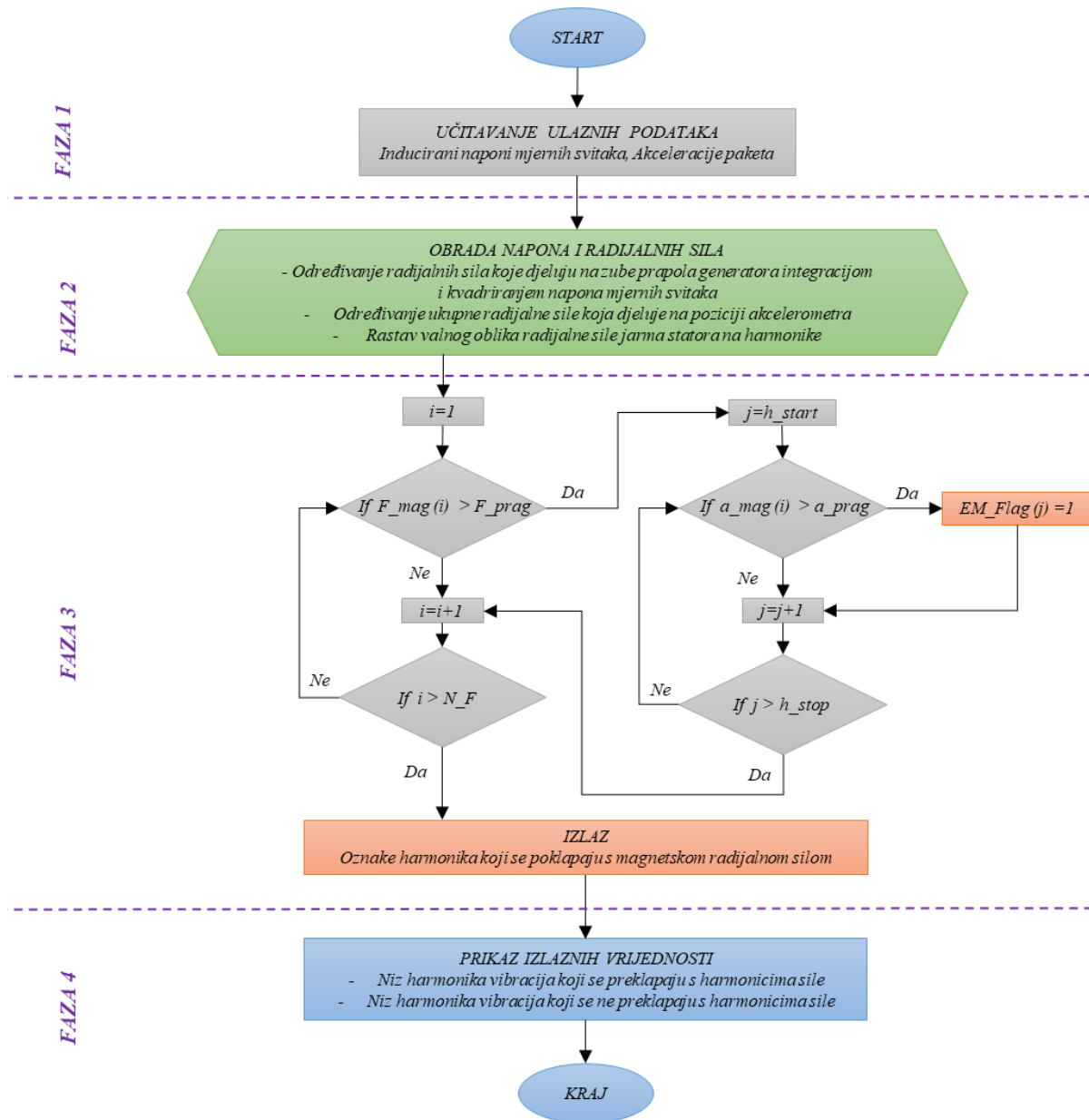
Slika 9.14 Usporedba sastava harmonika radijalne magnetske sile i akceleracije na mjestu  $P2$  paketa statora za nesimetrično električno opterećenje  $S=104$  kVA,  $\cos\varphi=1$ ,  $U=400$  V (povećani prikaz s djelomičnim predočenjem harmonika na 100 i 200 Hz)

## **9.2 Algoritam za razlučivanje harmonika vibracija uzrokovanih elektromagnetskim silama**

U ovom potpoglavlju objašnjen je algoritam za prepoznavanje harmonika vibracija statora sinkronog generatora s istaknutim polovima, koji su posljedica radijalnih magnetskih sila na zube paketa statora. Ovaj algoritam primjenjiv je za slučajeve analize ispravnog generatora, kod kojeg nema kvarova namota ili nedopuštenih ekscentričnih pomaka rotora. Ispravno stanje stroja može se utvrditi postupkom prikazanim u poglavlju 8. Dijagram toka algoritma za razlučivanje harmonika vibracija uzrokovanih elektromagnetskim silama prikazan je slikom 9.15. Iz prethodno prikazanih rezultata (i proračuna i mjerenja) proizlazi da za ulazne podatke algoritma treba koristiti valne oblike napona mjernih svitaka postavljenih na jednom prapolu stroja, tj. na segmentu stroja čija se elektromagnetska slika ponavlja duž oboda. Posebni slučaj predstavlja situacija praznog hoda kod koje je, na osnovi analiza i rezultata 4. 5. i 6. poglavlja, dovoljno poznavati napon samo jednog mjernog svitka za određivanje radijalnih sila ostalih zubi stroja. Za određivanje vibracija paketa dovoljno je koristiti jedan akcelerometar za mjerenje radijalnih ubrzanja, smješten izravno na paket ili na plašt kućišta u zoni njihovog spoja.

Dijagram algoritma sa slike 9.15 može se podijeliti u sljedeće četiri faze:

- **Faza 1:** Inicijalizacija varijabli i učitavanje ulaznih podataka – vrijednosti napona mjernih svitaka za zube obuhvaćene prapolom generatora; ukupno vrijeme snimka sila; niz harmonika izmjerenih akceleracija (izlazni rezultat mjerenja akvizicijske mjerne stanice); frekvencija osnovnog harmonika akceleracija, prag sile, prag akceleracije, raspon frekvencije unutar kojeg se pretražuju harmonici akceleracije bliski harmonicima sile.
- **Faza 2:** Obrada i analiza podataka – određivanje radijalnih sila zubi, superpozicija valnih oblika sila, određivanje spektra harmonika sumarne sile upotrebom brze *Fourierove* transformacije.
- **Faza 3:** Usporedba – usporedba spektra frekvencija resultantne sile sa spektrom frekvencija izmjerenih vibracija; provjera praga detekcije harmonika sile i harmonika vibracija; provjera postojanja istaknutih harmonika vibracija u blizini frekvencija istaknutih harmonika sile.
- **Faza 4:** Zapisivanje – formiranje ispisnih vrijednosti na osnovi izlaznih parametara iz faze 3 te obavješćavanje korisnika o pronađenim poklapanjima spektra frekvencija sila i spektra vibracija.



Slika 9.15 Dijagram toka algoritma za raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih magnetskim radijalnim silama

Kôd algoritma pisan je u sintaksi programa *GNU Octave* [36] i sastoji se od tri dijela. Prvim dijelom algoritma, iz snimljenih valnih oblika napona mjernih svitaka određuju se valni oblici radijalnih sila na zube. Algoritam primjenjiv za proizvoljno pogonsko stanje generatora prikazan je u Prilogu B1.1. Ovaj algoritam matematički je istovjetan onome opisanom u točki 8.2.1., uz jedinu razliku što se obrada ne provodi za 6 zubi već za sve zube obuhvaćene prapolom generatora. Budući da se logički i matematički radi o istom algoritmu, on u nastavku nije ponovno opisivani. Algoritam za izračun sila na zube, primjenjiv samo za prazni hod generatora, prikazan je zasebno u Prilogu B1.2 i dodatno opisan u nastavku.

Kôd drugog dijela algoritma služi za određivanje ukupne radijalne sile koja djeluje u smjeru akcelerometra i dan je u Prilogu B2.

Kôd trećeg dijela algoritma, koji služi za raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih magnetskim radijalnim silama paketa statora, dan je u Prilogu B3. Oznake nizova i varijabli u nastavku teksta odgovaraju korištenima u kôdu.

### **9.2.1. Određivanje radijalnih magnetskih sila za prazni hod generatora**

Osnovni ulazni podatak algoritma predstavlja inducirani napon mjernog svitka snimljen za minimalno jednu punu periodu izlaznog napona. Uz napon mjernog svitka ugrađenog na referentni prvi zub, iz razloga zalihosti algoritmom se obrađuju i valni oblici napona dodatnih mjernih svitaka. U nastavku je opisan postupak analize za situaciju 6 mjernih svitaka ugrađenih u stroj. Dio algoritma kojim su obuhvaćene radnje, od učitavanja podataka u niz naziva *Niz\_U\_Ms* do izračuna valnog oblika radijalne sile pojedinog zuba smještenog u niz *Niz\_F\_Ms\_Zub*, jednak je onome prikazanom u poglavlju 8.2.1. U nastavku je stoga opisana obrada podataka koja slijedi nakon prethodno navedenog dijela.

U praznom hodu generatora, sile na sve zube teoretski imaju isti sastav harmonika, a valni oblici međusobno se razlikuju samo po faznom pomaku. Ovaj električni pomak *Delta\_Ang* ovisi o razmaku između dva susjedna utora pa je navedenu vrijednost u radijanima moguće odrediti poznavanjem ukupnog broja utora (zubi) paketa statora  $N_2$  i broja pari polova:

$$Delta\_ang = \frac{2\pi}{N_2} \cdot p \quad (9.9)$$

Nakon što se unutar *for* petlje upotrebom brojača oznake *i* odredi valni oblik radijalne sile zuba iznad *i*-tog mjernog svitka, on se rastavlja na harmonike. Rastav harmonika provodi se postupkom brze *Fourierove* transformacije upotrebom funkcije *fft* ugrađene u program *Octave*. Rezultati ove funkcije u obliku niza kompleksnih brojeva spremaju se u pomoćni niz *F\_fft*. Istosmjerna vrijednost ovog rastava pohranjuje se kao *i*-ti element u niz *Niz\_F\_0*. Realni dio iz niza kompleksnih brojeva *F\_fft* izdvaja se primjenom funkcije *real* ugrađene u program *Octave* i privremeno sprema u niz *F\_am*. Imaginarni dio iz niza kompleksnih brojeva *F\_fft* izdvaja se upotrebom funkcije *imag* građene u program *Octave* i privremeno sprema u niz *F\_bm*. Amplituda svakog harmonika sile određuje se kao korijen sume kvadrata realne i imaginarne vrijednosti, te se ovaj niz amplituda za svaki od  $N_{sv}$  zubi sprema pod *i*-ti stupac dvodimenzionalnog niza *Niz\_F\_mag*.

$$Niz\_F\_mag(i) = \sqrt{F\_am^2 + F\_bm^2} \quad (9.10)$$

Fazni pomaci harmonika  $F_{ang}$  određuju se za prvi zub kao inverzni tangens omjera imaginarnih  $F_{bm}$  i realnih vrijednosti  $F_{am}$  upotrebom funkcije *atan2* ugrađene u program *Octave*.

Srednja vrijednost amplitude za svaki pojedini harmonik sile određuje se na osnovi vrijednosti pohranjenih u dvodimenzionalni niz  $Niz\_F\_mag$ , određenih za zube svih  $N_{sv}$  mjernih svitaka, upotrebom funkcije *mean*. Ovi iznosi pohranjuju se u niz  $F\_mag\_sr$ . Usrednjeni iznos istosmjerne vrijednosti također se izračunava pomoću funkcije *mean* i pohranjuje u varijablu  $F\_0\_sr$ .

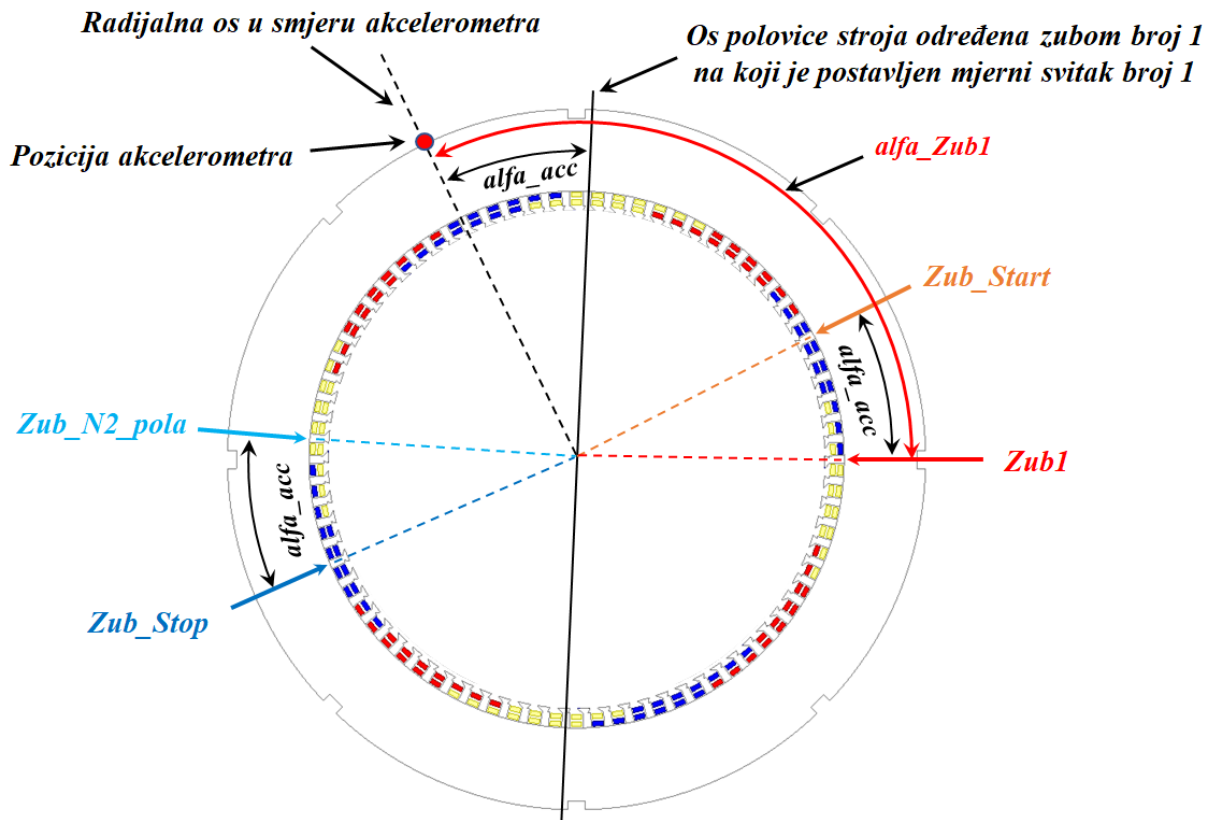
Valni oblik sile određuje se za jedan po jedan zub prapola upotrebom nove *for* petlje. Unutar ove petlje valni oblik radijalne sile određuje se kao suma sinusnih vremenskih valnih oblika svih analizom određenih harmonika. Sile svih zubi dijele usrednjenu vrijednost istosmjerne komponente  $F\_0\_sr$  i usrednjene amplitude harmonika  $F\_mag\_sr$ , a međusobno se razlikuju po iznosu faznog zakreta. Svi fazni zakreti sadrže komponentu  $F_{ang}$  određenu za referentni prvi zub, a razlikuju se po dodatnom pomaku u odnosu na taj zub, koji se može izraziti kao umnožak kutnog razmaka između dva susjedna zuba  $\Delta_{ang}$  i broja zubi između referentnog i  $i$ -tog zuba ( $i-1$ ). U ovom postupku koriste se: pomoćni jedinični niz  $I$  s brojem elemenata koji odgovara broju podataka vremenskog niza, niz  $t$  vremenskih trenutaka za koje se izračunava valni oblik, niz  $k$  rednih brojeva analiziranih harmonika i varijabla  $w$  koja predstavlja kutnu brzinu osnovnog harmonika napona izraženu u radianima.

Izračunati valni oblik sile za pojedini zub smješta se u dvodimenzionalni niz  $Niz\_F\_zubi$  na poziciju  $i$ -tog stupca. Nakon što se postupak provede za sve zube prapola, algoritam izlazi iz *for* petlje te se izračunati valni oblici sila spremaju u dokument naziva ' $F\_zubi\_prapol.csv$ '. Na ekranu glavnog prozora ispisuje se poruka '*Sile za zube prapola izračunate su i spremljene u dokument 'F\_zubi\_prapol.csv'.*' Time završava dio algoritma vezan za izračun radijalnih sila zubi u praznom hodu generatora na osnovi napona mjernih svitaka.

### **9.2.2. Određivanje ukupne radijalne sile u smjeru pozicije akcelerometra**

Algoritam kao ulazne podatke koristi valne oblike sila za zube obuhvaćene prapolom generatora, učitane za minimalno jednu punu periodu izlaznog napona. Ove vrijednosti učitavaju se iz ulazne datoteke naziva ' $F\_zubi\_prapol.csv$ ' u dvodimenzionalni niz naziva  $Niz\_F$ , s brojem kolona jednakim broju učitanih sila i brojem redaka jednakim broju učitanih vremenskih trenutaka valnog oblika sile.

Dodatni ulazni podaci potrebni za provedbu algoritma su ukupni broj zubi statora  $N_2$ , broj zubi statora obuhvaćen prapolom  $N_{zubi}$  i kut između pozicije akceleratora i prvog zuba iz učitane niza sila  $\alpha_{Zub1}$  (slika 9.16).



Slika 9.16 Međusobni odnos pozicija akcelorometra i zuba za koji su učitane sile

Po učitavanju ulaznih podataka određuje se ukupan broj vremenskih točaka  $N$ , kojeg dijele svi učitani valni oblici sila smješteni u dvodimenzionalni niz  $Niz\_F$ , upotrebom funkcije *length* ugrađene u program *Octave*. U ovoj fazi određuju se i pomoćne varijable, potrebne u kasnijim koracima obrade podataka: utorski korak zuba statora  $TauS$  izražen u geometrijskim stupnjevima, broj zubi polovice stroja  $N2\_polu$ , cijeli broj zubi koji je obuhvaćen četvrtinom stroja  $N2\_cetvrtina$  i varijabla  $Nepar$  kojom se utvrđuje je li broj zubi obuhvaćen polovicom stroja paran ili neparan.

Iznos varijable  $N2\_cetvrtina$  određuje se kao cijeli dio rezultata dijeljenja polovine broja zubi statora  $N2\_polu$  s brojem 2 upotrebom funkcije  $floor$ , dok se iznos varijable  $Nepar$  određuje kao ostatak ovog dijeljenja, upotrebom funkcije  $mod$ . Obje spomenute funkcije  $floor$  i  $mod$  ugrađene su u program *Octave*. Nakon ovoga slijedi faza obrade podataka.

Prema uvjetima simetrije namota, koji su osnova za projektiranje električnih strojeva [49], svi prapolozi stroja imaju međusobno jednaku raspodjelu faznih vodiča po utorima, a dvije polovice stroja cirkularno su simetrične u slučaju parnog broja prapolova.

Za takav slučaj, broj prapolova na polovici stroja  $N\_prapol\_seg$  određuje se kao omjer broja zubi polovice stroja  $N2\_pola$  i broja zubi jednog prapola  $Nzubi$ .

Upotrebom *if* uvjeta provjerava se je li broj prapolova na polovici stroja  $N\_prapol\_seg$  veći od 1. U slučaju ovdje analiziranog stroja broj zubi prapola jednak je polovici ukupnog broja zubi statora ( $Nzubi = N2\_pola = 39$ ) tj.  $N\_prapol\_seg$  jednak je jedinici pa se dvodimenzionalni niz  $Niz\_F$  ne proširuje. Ukoliko stroj sadrži veći broj prapolova na polovici oboda, valne oblike učitanih radijalnih sila potrebno je definirati i za preostale zube polovice stroja. Ovaj postupak provodi se upotrebom dvostruke *for* petlje. Vanjskom petljom povećava se brojač  $j$  u rasponu od drugog do  $N\_prapol\_seg$  segmenta. Unutarnjom petljom se upotrebom pomoćnog brojača  $i$  za svaki zub prapola definira indeks  $k$  koji u  $j$ -tom prapol segmentu dijeli isti valni oblik radijalne sile sa  $i$ -tim zubom. Za svaki novi  $k$  indeks proširuje se dvodimenzionalni niz  $Niz\_F$  i pod novi indeks se kopira valni oblik sukladne radijalne sile  $i$ -tog zuba.

Izračunom kuta  $alfa\_acc$  određuje se odstupanje radijalne osi pozicije akcelometra od referentne osi polovice stroja, određene zubom broj 1 na koji je postavljen prvi mjerni svitak.

$$alfa\_acc = alfa\_Zub1 - \frac{TauS}{2} \cdot \left( \frac{N2}{2} - 1 \right) \quad (9.11)$$

Na temelju omjera kuta  $alfa\_acc$  i utorskog koraka  $TauS$  utvrđuje se broj cijelih zubi  $Nzub\_pomak$ , za koji su međusobno pomaknute ove dvije osi. Ostatak kutne razlike smješta se u varijablu  $Kut\_acc$ .

Pomoću *if* uvjeta provjerava se broj zubi  $Nzub\_pomak$  za koje je pozicija akcelometra udaljena od osi definirane zubom prvog mjernog svitka. Ukoliko ova razlika postoji, u polju  $Niz\_F$  rotira se poredak niza sila, tako da se pod indeks 1 smješta valni oblik sile zuba koji je za  $Nzub\_pomak$  mjesta pomaknut od zuba prvog mjernog svitka. Ovo se provodi pomoću funkcije *circshift* ugrađene u program *Octave*. Cirkularnom zamjenom indeksa, valni oblici sila koji su bili na početku polja  $Niz\_F$  prebacuju se na krajnje pozicije. Ovakva zamjena je korektna jer dvodimenzionalni niz  $Niz\_F$  sadrži valne oblike sila za polovicu zubi stroja, a dijametralno smješteni zubi (u analiziranom slučaju to su parovi 1-40, 2-41, 3-42,...39-78) imaju jednake valne oblike sila u regularnom stanju generatora, tj. u situaciji kada ne postoji kvar namota ili ekscentričnost rotora. Po provedbi ove operacije, pod indeksom 1 polja  $Niz\_F$  nalazi se valni oblik sile zuba  $Zub\_Start$ , a pod zadnjim indeksom  $N2\_pola$  valni oblik sile zuba  $Zub\_Stop$ .



Pomoću *if* uvjeta, ovisno o iznosu varijable *Nepar* utvrđuju se kutni razmaci osi simetrala krajnjih zubi *Zub\_Start* i *Zub\_Stop* od radijalne osi pozicije akcelerometra:

- Ako polovica stroja sadrži neparan broj zubi (*Nepar* = 1), kut za početni zub *Kut\_Start* i kut za završni zub *Kut\_Stop* određuju se po izrazima:

$$Kut\_Start = -N2\_cetvrtina \cdot TauS - Kut\_acc , \quad (9.12)$$

$$Kut\_Stop = N2\_cetvrtina \cdot TauS - Kut\_acc . \quad (9.13)$$

- Ako polovica stroja sadrži paran broj zubi (*Nepar* = 0) kut za početni i završni zub određuju se po izrazima:

$$Kut\_Start = -\left(N2\_cetvrtina - \frac{1}{2}\right) \cdot TauS - Kut\_acc , \quad (9.14)$$

$$Kut\_Stop = \left(N2\_cetvrtina - \frac{1}{2}\right) \cdot TauS - Kut\_acc . \quad (9.15)$$

Uz ovako određene iznose početnog *Kut\_Start* i završnog *Kut\_Stop* kuta te poznavanje utorskog koraka *TauS*, određuje se niz kutova za polovicu zubi statora simetrično raspoređenih u odnosu na poziciju akcelerometra. Ove vrijednosti izražene u geometrijskim stupnjevima smještaju se u niz *Kut\_Zub*, dok se njihovi iznosi u radijanima smještaju u niz *Kut\_Zub\_rad*.

Za svaki zub polovice stroja, koja okružuje poziciju akcelerometra, određuje se komponenta radijalne sile čiji se smjer poklapa sa smjerom radijalne osi akcelerometra. Ove komponente utvrđuju se množenjem vrijednosti radijalnih sila zubi spremljenih u *Niz\_F* s kosinus vrijednostima pripadnih kutova spremljenih u niz *Kut\_Zub\_Rad*. Izračunati iznosi spremaju se u pomoćni dvodimenzionalni niz *Niz\_F\_a*.

Ukupna vrijednost radijalne sile koja djeluje na poziciji akcelerometra određuje se sumiranjem sila svih *N2\_pola* zuba pohranjenih u dvodimenzionalni niz *Niz\_F\_a*. Ovaj postupak, provodi se pomoću *for* petlje za jednu po jednu vremensku točku. Pritom se vrijednost brojača oznake *i* jedinično povećava u rasponu od 1 do *N*. U svakom koraku ove petlje određuje se vrijednost sume sila svih zubi upotrebom funkcije *sum* ugrađene u program *Octave*. Ova vrijednost sprema se u pomoćni niz naziva *F\_suma*.

Obradom podataka utvrđen valni oblik resultantne radijalne sile, koja djeluje na poziciji akcelerometra, pohranjuje se u datoteku naziva '*F\_suma.csv*'. Time završava dio algoritma namijenjen izračunu ove sile.

### **9.2.3. Raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih magnetskom radijalnim silama**

Glavne ulazne podatke ovog dijela algoritma predstavlja valni oblik sumarne radijalne sile koja djeluje na poziciji akcelerometra i mjerenjem određen spektar frekvencija akceleracija paketa statora. Sumarna radijalna sila, čiji valni oblik obuhvaća vrijeme od minimalno jedne pune periode izlaznog napona, preuzima se iz prethodnog dijela algoritma ili učitava iz ulazne datoteke naziva '*F\_suma.csv*' u niz naziva *F\_suma*. Spektar frekvencija akceleracija paketa statora učitava se iz ulazne datoteke naziva '*a\_paket.csv*' u niz naziva *a\_Mag*.

Frekvencijski korak niza harmonika akceleracija ovisi o postavkama akvizicijske mjerne stanice namijenjene za snimanje vibracija. Iz ovog razloga je uz niz amplituda akceleracija potrebno unijeti i iznos frekvencije prvog harmonika spektra akceleracija *f<sub>1a</sub>*. Slično je potrebno unijeti i podatak o ukupnom vremenu *T*, koje odgovara učitanoj valnom obliku sile. Uz navedene ulazne podatke, u početnoj fazi potrebno je definirati i raspon susjednih frekvencija za koji se provjerava utjecaj pojedinog harmonika sile na spektar vibracija *f\_raspon*. Ovaj raspon frekvencija određuje se temeljem iznosa ukupnog vremena učitanih snimaka, koji u ovom slučaju iznosi  $T = 0,02$  s i iznosa ukupne mjerne nesigurnosti, koja ovdje iznosi 8,37 %. Ukoliko se rasponom žele obuhvatiti harmonici uz 95 % točnosti izračuna, ukupnu mjernu nesigurnost potrebno proširiti s  $k = 2$ , pa ona tada iznosi  $\pm 16,75$  %. Raspon promatranih frekvencija određen temeljem ovih podataka iznosi:

$$f_{raspon} = \pm \frac{16,75}{100 \cdot T} = \pm \frac{16,75}{100 \cdot 0,02} = \pm 8,37 \text{ Hz} \quad . \quad (9.16)$$

U ovom slučaju spektar frekvencija vibracija određen je uz korak od  $f_a = 1$  Hz, pa je potrebno provjeriti po 8 viših i nižih harmonika vibracija oko svakog promatranog harmonika sile.

Nakon učitavanja ulaznih podataka određuje se ukupan broj vremenskih točaka *N* učitanoj niza sile, broj harmonika za analizu sile *N<sub>F</sub>* i broj učitanih harmonika niza akceleracija *N<sub>a</sub>*. Također se određuju redni niz harmonika sile *k<sub>F</sub>* i akceleracija *k<sub>a</sub>* te odgovarajući nizovi frekvencija *f<sub>F</sub>* i *f<sub>a</sub>*.

Rastav harmonika valnog oblika sumarne sile pohranjenog u niz *F\_suma* provodi se postupkom brze *Fourierove* transformacije upotrebom *fft* funkcije. Amplitude harmonika sile određuju se za svaki harmonik kao korijen sume kvadrata realne i imaginarne vrijednosti *fft* funkcijom određenih članova, te se pohranjuju u niz *F\_mag*.

Postotne granice za detekciju istaknutog harmonika sile  $F_{prag\_p}$  i akceleracije  $a_{prag\_p}$  u iznosu od 8,37 % postavljene su na temelju izračunate ukupne mjerne nesigurnosti ispitnih mjerenja (tablica 3.10). Ovi pragovi ovise o parametrima stroja i mjernoj konfiguraciji (karakteristikama mjerne opreme, netočnosti ugradnje i karakteristikama mjernih senzora) pa je njihove vrijednosti potrebno odabrati sukladno ovim uvjetima mjerenja.

Apsolutni iznos granične vrijednosti sile  $F_{prag}$  određuje se množenjem vrijednosti osnovnog harmonika sile s iznosom  $F_{prag\_p}$ . Pomoću funkcije *find* ugrađene u program *Octave*, u nizu frekvencija harmonika akceleracija pronalazi se indeks  $h\_a1$ , koji odgovara frekvenciji osnovnog harmoniku sile. Množenjem vrijednosti  $a_{prag\_p}$  s harmonikom akceleracije indeksa  $h\_a1$  određuje se apsolutna granična vrijednost  $a_{prag}$ .

Iz spektra akceleracija uklanjaju se harmonici iznosa manjeg od definiranog praga prepoznatljivosti  $a_{prag}$ . Ovo se provodi upotrebom *for* petlje pri čemu se vrijednost brojača oznake  $i$  jedinično povećava u rasponu od 1 do  $N\_a$ . U svakom koraku ove petlje upotrebom *if* uvjeta provjerava se je li pojedini harmonik akceleracije manji od granične vrijednosti  $a_{prag}$ . Ukoliko jest manji, vrijednosti mu se postavlja na ništicu.

U trećoj fazi algoritma provodi se usporedba harmonika sila s harmonicima vibracija harmonik po harmonik. Kako vibracije mogu biti uzrokovane mehaničkim pojavama bitno različitih frekvencija od električnih, uobičajeno su harmonici akceleracije određeni s manjim frekvencijskim korakom od harmonika sila. Ovo znači da se unutar raspona frekvencija dva susjedna harmonika sile može nalaziti više harmonika vibracija. U svrhu povećanja brzine provedbe algoritma, harmonici sile definirani su kao niz za primarni prolaz, a harmonici vibracija kao niz za sekundarni prolaz usporedne *for* petlje.

U vanjskoj *for* petlji brojač harmonika sile  $i$  povećava se u rasponu od 1 do  $N\_F$ . U svakom koraku petlje provjerava se ima li amplituda  $i$ -tog harmonika sile  $F\_mag(i)$  veću vrijednost od definiranog praga  $F_{prag}$ . Ako dotični harmonik sile prelazi definirani prag, na osnovi iznosa njegove frekvencije  $f\_F$  i ulaznih postavki određenog raspona pretraživanja  $f\_raspon$  određuje se raspon susjednih frekvencija za provjeru harmonika akceleracija.

$$f\_start = f\_F - f\_Raspon \quad (9.17)$$

$$f\_stop = f\_F + f\_Raspon \quad (9.18)$$

Pomoću *if* uvjeta provjerava se postavljena vrijednost varijabli  $f\_start$  i  $f\_stop$ . Ako ove vrijednosti izlaze iz raspona obuhvaćenih spektrom frekvencija akceleracija, provodi se korekcija. Vrijednost varijable  $f\_start$  prilikom provjera prvih harmonika niza  $a\_Mag$  može

poprimiti vrijednost nižu od prve frekvencije  $f_{la}$ . U slučaju da se to dogodi, iznos ove varijable postavlja se na frekvenciju najnižeg harmonika u nizu  $f_{la}$ .

Na sličan način vrijednost varijable  $f_{stop}$  korigira se na frekvenciju najvišeg harmonika u nizu  $f_a(N_a)$ , ako vrijednost određena jednadžbom 9.13. premaši iznos najvećeg harmonika obuhvaćenog nizom  $a_{Mag}$ .

Upotrebom funkcije *find* u nizu frekvencija harmonika akceleracija pronalazi se indeks  $h_{start}$ , koji odgovara početnoj frekvenciji pretrage  $f_{start}$  i indeks  $h_{stop}$ , koji odgovara završnoj frekvenciji pretrage  $f_{stop}$ .

Unutarnja *for* petlja izvodi se uz promjenu brojača harmonika akceleracija  $j$  u rasponu od  $h_{start}$  do  $h_{stop}$ . Unutar ovog raspona, za svaki harmonik akceleracija upotrebom *if* uvjeta provjerava se prelazi li iznos amplitude  $a_{mag}(j)$  graničnu vrijednost  $a_{prag}$ . Ako je ovaj uvjet zadovoljen, na  $j$  poziciju niza  $EM\_Flag$  postavlja se vrijednost '1'.

Nakon što završe petlje provjere, u četvrtoj fazi formiraju se vrijednosti za ispis. Zbrojem vrijednosti niza  $EM\_Flag$  pomoću funkcije *sum* određuje se ukupni broj istaknutih harmonika akceleracija koji se poklapa s harmonicima magnetskih sila. Broj ovih harmonika pohranjuje se pomoćnu varijablu  $Det\_Harm$ . Upotrebom *if* uvjeta provjerava se postoje li harmonici akceleracija uzrokovani magnetskim silama. Ukoliko je vrijednost  $Det\_Harm$  jednaka nuli, tj. nije pronađeno poklapanje ni za jedan harmonik, na glavnom ekranu *Octave* sučelja ispisuje se poruka '*Nije pronađen ni jedan harmonik akceleracija koji se podudara sa harmonicima sile*' i program prekida s radom.

Ukoliko ovakvi harmonici postoje, definiraju se dva zasebna niza harmonika. U jedan, naziva  $a_{EM}$ , smještaju se amplitude svih harmonika akceleracija za koje je aktivirana  $EM\_Flag$  oznaka, dok se u drugi niz naziva  $a_{Meh}$  smještaju amplitude svih preostalih istaknutih harmonika iz niza  $a_{Mag}$ .

Istovjetnim postupkom razdvajaju se i vrijednosti niza frekvencija  $f_a$  na frekvencije označene  $EM\_Flag$  nizom, smještene u niz  $f_{a\_EM}$ , i na preostale frekvencije spremljene u niz  $f_{a\_Meh}$ .

$$a_{EM} = EM\_flag \cdot a_{Mag} \quad (9.19)$$

$$a_{Meh} = a_{Mag} - a_{EM} \quad (9.20)$$

$$f_{a\_EM} = EM\_flag \cdot f_a \quad (9.21)$$

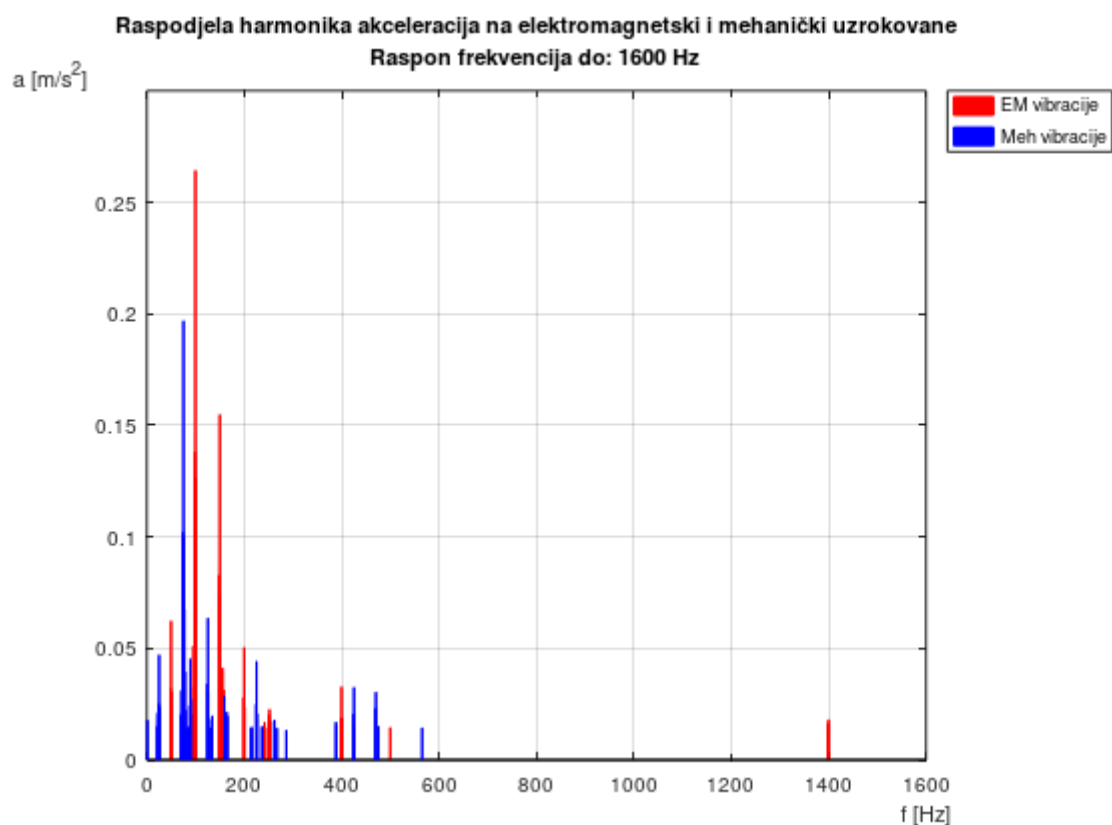
$$f_{a\_Meh} = f_a - f_{a\_EM} \quad (9.22)$$

Ovako definirani nizovi sadrže i elemente iznosa jednakog nuli. Upotrebom funkcije *nonzeros* ugrađene u program *Octave* u dvodimenzionalni niz *Niz\_EM* smještaju se nizovi *a\_EM* i *f\_a\_EM* s uklonjenim ničicama, a u *Niz\_Meh* na jednak način sažeti nizovi *a\_Meh* i *f\_a\_Meh*.

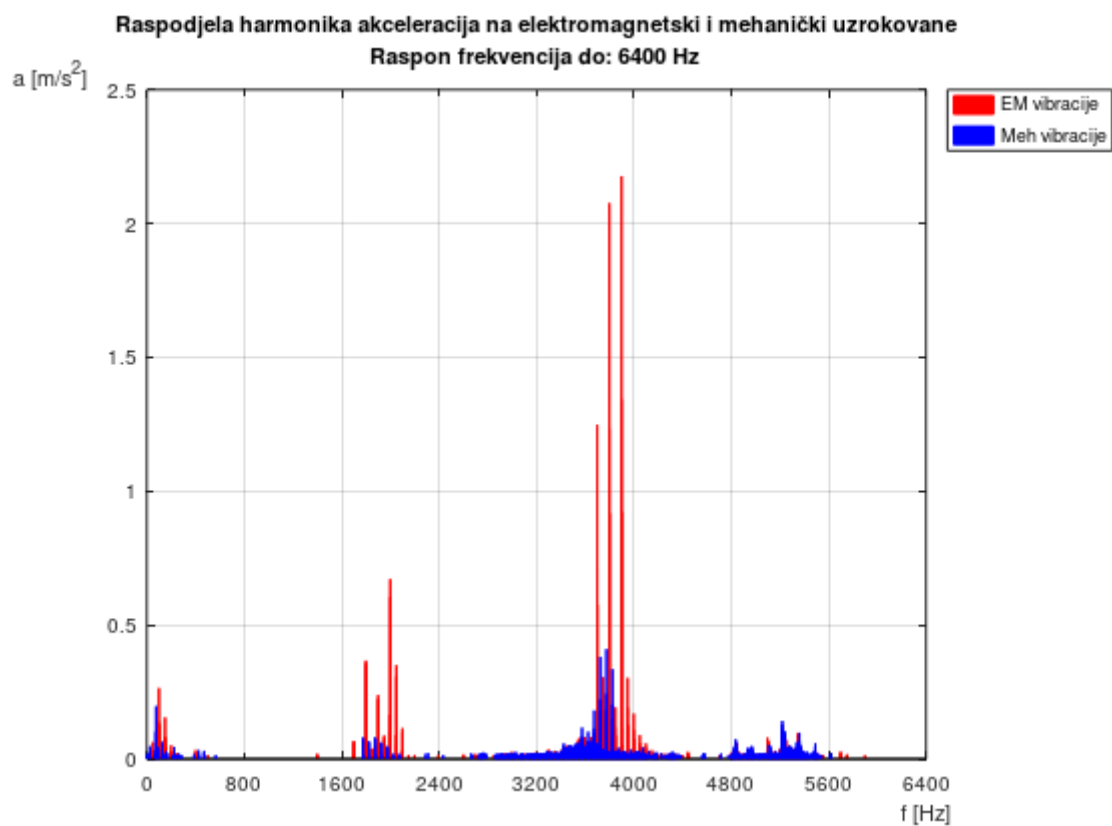
Vrijednosti niza *Niz\_EM*, koji sadrži harmonike akceleracija prisutne u sastavu harmonika radijalnih sila, pohranjuju se u datoteku naziva '*a\_EM.txt*'. Vrijednosti niza *Niz\_Meh*, u kojem se nalaze harmonici akceleracija koji su posljedica mehaničkih uzroka, pohranjuju se u datoteku naziva '*a\_Meh.txt*'. Nizovi harmonika *a\_EM* i *a\_Meh* prikazuju se usporedno na istom stupčanom grafu u međusobno različitim bojama, upotrebom naredbe *bar*. Slikom 9.17 prikazan je primjer zapisa pohranjenog u '*a\_EM.txt*' datoteku, slikom 9.18 ispisni graf algoritma za raspon frekvencija 0-1600 Hz, a slikom 9.19 za raspon 0-6400 Hz.

| f_EM[Hz] | a_EM [m/s <sup>2</sup> ] |
|----------|--------------------------|
| 49       | 0.03193242865802725      |
| 50       | 0.06228129735321832      |
| 51       | 0.03052918276010676      |
| 96       | 0.05097872105104246      |
| 97       | 0.03264919600847776      |
| 99       | 0.1380050723705473       |
| 100      | 0.2642831814550445       |
| 101      | 0.1264393135065198       |
| 149      | 0.0828122575468149       |
| 150      | 0.1548063306199071       |
| 151      | 0.07292729255909615      |
| 154      | 0.02788797231782906      |
| 155      | 0.03379334253961866      |
| 156      | 0.04122147498574014      |
| 157      | 0.02245548930662612      |
| 158      | 0.0314508664427548       |
| 199      | 0.02796592569538867      |
| 200      | 0.05044145120830684      |
| 201      | 0.02349810630667927      |
| 252      | 0.02267196506701613      |
| 400      | 0.03275438901887807      |
| 1699     | 0.06506327689257589      |
| 1700     | 0.0654                   |
| 1798     | 0.07938060216450868      |
| 1799     | 0.367332274650622        |
| 1800     | 0.3562569297571628       |
| 1801     | 0.0692514981787398       |
| 1849     | 0.03884726502599636      |
| 1850     | 0.03688414293432884      |
| 1898     | 0.05509310301662088      |
| 1899     | 0.2385673908982533       |
| 1900     | 0.222813150419808        |
| 1901     | 0.0406176070196165       |
| 1949     | 0.08699752870053264      |
| 1950     | 0.07963114968402754      |
| 1998     | 0.1648957246262013       |
| 1999     | 0.6715809705463668       |
| 2000     | 0.6038667071465358       |

Slika 9.17 Ispisna lista harmonika koji se podudaraju s EM silama iz *a\_EM.txt* dokumenta



Slika 9.18 Rezultat algoritma za razlučivanje harmonika vibracija: analiza za raspon  $f=0$ -1600 Hz



Slika 9.19 Rezultat algoritma za razlučivanje harmonika vibracija: analiza za raspon  $f=0$ -6400 Hz

### **9.3. Poteškoće određivanja spektra harmonika magnetske sile paketa statora mjerenjem**

Kroz poglavlje 4.1 i točku 5.2.3 prikazan je način određivanja radijalne magnetske sile koja djeluje na pojedini zub, obradom induciranog napona mjernog svitka postavljenog na radijalnu plohu zuba. Analizama provedenim u poglavlju 5 dobiven je uvid u periodičnost ponavljanja radijalnih magnetskih sila zubi statora za simetrična i nesimetrična opterećenja, koja je potvrđena rezultatima mjerenja prikazanim u poglavlju 6. Pomoću ovih informacija moguće je utvrditi najmanji broj zubi na temelju kojeg se može odrediti sastav harmonika ukupne radijalne sile paketa statora.

Prazni hod generatora predstavlja posebno pogonsko stanje po pitanju izračuna magnetskih sila. Kroz fazne namote ne teku struje pa je magnetsko polje stroja definirano samo uzbuđom rotora. Radijalna sila svakog zuba tada ima jednak sastav harmonika. Radijalne sile na zube međusobno se razlikuju samo po faznom zakretu koji se jednostavno izračunava temeljem osnovnih geometrijskih obilježja stroja. U ovom posebnom slučaju sile na zube moguće je odrediti na osnovi mjerenja napona samo jednog mjernog svitka, po postupku opisanom u točki 9.2.1.

U slučaju električnog opterećenja sinkronog generatora s istaknutim polovima, za određivanje magnetske sile na paket statora potrebno je poznavati silu za broj zubi obuhvaćen prapolom stroja, tj. za segment stroja čija se elektromagnetska slika ponavlja duž oboda. Da bi se mjerenjem mogao odrediti sastav harmonika ukupne magnetske sile na paket električki opterećenog sinkronog generatora, potrebno je ugraditi po jedan mjerni svitak na svaki od ovih zubi.

Međutim, ukoliko postoji ekscentrični pomak rotora ili neka vrsta poremećaja, kao što je npr. međuzavojni kratki spoj uzbuđnog namota, više ne vrijede pravila elektromagnetske simetrije duž oboda stroja. U takvim slučajevima je potrebno promatrati silu svih zubi generatora i to tijekom jednog punog okreta rotora.

Ugradnja mjernih svitaka na svaki zub stroja predstavlja nepraktično rješenje, koje može lako zakazati ako se pojavi kvar i na jednom od mjernih svitaka. Popravak predstavlja tehnički problem budući da zamjena svitka podrazumijeva vađenje rotora iz prostora statora, a njegovo ponovno umetanje može dovesti do novih oštećenja svitaka.

Uslijed navedenih poteškoća, umjesto mjerenja induciranih napona po svim zubima, pogodnije je u stroj ugraditi svega nekoliko na odgovarajući način razmještenih svitaka te njihove odzive iskoristiti za analizu sila u praznom hodu i verifikaciju računskog MKE modela. Takvim modelom moguće je izračunati sile i spektar frekvencija izmjerenih vibracija uspoređivati s računski određenim silama za različita pogonska stanja generatora.

## **10. Zaključak**

Disertacijom je obrađeno područje izračuna i analize magnetskih sila i njima uzrokovanih vibracija za slučajeve simetričnih i električki nesimetričnih pogonskih stanja sinkronog generatora s istaknutim polovima. Analiziran je utjecaj promjene snage, faktora snage i različitih kombinacija isključenja faza statorskog namota, na raspodjelu magnetskih sila po zubima statora i njima uzrokovanih vibracija paketa.

U cilju utvrđivanja valnih oblika radijalnih sila koje djeluju na zube paketa statora, opisan je odgovarajući postupak obrade napona induciranih u mjernim svitcima smještenim na radijalne plohe zubi statora. Ovaj postupak podrazumijeva integraciju i kvadriranje valnog oblika napona inducirano u mjernom svitku uslijed promjena magnetskog polja u zračnom rasporu stroja. Razrađena je metodologija superpozicije radijalnih sila za zube obuhvaćene prapolom, tj. segmentom aktivnog dijela stroja čija se elektromagnetska slika ponavlja po obodu. Ovim postupkom utvrđuje se sastav harmonika ukupne magnetske sile koja djeluje u promatranoj točki jarma paketa statora. Usporedbom spektra harmonika akceleracija određenih mjerenjem i spektra harmonika radijalne sile koja djeluje na paket, razlučuju se harmonici vibracija uzrokovani elektromagnetskom pobudom. Razrađene metodologije određivanja valnog oblika radijalne sile iz inducirano napona mjernog vitka, superpozicije radijalnih sila i usporedbe harmonika resultantne radijalne sile s harmonicima vibracija predstavljaju prvi znanstveni doprinos.

Analize naponskih odziva mjernih svitaka, radijalnih magnetskih sila na zube statora i njima uzrokovanih vibracija paketa statora najprije su provedene za slučajeve praznog hoda i simetričnih pogonskih stanja generatora. MKE proračunima i mjerenjima utvrđeno je na koji način se ove vrijednosti mijenjaju s opterećenjem. Potvrđeno je kako su sile na pojedine zube u ovakvim pogonskim stanjima podjednakih iznosa.

Nakon simetričnih pogonskih stanja, slične analize su provedene za niz električki nesimetričnih opterećenja generatora. Međusobnom usporedbom izračunatih i izmjerenih veličina potvrđeno je kako u nesimetričnim pogonskim stanjima postoje zamjetne razlike među silama na pojedine zube. Potvrđeno je kako pri nesimetričnim opterećenjima vršne vrijednosti magnetskih sila zubi i njima uzrokovane vibracije poprimaju značajno veće iznose od u simetričnim pogonskim stanjima, uz isti iznos izlazne snage ili statorske struje. Mjerenjima su potvrđeni proračunski rezultati o utjecaju snage i faktora snage na mjesto pojave i iznos maksimalne sile.



Potvrđeno je da vibracije paketa ovise o iznosima magnetskih sila na zube statora i da raspored sila po zubima utječe na mjesto pojave povećanih vibracija. Dokazano je da se proračunom mogu odrediti ove međuovisnosti.

Također je pokazano da se usporedbom numerički određenih i izmjerenih akceleracija mogu razlučiti elektromagnetski uzrokovane od mehanički uzrokovanih vibracija. Rezultatima je utvrđeno kako za pouzdanu funkcionalnost razmatrane metodologije utvrđivanja harmonijskog sastava sumarne sile na jaram statorskog paketa treba radijalne sile odrediti barem za zube obuhvaćene zonom jednog prapola. Nove spoznaje o utjecaju nesimetričnog električnog opterećenja na magnetske sile zubi statora i vibracije paketa statora predstavljaju drugi znanstveni doprinos.

Radi utvrđivanja električne nesimetrije putem magnetskih polja u zračnom rasporu stroja, razrađena je metodologija koja se bazira na analizi napona mjernih svitaka postavljenih na radijalnu plohu zuba statora. Raspored mjernih svitaka ugrađenih u stroj omogućio je utvrđivanje pojave nesimetričnog opterećenja. Proračunom i mjerenjima dokazano je da se pri nesimetričnim opterećenjima valni oblici induciranih napona dijametralno postavljenih svitaka za generator s parnim brojem prapolova međusobno poklapaju. Potvrđeno je kako se upotrebom dva svitka međusobno razmaknuta za pola polnog koraka može prepoznati pojava električne nesimetrije, no i da navedeni raspored svitaka nije najbolji izbor za ovakvu primjenu.

Na osnovi provedenih analiza razvijen je algoritam za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja za stroj s parnim brojem prapolova, baziran na obradi induciranih napona šest mjernih svitaka. Od toga su prva tri svitka međusobno razmaknuta za po dvije trećina polnog koraka, a druga tri su dijametralno postavljeni parovi od prva tri svitka. Utvrđivanje električne nesimetrije podrazumijeva obradu snimljenih napona mjernih svitaka i usporedbu obradom dobivenih valnih oblika radijalnih sila koje djeluju na zube iznad dotičnih svitaka. Pojava nesimetrije utvrđuje se na osnovi međusobne razlike vršnih vrijednosti radijalnih sila koje djeluju na zube međusobno razmaknute za po dvije trećine polnog koraka. S ciljem razlikovanja slučaja nesimetričnog električnog opterećenja od drugačijih vrsta poremećaja, kao što su ekscentrični pomak rotora ili kvar uzbudnog namota, promatraju se naponi na međusobno dijametralno smještenim svitcima. Poklapanje valnih oblika napona induciranih u ovako postavljenim svitcima dokazuje kako u stroju nema poremećaja drugih vrsta. Navedenom metodom moguće je primjenjivost monitoring sustava s mjernim svitcima proširiti na utvrđivanje drugih tipova poremećaja električnih sinkronih generatora.

Na kraju je razvijen algoritam za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih od mehanički uzrokovanih harmonika vibracija. Obradom valnih oblika radijalnih sila koje djeluju na zube paketa statora, utvrđuje se spektar harmonika radijalne magnetske sile na jaram statora. Navedenim algoritmom uspoređuje se spektar izmjerenih istaknutih harmonika akceleracija kućišta ili paketa sa spektrom radijalne sile koja djeluje u smjeru akcelerometra. Rezultat usporedbe je razdvajanje električki uzrokovanih harmonika od mehaničkih uzrokovanih harmonika vibracija. Ovime je predstavljen treći znanstveni doprinos. Navedenu metodu moguće je upotrijebiti u sklopu dijagnostičkih mjerenja i analiza uzroka vibracija električnih sinkronih generatora.

Radi daljnjih istraživanja, na osnovi rezultata utvrđenih tijekom ovog istraživanja planira se nastavak analiza magnetskih sila i njima uzrokovanih vibracija za različite kombinacije kvarova namota, nesimetričnih opterećenja i pomaka rotora, nadogradnja proračunskih analiza vibracija proračunom buke te provedba analiza za drugačije izvedbe sinkronih generatora. Pod time se podrazumijevaju i provjere metoda analize na sinkronim generatorima s permanentnim magnetima i s cilindričnim rotorom. Rezultate istraživanja planira se dodatno verificirati na generatorima s različitim brojem polova i izvedbama statorskog namota od analiziranog stroja.

## 11. Literatura

- [1.] IEC 60034-1:2004 "Rotating electrical machines Part 1: Rating and Performance", IEC, Geneva, Switzerland, June 2004. ISBN: 2-8318-7455-6 (76 pages)
- [2.] IEC 60034-14:2004 "Rotating electrical machines Part 9: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity", IEC, Geneva, Switzerland, November 2004. ISBN: 978-0-580-601-28-6 (24 pages)
- [3.] H. Sprysl, H. Vögele, G. Ebi: "The influence of magnetic forces on the stability behavior of large electrical machines", VDI Berichte Nr. 1285, 1996. (10 pages)
- [4.] Yong Xu, Zhaohui Li: "Computational Model for Investigating the Influence of Unbalanced Magnetic Pull on the Radial Vibration of Large Hydro-Turbine Generators", Journal of Vibration and Acoustics, volume 134, Issue 5, June 2012, INSPEC Accession Number: 051013 (9 pages)
- [5.] D. G. Dorrel: "Sources and Characteristics of Unbalanced Magnetic Pull in 3-phase Cage Induction Motors with Axial-Varying Rotor Eccentricity", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47. No 1, 2011 (8 pages)
- [6.] J. Pedro, A. Bastos, N. Sadowski: "Electromagnetic modeling by finite element methods", Publication by Marcel Dekker, 2003. ISBN: 0-8247-4269-9 (497 pages)
- [7.] A. Elez: "Sustav za otkrivanje međuzavojnih kratkih spojeva namota sinkronih strojeva", Doktorska disertacija, FER Zagreb, 2010. (241 stranica)
- [8.] A. Tenhunen: "Finite-element calculation of unbalanced magnetic pull and circulating current between parallel windings in induction motor with non-uniform eccentric rotor", IEE Proceedings – Electrical Power Applications, Vol. 150, No. 6, 2003. (6 pages)
- [9.] A. Tenhunen, T. P. Holopainen, A. Arkkio: "Impulse method to calculate the frequency response of the electromagnetic forces on whirling cage rotors", Proceedings of Electromotion'01, Bologna, Italy, June 2001. (5 pages)
- [10.] D. G. Dorrel, A. Hermann, B. B. Jensen: "Analyses of Unbalanced Magnetic Pull in Wound Rotor Induction Machines using Finite Element Analysis – Transient, Motoring and Generating Modes", IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE, November 2013., ISBN 978-1-4799-0224-8/13 (6 pages)

- [11.] R. Belmans, A. Vandenput, W. Geysen: "Calculation of the flux density and the unbalanced pull in two pole induction machines", *Archiv für Elektrotechnik*, Springer-Verlag, 1987. (11 pages)
- [12.] B. A. T. Iamamura, Y. Le Menach, A. Tounzi, N. Sadowski, E. Guillot: "Study of Synchronous Generator eccentricities using analytical approach and FEM", ICEM 2010, 19. International Conference on Electrical Machines, September 2010. (6 pages)
- [13.] B. A. T. Iamamura, Y. Le Menach, A. Tounzi, N. Sadowski, E. Guillot, T. Jacq, J. Langlet: "Study of Synchronous Generator Static Eccentricities – FEM Results and Measurements“, ICEM, Marseille, France, October 2012, Print, pp 1829-1835, ISBN 978-1-4673-0143-5 (7 pages)
- [14.] M. Wallin, J. Bladh, U. Lundin: "Damper Winding Influence on Unbalanced Magnetic Pull in Synchronous Machines with Rotor Eccentricity“, *IEEE Transactions on magnetics*, Issue 89, April 2013. TMAG.2013.2259633 (8 pages)
- [15.] M. Wallin, U. Lundin: "Dynamic unbalanced pull from field winding turn short circuits in hydropower generators", Taylor and Francis, *Journal of Electric Power Components and Systems*, Vol. 41, Issue 16, October 2013. (6 pages)
- [16.] M. Wallin, M. Ranlöf, U. Lundin: "Design and construction of a synchronous generator test setup", ICEM 2010, 19. International Conference on Electrical Machines, September 2010. (5 pages)
- [17.] M. Wallin: "Measurement and modelling of unbalanced magnetic pull in hydropower generators", Doctoral Dissertation, Uppsala U University, Švedska, April 2013. (62 pages)
- [18.] D. Žarko, D. Ban, I. Vazdar, V. Jarić: "Calculation of unbalanced magnetic pull in a salient-pole synchronous generator" EPE/PEMC 14. Conference, September 2010., ISBN 978-1-4244-7856-9, pp T4-116 - T4-122. (7 pages)
- [19.] N. L. P. Lundström, J.-O. Aidapää: "Dynamic consequences of electromagnetic pull due to deviations in generator shape", Elsevier ScienceDirect, *Journal of Sound and Vibration* 301, 2007. (19 pages)
- [20.] Z. Cai, N. Feng: "Effects of constant unbalanced magnetic pull to the vibration behaviours of turbomachinery", ICSV15, 15th International Congress on Sound and Vibration, Daejeon, Korea, July 2008. (8 pages)

- [21.] P. Pennacchi: "Computational model for calculating the dynamical behaviour of generators caused by unbalanced magnetic pull and experimental validation", Elsevier ScienceDirect, Journal of Sound and Vibration 312, 2008. (22 pages)
- [22.] Z. Fengge, T. Ningze, W. Fengxiang: "Analysis of vibration modes for large induction motor", IEEE Proceedings of the ICEMS Conference, September, 2005, ISBN 7-5062-7407-8, pp 64-67 vol1 (4 pages)
- [23.] J. Roivainen: "Unit-wave response-based modeling of electromechanical noise and vibration of electrical machines", Doctoral Dissertation, Faculty of electronics, communications and automation, Helsinki, June, 2009. (186 pages)
- [24.] M. Petrinić, S. Car, A. Elez: "Iterative Procedure for determination of synchronous generator load point using finite element method", IEEE proceedings of the ICEM'12- XX International Conference on Electrical Machines", Francuska - Marseilles 2012 g. ISBN 978-1-4673-0143-5, pp 339-345 (7 pages)
- [25.] A. Elez, S. Car, S. Tvorčić: "Air gap magnetic field – key parameter for synchronous and asynchronous machine fault detection", International Review of Electrical Engineering (IREE). 8, 3, 1-8, 2013.
- [26.] S. Tvorčić: "Otkrivanje kvarova rotora kaveznog asinkronog motora analizom magnetskog polja u zračnom rasporu", Doktorska disertacija, FER Zagreb, 2019. (203 stranice).
- [27.] I. Onel, K.B. Dalci, I. Senol: "Detection of bearing defects in three-phase induction motors using Park's transform and radial basis function neural networks", Sadhana Vol. 31, Part 3, June 2006.
- [28.] G.A. Capolino, J.A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp: "Modern Diagnostics Techniques for Electrical Machines, Power Electronics and Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.62, No.3, March 2015.
- [29.] J. Sobra, T. Vaimann, A. Belahcen: "Mechanical Vibration Analysis of Induction Machine Under Dynamic Rotor Eccentricity", 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Prague, Czech Republic, 16-18 May 2016
- [30.] M.Y. Kaikaa, M. Hadjani: "Effects of the Simultaneous Presence of Static Eccentricity and Broken Rotor Bars on the Stator Current of Induction Machine", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.61, No.5, May 2014.

- [31.] J. Sobra, V. Kindl, B. Skala: "Determination of the Force Caused by Broken Rotor Bar and Static Eccentricity in an Induction Machine", ELEKTRO, Rajecke Teplice, Slovakia, 19-20 May 2014.
- [32.] Z. Haznadar, Ž. Štih: "Elektromagnetizam I, II", Školska knjiga, Zagreb, Hrvatska, 1997.
- [33.] V. Bego: "Mjerenja u elektrotehnici", Graphis, Zagreb, Hrvatska, 2003.
- [34.] JCGM 100:2008: "Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement", September 2008.
- [35.] Z. Haznadar: "Teorijska elektrotehnika: Elektromagnetska teorija i polja", Element, Zagreb, 2001.
- [36.] J.W. Eaton, D. Bateman, S. Hauberg, R. Wehbring: "GNU Octave – A high-level interactive language for numerical computations Edition 4 for Octave version 4.4.1", Free Software Foundation Inc., Franklin Street, Fifth Floor, Boston, MA, USA, August 2018.
- [37.] ANSYS Electronics desktop v.19.0 User Manual, ANSYS inc., Pittsburgh, USA, February 2018.
- [38.] Brüel & Kjaer: "Technical specifications of CCLD 4508 sensor", Danmark, 2008.
- [39.] Brüel & Kjaer: "Technical specifications of VS-080 sensor", Danmark, 2008.
- [40.] Brüel & Kjaer: "Product data LAN-XI data Acquisition Hardware for PULSE™ and Test for Ideas™", Danmark, 2008.
- [41.] T. Čorak: "Sustav automatiziranog ispitivanja asinkronog stroja u tvornici", magistarski rad, FER Zagreb, 2001.
- [42.] Piezopedia, "Piezoline-worth knowing about piezo mechanics", Dostupno na: <https://www.piezosystem.com/piezopedia/piezothory/> (1. kolovoza 2019.)
- [43.] J.G. Webster: "The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook", CRC Press LCC, 1999, ISBN: 3-540-64830-5
- [44.] Wikipedia The Free Encyclopedia, "Piezoelectric accelerometer", dostupno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:PiezoAccelTheory.gif> (1. kolovoza 2019.)
- [45.] C. P. Pinney W.E. Baker: "Velocity Measurement", CRC Press LCC, 2000.
- [46.] R. Wolf: "Osnove električnih strojeva", Školska knjiga, Zagreb, 1995 ISBN: 953-0-30609-1

- [47.] XIN GE: "Simulation of Vibrations in Electrical Machines for Hybrid-electric Vehicles", Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Švedska, December 2014. (56 pages)
- [48.] CJ. Carpenter, "Surface Integral Methods of Calculating Forces on Magnetized Iron Parts", The Institute of Electrical Engineers, Monograph No. 342, August 1959.
- [49.] G. Bevan, E. Voss, "A Practical Investigation Into the Measurement of Forces on the Stator Teeth of Electrical Machines", 2013 Annual MTech Conference, November 2013
- [50.] A. Balan, S.P. Verma, "Measurement techniques for vibration and acoustic noise of electrical machines", Proceedings of 6th International Conference on Electrical Machines and Drives. Oxford, UK, 1993. IEE Conf. Publ. No. 376.
- [51.] V. Kuterovac, "Utjecaj rasporeda namota na vibracije statora sinhronih generatora", X stručno savjetovanje, JUKO CIGRE, Dubrovnik. 11.-16. Listopad 1970.
- [52.] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing: "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring", IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008.
- [53.] S. Nandi, H.A. Toliyat, X. Li: "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors", *IEEE transactions on energy conversion*, Vol. 20, No. 4, December 2005.

## Popis oznaka

|             |                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------|
| $m$         | broj faza                                                           |
| $N_2$       | broj utora statora                                                  |
| $2p$        | broj polova                                                         |
| $p$         | broj pari polova                                                    |
| $q$         | broj utora statora po polu i fazi                                   |
| $Q$         | broj utora statora po polu                                          |
| $r$         | radijus                                                             |
| $x$         | oznaka apscisne vrijednosti pravokutnog koordinatnog sustava        |
| $y$         | oznaka ordinatne vrijednosti pravokutnog koordinatnog sustava       |
| $\Theta$    | magnetsko protjecanje                                               |
| $\Theta_n$  | magnetsko protjecanje za nazivni rad generatora                     |
| $t$         | vremenski trenutak                                                  |
| $\omega$    | kružna frekvencija                                                  |
| $\omega_k$  | kružna frekvencija k-tog reda                                       |
| $f_v$       | frekvencija vibracije                                               |
| $f_r$       | frekvencija rotacije kuglica                                        |
| $N_k$       | broj kuglica                                                        |
| $b_d$       | promjer kuglice                                                     |
| $d_p$       | promjer koraka kuglice ležaja                                       |
| $\beta$     | kut kontakta kuglice sa stazom                                      |
| $\mu_0$     | magnetska permeabilnost vakuumu                                     |
| $\vec{B}$   | vektor magnetske indukcije                                          |
| $B_x$       | magnetske indukcija u smjeru x osi pravokutnog koordinatnog sustava |
| $B_y$       | magnetska indukcija u smjeru y osi pravokutnog koordinatnog sustava |
| $B_z$       | magnetske indukcije u smjeru z osi pravokutnog koordinatnog sustava |
| $B_{rad}$   | komponenta magnetske indukcije u radijalnom smjeru                  |
| $B_{tan}$   | komponenta magnetske indukcije u tangencijalnom smjeru              |
| $B_{aks}$   | komponenta magnetske indukcije u aksijalnom smjeru                  |
| $B_m$       | Amplituda magnetske indukcije                                       |
| $B_{Ms}$    | Magnetska indukcija mjernog svitka                                  |
| $B_{Ms\ k}$ | Magnetska indukcija mjernog svitka u vremenskom trenutku $t$        |



|                       |                                                                           |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\vec{F}$             | vektor sile                                                               |
| $\vec{F}_k$           | vektor sile k-tog reda                                                    |
| $F_{rad}$             | komponenta sile u radijalnom smjeru                                       |
| $F_{tan}$             | komponenta sile u tangencijalnom smjeru                                   |
| $F_{aks}$             | komponenta sile u aksijalnom smjeru                                       |
| $F_n$                 | sila u smjeru normale                                                     |
| $F_{Ms}$              | vrijednost radijalne sile određena obradom napona mjernog svitka $U_{Ms}$ |
| $\varphi$             | kutna koordinata u cilindričnom koordinatnom sustavu                      |
| $R$                   | radijus                                                                   |
| $S$                   | površina                                                                  |
| $V$                   | volumen                                                                   |
| $E_p$                 | potencijalna energija                                                     |
| $W$                   | rad                                                                       |
| $\vec{n}$             | vektor normale                                                            |
| $L$                   | aksijalna duljina stroja                                                  |
| $L_{sv}$              | duljina svitka                                                            |
| $[M]$                 | matrica masa                                                              |
| $[m]$                 | dijagonalna matrica masa                                                  |
| $[C]$                 | matrica prigušenja                                                        |
| $[c]$                 | dijagonalna matrica prigušenja                                            |
| $[K]$                 | matrica krutosti                                                          |
| $[k]$                 | dijagonalna matrica krutosti                                              |
| $[P_m]$               | modalna matrica                                                           |
| $u_k$                 | svojstvena vrijednost k-tog reda                                          |
| $\vec{q}$             | vektor pomaka                                                             |
| $\vec{q}_k$           | vektor pomaka k-tog reda                                                  |
| $\vec{r}$             | vektor modalnog pomaka                                                    |
| $G_{m\_ik}(\omega_k)$ | jedinstvena prijenosna funkcija između pomaka i pobudne sile              |
| $k$                   | konstanta matrice vektora modalnog pomaka                                 |
| $k_{C1}$              | konstanta matrice masa                                                    |
| $k_{C2}$              | konstanta matrice krutosti                                                |
| $\phi$                | magnetski tok                                                             |
| $\phi_{Ms}$           | magnetski tok kroz mjerni svitak                                          |

|                            |                                                                          |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $\phi_{Ms\ t}$             | magnetski tok kroz mjerni svitak u vremenskom trenutku $t$               |
| $N$                        | broj zavoja                                                              |
| $n_t$                      | broj vremenskih trenutaka                                                |
| $m$                        | masa                                                                     |
| $a$                        | akceleracija                                                             |
| $v$                        | brzina                                                                   |
| $l$                        | duljina                                                                  |
| $k$                        | redni broj                                                               |
| $i$                        | radni broj (brojač)                                                      |
| $C$                        | električni kapacitet                                                     |
| $\alpha$                   | piezoelektrični modul                                                    |
| $l$                        | duljina petlje                                                           |
| $c$                        | kontura petlje svitka                                                    |
| $u_{ind}$                  | inducirani napon                                                         |
| $u_{ind\ Ms}$              | inducirani napon mjernog svitka                                          |
| $u_{ind\ Ms\ t}$           | inducirani napon mjernog svitka u trenutku $t$                           |
| $N_{sv}$                   | broj zavoja mjernog svitka                                               |
| $S_{sv}$                   | površina obuhvaćena mjernim svitkom                                      |
| $S_{zub}$                  | površina radijalne plohe zuba                                            |
| $\vec{E}$                  | vektor električnog polja                                                 |
| $\Delta\varphi_{Zub}$      | fazna razlika sila između dva susjedna zuba                              |
| $N_{prapol}$               | broj cirkularnih segmenata stroja s jednakom magnetskom slikom           |
| $\Delta N_{zub\_pz}$       | međusobni razmak između dva zuba na koja djeluju jednake magnetske sile  |
| $\Delta N_{zub\_pz\_maks}$ | Najveći međusobni razmak dva zuba na koja djeluju jednake magnetske sile |
| $\tau_p$                   | polni korak stroja                                                       |
| $t_{sim\ 1}$               | vrijeme prvog segmenta simulacijskog proračuna                           |
| $t_{sim\ 2}$               | vrijeme drugog segmenta simulacijskog proračuna                          |
| $t_{sim.kr\ 1}$            | vremenski korak prvog segmenta simulacijskog proračun                    |
| $t_{sim.kr\ 2}$            | vremenski korak drugog segmenta simulacijskog proračun                   |
| $f_{vl}$                   | vlastita frekvencija                                                     |
| $f_{vl\ raspon}$           | raspon analiziranih vlastitih frekvencija                                |
| $f_{pobuda\ raspon}$       | frekvencijski raspon pobudne sile                                        |
| $f_{odziv\ raspon}$        | frekvencijski raspon izračunatog mehaničkog odziva                       |

|                   |                                                                       |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $N_t$             | broj simulacijskih točaka                                             |
| $U$               | linijski napon generatora                                             |
| $U_n$             | nazivni linijski napon                                                |
| $I$               | fazna struja generatora                                               |
| $S$               | prividna izlazna snaga generatora                                     |
| $P$               | radna izlazna snaga generatora                                        |
| $Q$               | reaktivna izlazna snaga generatora                                    |
| $\cos\varphi$     | faktor snage                                                          |
| $\Delta t$        | vremenski interval                                                    |
| $f$               | frekvencija napona generatora                                         |
| $f_n$             | nazivna frekvencija napona generatora                                 |
| $h_{pn}$          | redni broj harmonika određenog korakom utora prigušnog namota         |
| $\tau_{pn}$       | korak utora prigušnog namota                                          |
| $b_{sv}$          | srednja širina zavoja mjernog svitka                                  |
| $L_{sv}$          | srednja duljina zavoja mjernog svitka                                 |
| $L_z$             | širina zuba na promjeru provrta                                       |
| $L_i$             | idealna duljina zuba                                                  |
| $Ms1$             | mjerni svitak broj jedan                                              |
| $Ms2$             | mjerni svitak broj dva                                                |
| $Ms3$             | mjerni svitak broj tri                                                |
| $Ms4$             | mjerni svitak broj četiri                                             |
| $Ms5$             | mjerni svitak broj pet                                                |
| $Ms6$             | mjerni svitak broj šest                                               |
| $Ms7$             | mjerni svitak broj sedam                                              |
| $Ms8$             | mjerni svitak broj osam                                               |
| $MsA$             | mjerni svitak zone A                                                  |
| $MsAd$            | mjerni svitak postavljen dijametralno u odnosu na mjerni svitak $MsA$ |
| $MsB$             | mjerni svitak zone B                                                  |
| $MsBd$            | mjerni svitak postavljen dijametralno u odnosu na mjerni svitak $MsB$ |
| $MsC$             | mjerni svitak zone C                                                  |
| $MsCd$            | mjerni svitak postavljen dijametralno u odnosu na mjerni svitak $MsC$ |
| $U_{Ms1 maks}$    | vršna vrijednost napona mjernog svitka broj jedan                     |
| $U_{Ms5 maks}$    | vršna vrijednost napona mjernog svitka broj pet                       |
| $\Delta U_{maks}$ | razlika vršnih vrijednosti napona                                     |

|                        |                                                                       |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $U_{Ms1\ ef}$          | efektivna vrijednost napona mjernog svitka broj jedan                 |
| $U_{Ms5\ ef}$          | efektivna vrijednost napona mjernog svitka broj pet                   |
| $\Delta U_{ef}$        | razlika efektivnih vrijednosti napona                                 |
| $\sigma$               | standardna devijacija                                                 |
| $F_{rad\ maks\ 1}$     | vršna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka br. 1     |
| $F_{rad\ maks\ 5}$     | vršna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka br. 5     |
| $\Delta F_{rad\ maks}$ | razlika vršnih vrijednosti radijalnih sila na zube                    |
| $F_{rad\ ef\ 1}$       | efektivna vrijednost radijalne sile zub iznad mjernog svitka br. 1    |
| $F_{rad\ ef\ 5}$       | efektivna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka br. 5 |
| $\Delta F_{rad\ ef}$   | razlika efektivnih vrijednosti radijalnih sila na zube                |
| $F_{rad\ maks\ A}$     | vršna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka A         |
| $F_{rad\ maks\ B}$     | vršna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka B         |
| $F_{rad\ maks\ C}$     | vršna vrijednost radijalne sile na zub iznad mjernog svitka C         |
| $F_{maks}$             | vršna vrijednost sile                                                 |
| $P1$                   | prva lokacija akcelerometra na paketu                                 |
| $P2$                   | druga lokacija akcelerometra na paketu                                |
| $K1$                   | prva lokacija akcelerometra na kućištu                                |
| $K2$                   | druga lokacija akcelerometra na kućištu                               |
| $a_{P1}$               | akceleracija vibracija prve lokacije na paketu                        |
| $a_{P2}$               | akceleracija vibracija druge lokacije na paketu                       |
| $\bar{a}_{p\ sr}$      | srednja vrijednost akceleracije paketa                                |
| $a_{K1}$               | akceleracija vibracija prve lokacije na kućištu                       |
| $a_{K2}$               | akceleracija vibracija druge lokacije na kućištu                      |
| $\bar{a}_{K\ sr}$      | srednja vrijednost akceleracije paketa                                |
| $I_R$                  | struja kroz kaskadu otpornika pasivnog tereta                         |
| $I_L$                  | struja kroz prigušnicu pasivnog tereta                                |
| $R_{R\ (C)}$           | omski otpor kaskade otpornika faze R (C)                              |
| $R_{S\ (B)}$           | omski otpor kaskade otpornika faze S (B)                              |
| $R_{T\ (A)}$           | omski otpor kaskade otpornika faze T (A)                              |
| $L_{R\ (C)}$           | induktivitet prigušnice faze R (C)                                    |
| $L_{S\ (B)}$           | induktivitet prigušnice faze S (B)                                    |
| $L_{T\ (A)}$           | induktivitet prigušnice faze T (A)                                    |
| $F_{k\ Ms1\ maks}$     | vršna vrijednost sile određene pomoću mjernog svitka broj 1           |
| $F_{k\ Ms5\ maks}$     | vršna vrijednost sile određene pomoću mjernog svitka broj 5           |

|                     |                                                                                        |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $\Delta F_{maks}$   | razlika vršnih vrijednosti sila zubi određenih pomoću mjernog svitka                   |
| $F_{k Ms1 ef}$      | efektivna vrijednost sile određene pomoću mjernog svitka broj 1                        |
| $F_{k Ms5 ef}$      | efektivna vrijednost sile određene pomoću mjernog svitka broj 5                        |
| $\Delta F_{ef}$     | razlika efektivna vrijednosti sila zubi određenih pomoću mjernog svitka                |
| $a_{izračun}$       | akceleracija vibracija određena izračunom                                              |
| $a_{mjerenje}$      | akceleracija vibracija određena mjerenjem                                              |
| $\Delta a_{p1}$     | razlika akceleracija vibracija određenih izračunom i mjerenjem za lokaciju P1          |
| $\Delta a_{p2}$     | razlika akceleracija vibracija određenih izračunom i mjerenjem za lokaciju P2          |
| $Niz\_U\_Ms$        | niz učitanih valnih oblika napona mjernih svitaka                                      |
| $N$                 | broj vremenskih trenutaka učitano valnog oblika                                        |
| $\Delta t$          | vremenski korak između dva učitana podatka                                             |
| $Niz\_U$            | pomoćni niz u koji se pohranjuje valni oblik napona                                    |
| $Niz\_Fi$           | niz u koji se pohranjuje valni oblik magnetskog toka                                   |
| $Fi\_sr$            | srednja vrijednost magnetskog toka                                                     |
| $Niz\_B\_Ms$        | niz u koji se pohranjuje valni oblik magnetske indukcije određen pomoću mjernog svitka |
| $Niz\_F\_Ms\_Zub$   | niz u koji se pohranjuje valni oblik radijalne sile određen pomoću mjernog svitka      |
| $Niz\_F\_Ms$        | dvodimenzionalni niz u koji se pohranjuje niz valnih oblika radijalne sile             |
| $Niz\_F\_A$         | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsA$               |
| $Niz\_F\_Ad$        | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsAd$              |
| $Niz\_F\_B$         | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsB$               |
| $Niz\_F\_Bd$        | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsBd$              |
| $Niz\_F\_C$         | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsC$               |
| $Niz\_F\_Cd$        | niz za pohranu valnog oblika radijalne sile određene pomoću svitka $MsCd$              |
| $Niz\_F\_Vrh$       | niz za pohranu vršnih vrijednosti radijalnih sila                                      |
| $Niz\_F\_A\_r$      | niz za pohranu razlike radijalnih sila pohranjenih u $Niz\_F\_A$ i $Niz\_F\_Ad$        |
| $Niz\_F\_B\_r$      | niz za pohranu razlike radijalnih sila pohranjenih u $Niz\_F\_B$ i $Niz\_F\_Bd$        |
| $Niz\_F\_C\_r$      | niz za pohranu razlike radijalnih sila pohranjenih u $Niz\_F\_C$ i $Niz\_F\_Cd$        |
| $Niz\_F\_Vrh$       | niz za pohranu vršnih vrijednosti sila                                                 |
| $Niz\_F\_Odstup\_p$ | postotno odstupanje od vršnih vrijednosti                                              |
| $Maks\_abc$         | varijabla za pohranu maksimalnog iznosa od tri vršne vrijednosti                       |
| $Min\_abc$          | varijabla za pohranu minimalnog iznosa od tri vršne vrijednosti                        |
| $\Delta abc$        | razlika između maksimalne i minimalne vršne vrijednosti                                |
| $\Delta abc\_p$     | postotna razlika između maksimalne i minimalne vršne vrijednosti                       |

|                      |                                                                                   |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Maks_Dia</i>      | varijabla za pohranu maksimalnog odstupanja sila na dijametralno postavljene zube |
| <i>F_prag_odstup</i> | prag dopuštenog odstupanja sila na dijametralno postavljene zube                  |
| <i>F_prag_nesim</i>  | prag dopuštenog odstupanja maksimuma sila na zube zone A, B i C                   |
| <i>Tekst_ispis</i>   | string za ispis izlazne poruke                                                    |
| <i>Zub_Start</i>     | početni zub razmatrane zone stroja                                                |
| <i>Zub_Stop</i>      | završni zub razmatrane zone stroja                                                |
| $\beta_{Zub\ i}$     | kut između vektora radijalne sile i-tog zuba i radijalnog smjera rezultantne sile |
| $F_{rad\ Zub\ i}$    | radijalna sila i-tog zuba                                                         |
| $F_{A\ Zub\ i}$      | komponenta radijalne sile i-tog zuba usmjerena prema lokaciji rezultantne sile    |
| $F_{suma}$           | sumarna radijalne sile                                                            |
| $h_{u\ x}$           | utorski harmonik x-tog reda                                                       |
| <i>Delta_Ang</i>     | električni kut između dva utora statora                                           |
| <i>F_fft</i>         | niz u koji se spremaju kompleksna rješenja brze Fourierove transformacije         |
| <i>F_am</i>          | realna rješenja brze <i>Fourierove</i> transformacije                             |
| <i>F_bm</i>          | imaginarna rješenja brze <i>Fourierove</i> transformacije                         |
| <i>Niz_F_mag</i>     | niz za pohranu amplituda harmonika sile                                           |
| <i>F_ang</i>         | niz za pohranu vrijednosti faznih pomaka harmonika sile                           |
| <i>F_0</i>           | istosmjerna vrijednost valnog oblika sile                                         |
| <i>F_0_sr</i>        | srednja istosmjerna vrijednost valnog oblika sile za niz zubi                     |
| <i>F_mag_sr</i>      | srednja vrijednost amplituda harmonika sile za niz zubi                           |
| <i>I</i>             | jedinični niz                                                                     |
| <i>Nzubi</i>         | broj učitanih zubi                                                                |
| <i>alfa_Zub_1</i>    | kutni pomak između prvog zuba i pozicije akcelerometra                            |
| <i>alfa_acc</i>      | kutno odstupanje radijalne osi akcelerometra od polovice stroja određene zubom 1  |
| <i>Nzub_pomak</i>    | broj utora za koji je udaljen akcelerometar od centralne osi                      |
| <i>Kut_acc</i>       | ostatak razlike za koji je udaljen akcelerometar od centralne osi                 |
| <i>TauS</i>          | korak utora statora                                                               |
| <i>N2_pola</i>       | polovica ukupnog broja utora statora                                              |
| <i>N2_cetvrtina</i>  | četvrtina ukupnog broja utora statora                                             |
| <i>Nepar</i>         | varijabla za utvrđivanje neparnosti broja                                         |
| <i>N_prapol_seg</i>  | broj prapolova na polovici stroja                                                 |
| <i>Kut_Start</i>     | Kut između početnog zuba i akcelerometra                                          |
| <i>Kut_Stop</i>      | Kut između završnog zuba i akcelerometra                                          |
| <i>Kut_Zub</i>       | niz kutova za zube koji okružuju akcelerometar                                    |

|                    |                                                                                |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Kut_Zub_rad</i> | niz kutova za zube koji okružuju akcelerometar u radijanima                    |
| <i>Niz_F_a</i>     | niz komponenti sila svih zubi u smjeru akcelerometra                           |
| <i>F_suma</i>      | rezultantne sila                                                               |
| <i>a_Mag</i>       | niz učitanih amplituda akceleracija                                            |
| <i>f_raspon</i>    | raspon susjednih frekvencija za koji se provjerava utjecaj pojedinog harmonika |
| <i>fIa</i>         | frekvencijski korak harmonika akceleracije                                     |
| <i>N_F</i>         | broj učitanih harmonika sile                                                   |
| <i>N_a</i>         | broj učitanih harmonika akceleracije                                           |
| <i>k_F</i>         | redni niz harmonika sile                                                       |
| <i>k_a</i>         | redni niz harmonika akceleracije                                               |
| <i>f_F</i>         | niz frekvencija za harmonike sile                                              |
| <i>f_a</i>         | niz frekvencija za harmonike akceleracije                                      |
| <i>F_mag</i>       | niz amplituda harmonika sile                                                   |
| <i>F_prag</i>      | apsolutna vrijednost praga detekcije pojedinog harmonika sile                  |
| <i>F_prag_p</i>    | postotna vrijednost praga detekcije pojedinog harmonika sile                   |
| <i>a_prag</i>      | apsolutna vrijednost praga detekcije pojedinog harmonika akceleracije          |
| <i>a_prag_p</i>    | postotna vrijednost praga detekcije pojedinog harmonika akceleracije           |
| <i>h_a1</i>        | indeks koji odgovara osnovnom harmoniku sile u nizu harmonika akceleracija     |
| <i>f_start</i>     | početna frekvencija za usporedbu                                               |
| <i>f_stop</i>      | završna frekvencija za usporedbu                                               |
| <i>h_start</i>     | indeks početnog elementa u nizu za usporedbu                                   |
| <i>h_stop</i>      | indeks završnog elementa u nizu za usporedbu                                   |
| <i>EM_Flag</i>     | pokazivač stanja usporedbe                                                     |
| <i>a_EM</i>        | niz harmonika akceleracije uzrokovan elektromagnetskim pojavama                |
| <i>a_Meh</i>       | niz harmonika akceleracije uzrokovan mehaničkim pojavama                       |
| <i>f_a_EM</i>      | frekvencije koje odgovaraju nizu harmonika <i>a_EM</i>                         |
| <i>f_a_Meh</i>     | frekvencije koje odgovaraju nizu harmonika <i>a_Meh</i>                        |
| <i>Niz_EM</i>      | niz za pohranu podataka – elektromagnetski uzrokovani harmonici vibracija      |
| <i>Niz_Meh</i>     | niz za pohranu podataka – mehanički uzrokovani harmonici vibracija             |

## Popis slika

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 2.1 Radijalni vibracijski pomaci paketa statora za različita pogonska stanja električnog stroja .....                           | 6  |
| Slika 2.2 Fazne struje generatora s namotom spojenim u zvijezdu pri radu na jednofazni teret.....                                     | 7  |
| Slika 2.3 Vrste ekscentričnog pomaka rotora [26] .....                                                                                | 8  |
| Slika 2.4 Eliptična i ovalna (lijevo) [6] te putanja proizvoljnog oblika (desno) aksijalne osi rotora [18]..                          | 8  |
| Slika 2.5 Međupovezivost proračuna za izračun sila i njima uzrokovanih vibracija .....                                                | 11 |
| Slika 2.6 Različiti oblici polnih papuča koji se susreću u praksi .....                                                               | 12 |
| Slika 2.7 Tijelo u magnetskom polju opisano volumenom $V$ .....                                                                       | 14 |
| Slika 2.8 Volumni odsječak $dV$ u kojem dolazi do promjene .....                                                                      | 16 |
| Slika 2.9 Prikaz vektora magnetskih sila u zračnom rasporu stroja [17] .....                                                          | 17 |
| Slika 2.10 Komponente magnetske sile u zračnom rasporu stroja [17] .....                                                              | 18 |
| Slika 2.11 Jednostavan model šupljeg cilindra za analizu vibracija statora .....                                                      | 19 |
| Slika 2.12 Složena geometrijska struktura 3D modela.....                                                                              | 19 |
| Slika 2.13 Primjer podudaranja vlastite frekvencije s frekvencijom sile [2].....                                                      | 20 |
| Slika 2.14 Treća glavna forma (mod) vibriranja statora [17] .....                                                                     | 21 |
| Slika 3.1 Sinkroni generator za provedbu ispitivanja .....                                                                            | 23 |
| Slika 3.2 Mjerenjem određene krivulje kratkog spoja, praznog hoda i regulacije.....                                                   | 25 |
| Slika 3.3 Izometrijski prikaz modela sinkronog generatora .....                                                                       | 26 |
| Slika 3.4 Tlocrtni prikaz konstrukcijskih dijelova generatora .....                                                                   | 26 |
| Slika 3.5 Izvedba polova, kliznih koluta, zamašnjaka i ventilatora rotora .....                                                       | 27 |
| Slika 3.6 Izvedba statorskog paketa i namota sa spojevima u čeonj zoni .....                                                          | 27 |
| Slika 3.7 Statorski paket ugrađen u kućište.....                                                                                      | 27 |
| Slika 3.8 Provrt na kućištu ispod kojeg je dostupan paket statora za montažu senzora .....                                            | 28 |
| Slika 3.9 Mjesta ugradnje i bročane oznake mjernih svitaka – pogled sa slobodne strane stroja .....                                   | 28 |
| Slika 3.10 Priključna kutija s izvodima ugrađenih mjernih svitaka .....                                                               | 29 |
| Slika 3.11 Principijelna shema ispitnog mjernog sustava .....                                                                         | 30 |
| Slika 3.12 Principijelna shema kontrolnih mjerenja.....                                                                               | 31 |
| Slika 3.13 Kaskada otpornika (lijevo) i prigušnica promjenjivog induktiviteta (desno) korišteni za pasivno terećenje generatora ..... | 31 |
| Slika 3.14 Definicija elektromagnetske indukcije [7] .....                                                                            | 32 |
| Slika 3.15 Mjerni svitak izrađen u PCB tehnologiji .....                                                                              | 33 |
| Slika 3.16 Mjerni svitak ugrađen na zub paketa statora.....                                                                           | 33 |
| Slika 3.17 Ovisnost deformacije piezoelektrika o primijenjenoj sili [42] .....                                                        | 35 |
| Slika 3.18 Vrste rastezanja piezoelektričnog materijala [43] .....                                                                    | 35 |
| Slika 3.19 Princip mjerenja ubrzanja pomoću piezoelektrika [44] .....                                                                 | 35 |
| Slika 3.20 Izgled akcelometra tipa <i>CCLD 4508</i> i dimenzije prikazane u milimetrima [38] .....                                    | 36 |
| Slika 3.21 Shematski prikaz VLT pretvornika linearne brzine s pomičnim svitkom (gornji) i pomičnim magnetom (donji) [45] .....        | 37 |
| Slika 3.22 Ovisnost izlaznog napona $U$ o mjerenoj brzini vibracija senzora <i>VS – 080</i> [39] .....                                | 38 |
| Slika 3.23 Prikaz impulsnog čekića <i>Kistler 9724A2000</i> .....                                                                     | 39 |
| Slika 3.24 Mjerna stanica <i>PULSE</i> s <i>LAN-XI</i> procesnim modulima [40] .....                                                  | 40 |
| Slika 3.25 Analizator snage <i>NORMA AC Power Analyzer D 5255 S</i> [41] .....                                                        | 43 |
| Slika 4.1 Izravno mjerenje sile koja djeluje na paket statora. Stator stroja povezan s vanjskim kućištem preko tenzometara [16].....  | 46 |



|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 4.2 Način ugradnje svitka za mjerenje magnetskog polja na radijalnu plohu zuba paketa statora električnog stroja .....                                  | 47 |
| Slika 4.3 Put glavnog magnetskog toka četveropolnog generatora s istaknutim polovima .....                                                                    | 47 |
| Slika 4.4 Put magnetskog toka u zoni zračnog rasporeda.....                                                                                                   | 48 |
| Slika 4.5 Pretvorba induciranog napona mjernog svitka $u_{ind Ms}$ u magnetsku indukciju svitka $B_{Ms}$ .....                                                | 49 |
| Slika 4.6 Usporedni prikaz izmjerenog i izračunatog napona mjernog svitka .....                                                                               | 49 |
| Slika 4.7 Usporedni prikaz radijalne $B_{rad}$ i tangencijalne $B_{tan}$ komponente magnetske indukcije zuba.....                                             | 50 |
| Slika 4.8 Usporedni prikaz ukupne radijalne indukcije zuba $B_{rad}$ i magnetske indukcije mjernih svitaka $B_{Ms1}$ i $B_{Ms2}$ .....                        | 50 |
| Slika 4.9 Usporedni prikaz radijalne $F_{rad}$ i tangencijalne $F_{tan}$ komponente sile.....                                                                 | 51 |
| Slika 4.10 Pretvorba magnetske indukcije mjernog svitka $B_{Ms}$ u iznos sile $F_{Ms}$ .....                                                                  | 52 |
| Slika 4.11 Usporedni prikaz radijalne sile $F_{rad}$ i sile $F_{Ms1}$ i $F_{Ms2}$ koje odgovaraju kvadratu indukcije mjernih svitaka $Ms1$ i $Ms2$ .....      | 53 |
| Slika 4.12 Ujednačene radijalne sile po zubima za prazni hod mehanički simetričnog generatora.....                                                            | 54 |
| Slika 4.13 Ujednačene tangencijalne sile po zubima za prazni hod mehanički simetričnog generatora.....                                                        | 54 |
| Slika 4.14 Radijalne sile po zubima za simetrično opterećenje generatora.....                                                                                 | 55 |
| Slika 4.15 Tangencijalne sile po zubima za simetrično opterećenje generatora.....                                                                             | 55 |
| Slika 4.16 Prikaz rasporeda razlomljenog namota i četiri para dijametralno razmaknutih zubi označenih točkama različitih boja .....                           | 57 |
| Slika 4.17 Radijalne sile na odabrane zube za simetrično opterećen generator.....                                                                             | 58 |
| Slika 4.18 Inducirani naponi mjernih svitaka za simetrično opterećen generator.....                                                                           | 59 |
| Slika 4.19 Radijalne sile na zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora.....                                                                       | 59 |
| Slika 4.20 Tangencijalne sile na zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora.....                                                                   | 60 |
| Slika 4.21 Radijalne sile na promatrane zube za nesimetrično opterećenje po fazama generatora .....                                                           | 60 |
| Slika 4.22 Inducirani naponi mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje po fazama generatora.....                                                            | 61 |
| Slika 4.23 Napon mjernog svitka za simetrično i električki nesimetrično opterećenje .....                                                                     | 61 |
| Slika 4.24 Istovjetni naponi dijametralno postavljenih mjernih svitaka za slučajeve simetričnog (lijevo) i električki nesimetričnog (desno) opterećenja.....  | 62 |
| Slika 5.1 Dvodimenzionalni model generatora u programskom okruženju <i>ANSYS Maxwell</i> .....                                                                | 66 |
| Slika 5.2 Mreža konačnih elemenata MKE modela za elektromagnetske proračune.....                                                                              | 66 |
| Slika 5.3 Vanjski električni krug MKE modela za simetrično opterećenje.....                                                                                   | 67 |
| Slika 5.4 Vanjski električni krug MKE modela za slučaj nesimetričnog opterećenja po fazama .....                                                              | 67 |
| Slika 5.5 Dvodimenzionalni model generatora u programskom okruženju <i>ANSYS Mechanical</i> .....                                                             | 69 |
| Slika 5.6 Mreža konačnih elemenata MKE modela za mehaničke proračune .....                                                                                    | 69 |
| Slika 5.7 Povezivanje elektromagnetskog i mehaničkog proračuna upotrebom <i>ANSYS Workbench</i> programskog alata .....                                       | 71 |
| Slika 5.8 Izvještaj o uspješnosti preslikavanja sila iz elektromagnetskog u mehanički proračun dostupan kroz sučelje programa <i>ANSYS Mechanical</i> .....   | 71 |
| Slika 5.9 Mreža prikladna za standardne elektromagnetske proračune (lijevo) i mreža povećane gustoće za potrebe spregnutih numeričkih proračuna (desno) ..... | 72 |
| Slika 5.10 Raspodjela gustoće magnetskog toka sinkronog generatora u praznom hodu .....                                                                       | 74 |
| Slika 5.11 Sile izračunate po elementima zuba (lijevo) i pretvorba u rezultatni vektor (desno) .....                                                          | 74 |
| Slika 5.12 Radijalna sila na zub statora za slučajeve praznog hoda s linijskim naponom iznosa 200 i 400 V .....                                               | 75 |

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 5.13 Apsolutna vrijednost radijalne sile na zub za slučajeve praznog hoda s linijskim naponpm iznosa 200 i 400 V .....                                                          | 75 |
| Slika 5.14 Pozicije mjernih svitaka $MsI$ - $Ms8$ u proračunskom modelu generatora.....                                                                                               | 76 |
| Slika 5.15 Inducirani naponi na pozicijama mjernih svitaka $MsI$ - $Ms8$ .....                                                                                                        | 76 |
| Slika 5.16 Radijalne sile na pozicijama mjernih svitaka $MsI$ - $Ms8$ .....                                                                                                           | 77 |
| Slika 5.17 Vremenska promjena napona mjernog svitka u praznom hodu generatora .....                                                                                                   | 78 |
| Slika 5.18 Vremenska promjena sile na jedan zub u praznom hodu .....                                                                                                                  | 78 |
| Slika 5.19 Frekvencijski spektar valnog oblika radijalne sile na zub u praznom hodu.....                                                                                              | 79 |
| Slika 5.20 Raspodjela gustoće magnetskog toka sinkronog generatora za simetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ .....                            | 80 |
| Slika 5.21 Utjecaj povećanja snage na valni oblik radijalne sile na zub za slučaj jediničnog faktora snage $\cos\varphi=1$ .....                                                      | 81 |
| Slika 5.22 Utjecaj povećanja snage na harmonike radijalne sile na zub za slučaj jediničnog faktora snage $\cos\varphi=1$ .....                                                        | 81 |
| Slika 5.23 Utjecaj povećanja snage na valni oblik napona mjernog svitka.....                                                                                                          | 82 |
| Slika 5.24 Utjecaj promjene faktora $\cos\varphi$ pri $S=180\text{ kVA}$ na valni oblik radijalne sile zuba.....                                                                      | 83 |
| Slika 5.25 Utjecaj promjene faktora $\cos\varphi$ pri $S=90\text{ kVA}$ na valni oblik radijalne sile zuba .....                                                                      | 83 |
| Slika 5.26 Utjecaj promjene faktora $\cos\varphi$ pri $S=180\text{ kVA}$ na harmonike radijalne sile .....                                                                            | 84 |
| Slika 5.27 Utjecaj promjene faktora $\cos\varphi$ pri $S=90\text{ kVA}$ na harmonike radijalne sile zuba .....                                                                        | 84 |
| Slika 5.28 Utjecaj promjene faktora snage $\cos\varphi$ pri $S=180\text{ kVA}$ na napon mjernog svitka .....                                                                          | 85 |
| Slika 5.29 Utjecaj promjene faktora $\cos\varphi$ pri $S=90\text{ kVA}$ na napon mjernog svitka.....                                                                                  | 85 |
| Slika 5.30 Utjecaj povećanja snage na valni oblik radijalne sile koja djeluje na zub za slučaj izrazito induktivnog faktora snage $\cos\varphi=0,08$ .....                            | 86 |
| Slika 5.31 Utjecaj povećanja snage na frekvencijski spektar radijalne sile na zub za slučaj izrazito induktivnog faktora snage $\cos\varphi=0,08$ .....                               | 86 |
| Slika 5.32 Utjecaj promjene prividne snage $S$ na napon mjernog svitka .....                                                                                                          | 87 |
| Slika 5.33 Izračun sile preko napona mjernog svitka za prazni hod pri $U=400\text{ V}$ .....                                                                                          | 88 |
| Slika 5.34 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,08$ .....                                                                           | 89 |
| Slika 5.35 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,7$ .....                                                                            | 89 |
| Slika 5.36 Izračun sile preko napona mjernog svitka za rad uz $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ .....                                                                              | 89 |
| Slika 5.37 Struje faznih namota pri radu na jednofazni teret .....                                                                                                                    | 91 |
| Slika 5.38 Oscilacije magnetskog polja rotora prisutne pri nesimetričnom opterećenju .....                                                                                            | 91 |
| Slika 5.39 Referentne oznake zubi i faznih namota .....                                                                                                                               | 92 |
| Slika 5.40 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=52\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,7$ .....                                                                         | 93 |
| Slika 5.41 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=90\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,7$ .....                                                                         | 93 |
| Slika 5.42 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,7$ .....                                                                        | 93 |
| Slika 5.43 Referentne oznake mjernih svitaka ispod zubi za analizu sila .....                                                                                                         | 94 |
| Slika 5.44 Radijalne sile po zubima na kojima se nalaze mjerni svitci $MsI$ i $Ms5$ pri nesimetričnom opterećenju za različite iznose prividne snage uz $\cos\varphi=0,7$ .....       | 94 |
| Slika 5.45 Poklapanje valnih oblika radijalnih sila dijametralno razmaknutih parova mjernih svitaka $MsI$ - $Ms3$ i $Ms5$ - $Ms7$ u slučaju nesimetričnog opterećenja po fazama ..... | 95 |
| Slika 5.46 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,08$ .....                                                                       | 96 |
| Slika 5.47 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,7$ .....                                                                        | 96 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 5.48 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ .....                                                                           | 96  |
| Slika 5.49 Radijalne sile po zubima na kojima se nalaze mjerni svitci $Ms1$ i $Ms5$ .....                                                                                      | 97  |
| Slika 5.50 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka $Ms1$ i $Ms5$ .....                                                                                                    | 98  |
| Slika 5.51 Frekvencijski spektar radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka $Ms1$ i $Ms5$ .....                                                                              | 98  |
| Slika 5.52 Prostorna raspodjela tri zuba odabrana za analizu sila.....                                                                                                         | 99  |
| Slika 5.53 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze $A-B$ protjecane strujom .....                                                                            | 100 |
| Slika 5.54 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze $A-C$ protjecane strujom .....                                                                            | 100 |
| Slika 5.55 Radijalne sile po zubima pri nesimetričnom teretu uz faze $B-C$ protjecane strujom .....                                                                            | 100 |
| Slika 5.56 Radijalne sile tri zuba uz faze $A-B$ protjecane strujom .....                                                                                                      | 101 |
| Slika 5.57 Radijalne sile tri zuba uz faze $A-C$ protjecane strujom.....                                                                                                       | 101 |
| Slika 5.58 Radijalne sile tri zuba uz faze $B-C$ protjecane strujom.....                                                                                                       | 102 |
| Slika 5.59 Frekvencijski spektar radijalnih sila na tri zuba uz faze $A-B$ protjecane strujom .....                                                                            | 102 |
| Slika 5.60 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $A-B$ protjecane strujom.....                                                                                  | 103 |
| Slika 5.61 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $A-C$ protjecane strujom .....                                                                                 | 103 |
| Slika 5.62 Radijalne sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $B-C$ protjecane strujom .....                                                                                 | 103 |
| Slika 5.63 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $A-B$ protjecane strujom.....                                                                                  | 104 |
| Slika 5.64 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $A-C$ protjecane strujom.....                                                                                  | 104 |
| Slika 5.65 Harmonici sile na zube iznad mjernih svitaka uz faze $B-C$ protjecane strujom.....                                                                                  | 104 |
| Slika 5.66 Razlike u naponima mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje.....                                                                                                 | 106 |
| Slika 5.67 Valni oblici sile određeni analizom napona mjernih svitaka i usporedba s valnim oblikom radijalne sile zubi za nesimetrično opterećenje. ....                       | 107 |
| Slika 5.68 Pozicije analiziranih zubi u modelu generatora .....                                                                                                                | 109 |
| Slika 5.69 Valni oblici sila za simetrično opterećenje $U=400$ V, $S=400$ kVA, $\cos\varphi=0,9$ .....                                                                         | 110 |
| Slika 5.70 Valni oblici sila 10 % niži iznos struje faze C .....                                                                                                               | 110 |
| Slika 5.71 Valni oblici sila uz 20 % niži iznos struje faze C.....                                                                                                             | 111 |
| Slika 5.72 Statička ekscentričnost (lijevo) i dinamička ekscentričnost (desno).....                                                                                            | 112 |
| Slika 5.73 Valni oblici sila uz statičku ekscentričnost rotora iznosa 10 % zračnog raspora .....                                                                               | 113 |
| Slika 5.74 Valni oblici sila uz dinamičku ekscentričnost rotora iznosa 10 % zračnog raspora.....                                                                               | 113 |
| Slika 5.75 Valni oblici sila uz 10 % kratko spojenih zavoja uzbudnog namota jednog pola .....                                                                                  | 114 |
| Slika 5.76 Primjeri formi vibriranja kućišta .....                                                                                                                             | 117 |
| Slika 5.77 Prva i druga forma vibriranja paketa statora .....                                                                                                                  | 118 |
| Slika 5.78 Treća i četvrta forma vibriranja paketa statora.....                                                                                                                | 118 |
| Slika 5.79 Peta i šesta forma vibriranja paketa statora .....                                                                                                                  | 118 |
| Slika 5.80 Rezultati mehaničkog proračuna .....                                                                                                                                | 119 |
| Slika 5.81 Mjesta za koja su proračunskim modelom određivani iznosi vibracija. ....                                                                                            | 120 |
| Slika 5.82 Usporedni prikaz valnih oblika akceleracija za odabrana mjesta u praznom hodu.....                                                                                  | 120 |
| Slika 5.83 Frekvencijski spektar valnog oblika akceleracije za poziciju $P2$ .....                                                                                             | 121 |
| Slika 5.84 Usporedba akceleracije točke $P1$ za prazni hod pri naponu 200 V (lijevo) i 400 V (desno).....                                                                      | 122 |
| Slika 5.85 Usporedba akceleracije točke $P2$ za snagu $S=90$ kVA (lijevo) i $S=180$ kVA (desno) ....                                                                           | 123 |
| Slika 5.86 Usporedba akceleracija točke $P1$ za snagu $S=180$ kVA uz faktor snage $\cos\varphi=1$ (lijevo) i izrazito induktivni faktor snage $\cos\varphi=0,08$ (desno) ..... | 123 |
| Slika 5.87 Valni oblici akceleracija točaka $P1$ i $P2$ paketa i $K1$ i $K2$ plašta kućišta statora pri nesimetričnom opterećenju $U=400$ V, $S=52$ kVA, $\cos\varphi=1$ ..... | 126 |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 5.88 Usporedba akceleracija točke <i>P2</i> za istu izlaznu snagu trofazno (lijevo) i dvofazno (desno) opterećenog generatora pri $U = 400 \text{ V}$ , $S = 90 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 0,7$ .....                                            | 127 |
| Slika 5.89 Usporedba akceleracija točke <i>P2</i> uz istu struju armature $I = 130 \text{ A}$ za simetrično (lijevo: $S = 90 \text{ kVA}$ ) i nesimetrično (desno: $S = 52 \text{ kVA}$ ) opterećenje pri $U = 400 \text{ V}$ , $\cos\varphi = 0,7$ ..... | 127 |
| Slika 5.90 Usporedba akceleracija na mjestu <i>P1</i> za nesimetrično opterećenje uz faktor snage $\cos\varphi = 0,08$ (lijevo) i $\cos\varphi = 0,7$ (desno) pri $U = 400 \text{ V}$ , $S = 52 \text{ kVA}$ .....                                        | 128 |
| Slika 5.91 Usporedba akceleracija na mjestu <i>P2</i> za nesimetrično opterećenje uz faktor snage $\cos\varphi = 0,08$ (lijevo) i $\cos\varphi = 0,7$ (desno) pri $U = 400 \text{ V}$ , $S = 52 \text{ kVA}$ .....                                        | 128 |
| Slika 5.92 Usporedba akceleracija na mjestu <i>P1</i> za opterećenje faza <i>A-C</i> (lijevo) i <i>B-C</i> (desno) pri opterećenju $U = 400 \text{ V}$ , $S = 52 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                   | 129 |
| Slika 6.1 Principijelna shema spoja: 1 – pogonski motor, 2 – ispitivani objekt (sinkroni generator), 3 – pasivni teret (kaskada otpornika i regulacijska prigušnica).....                                                                                 | 132 |
| Slika 6.2 Mjerni svitci ugrađeni na zube generatora .....                                                                                                                                                                                                 | 132 |
| Slika 6.3 Mjesta ugradnje i oznake mjernih svitaka – pogled s pogonske strane stroja.....                                                                                                                                                                 | 133 |
| Slika 6.4 Akcelerometri spojeni na paket statora pomoću produljenog nosača kroz probušenu rupu plašta kućišta (lijevo) i na plašt kućišta upotrebom standardnog nosača (desno) .....                                                                      | 134 |
| Slika 6.5 Pozicije i oznake senzora za mjerenje vibracija .....                                                                                                                                                                                           | 134 |
| Slika 6.6 Izvodi senzora spojeni na mjernu akvizicijsku stanicu .....                                                                                                                                                                                     | 134 |
| Slika 6.7 Spoj pasivnog tereta na stezaljke generatora za simetrično opterećenje .....                                                                                                                                                                    | 135 |
| Slika 6.8 Spoj pasivnog tereta na stezaljke generatora za nesimetrično opterećenje .....                                                                                                                                                                  | 135 |
| Slika 6.9 Izvodi senzora spojeni na mjernu akvizicijsku stanicu .....                                                                                                                                                                                     | 137 |
| Slika 6.10 Stvaranje mehaničkog pobudnog impulsa udarcem čekića o kućište statora.....                                                                                                                                                                    | 137 |
| Slika 6.11 Impuls sile kod udarca čekićem .....                                                                                                                                                                                                           | 138 |
| Slika 6.12 Spektar frekvencija obuhvaćen udarcem čekića .....                                                                                                                                                                                             | 138 |
| Slika 6.13 Vremenski odziv paketa na udarac čekićem .....                                                                                                                                                                                                 | 138 |
| Slika 6.14 Snimljeni odzivi za udarce čekića na osam analiziranih lokacija .....                                                                                                                                                                          | 139 |
| Slika 6.15 Snimljeni valni oblici napona mjernih svitaka u praznom hodu (lijevo) i kod simetričnog opterećenja (desno).....                                                                                                                               | 141 |
| Slika 6.16 Snimljeni valni oblici dijametralno postavljenih svitaka i njihova razlika .....                                                                                                                                                               | 142 |
| Slika 6.17 Snimljeni naponi svitka <i>MsI</i> uz prividnu snagu $S = 180 \text{ kVA}$ za različite faktore snage.....                                                                                                                                     | 142 |
| Slika 6.18 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za prazni hod uz $U = 400 \text{ V}$ .....                                                                                                                       | 143 |
| Slika 6.19 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 90 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 0,08$ .....                                                                | 144 |
| Slika 6.20 Amplitude valnih oblika radijalnih sila na zube određeni analizom napona svitaka za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 90 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                | 144 |
| Slika 6.21 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                  | 145 |
| Slika 6.22 Spektri frekvencija obrađeni programskim alatom za obradu snimljenih podataka <i>PULSE LabShop v17</i> neposredno nakon provedbe mjerenja .....                                                                                                | 146 |
| Slika 6.23 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima pri mehaničkoj vrtnji .....                                                                                                                                                          | 147 |
| Slika 6.24 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima u praznom hodu .....                                                                                                                                                                 | 147 |
| Slika 6.25 Izmjereni valni oblici akceleracija na odabranim mjestima pri opterećenju $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                                                | 148 |
| Slika 6.26 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa u mehaničkoj vrtnji .....                                                                                                                                                                    | 148 |

|                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 6.27 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa u praznom hodu.....                                                                                                                                            | 148 |
| Slika 6.28 Izmjereni spektar frekvencija akceleracija paketa pri opterećenju<br>$U=400\text{ V}$ , $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ .....                                                                               | 149 |
| Slika 6.29 Pozicija mjernog mjesta $P1$ .....                                                                                                                                                                               | 149 |
| Slika 6.30 Snimljeni valni oblici napona mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje<br>$U=400\text{ V}$ , $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $B-C$ protjecane strujom .....                                      | 151 |
| Slika 6.31 Razlike napona svitaka razmaknutih za $\frac{1}{2}\tau_p$ pri nesimetričnom opterećenju .....                                                                                                                    | 152 |
| Slika 6.32 Poklapanje napona dijametralno postavljenih svitaka i njihova međusobna razlika<br>uzrokovana netočnostima mjerenja .....                                                                                        | 152 |
| Slika 6.33 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za<br>nesimetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $B-C$ protjecane strujom .....      | 153 |
| Slika 6.34 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za<br>nesimetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,08$ uz faze $B-C$ protjecane strujom .....   | 153 |
| Slika 6.35 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za<br>nesimetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=52\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $B-C$ protjecane strujom.....        | 154 |
| Slika 6.36 Valni oblici radijalnih sila na zube određeni analizom napona mjernih svitaka za<br>nesimetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=52\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ , uz faze $A-C$ protjecane strujom.....      | 154 |
| Slika 6.37 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima $P1$ i $P2$ paketa statora pri nesimetričnom<br>opterećenju $U=400\text{ V}$ , $S=52\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $B-C$ protjecane strujom .....        | 157 |
| Slika 6.38 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima $P1$ i $P2$ paketa statora pri nesimetričnom<br>opterećenju $U=400\text{ V}$ , $S=52\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $A-C$ protjecane strujom .....        | 158 |
| Slika 6.39 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima $P1$ i $P2$ paketa statora pri nesimetričnom<br>opterećenju $U=400\text{ V}$ , $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ uz faze $B-C$ protjecane strujom.....        | 159 |
| Slika 6.40 Izmjereni valni oblici akceleracija na mjestima $P1$ i $P2$ paketa statora pri nesimetričnom<br>opterećenju $U=400\text{ V}$ , $S=104\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=0,08$ uz faze $B-C$ protjecane strujom.....     | 159 |
| Slika 7.1 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku $Ms1$ određenog MKE<br>proračunom i mjerenjem za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                                      | 163 |
| Slika 7.2 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku $Ms1$ određenog<br>MKE proračunom i mjerenjem za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                               | 163 |
| Slika 7.3 Usporedba valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem,<br>temeljem napona mjernih svitaka $Ms1$ i $Ms5$ za prazni hod uz $U=400\text{ V}$ .....                                    | 164 |
| Slika 7.4 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE<br>proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka $Ms1$ i $Ms5$ za prazni hod generatora uz<br>$U=400\text{ V}$ ..... | 164 |
| Slika 7.5 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na<br>mjestu $P1$ za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                                               | 165 |
| Slika 7.6 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na<br>mjestu $P2$ za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                                               | 165 |
| Slika 7.7 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na<br>mjestu $P1$ za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                                               | 166 |
| Slika 7.8 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem na<br>mjestu $P2$ za prazni hod generatora uz $U=400\text{ V}$ .....                                                               | 166 |
| Slika 7.9 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku $Ms1$ određenog MKE<br>proračunom i mjerenjem za simetrično opterećenje $U=400\text{ V}$ , $S=180\text{ kVA}$ , $\cos\varphi=1$ .....                 | 168 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 7.10 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku <i>Ms1</i> određenog MKE proračunom i mjerenjem za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                 | 168 |
| Slika 7.11 Usporedba valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka <i>Ms1</i> i <i>Ms5</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                      | 169 |
| Slika 7.12 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i mjerenjem, temeljem napona mjernih svitaka <i>Ms1</i> i <i>Ms5</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ ..... | 169 |
| Slika 7.13 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu <i>P1</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                | 171 |
| Slika 7.14 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu <i>P2</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                        | 171 |
| Slika 7.15 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu <i>P1</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                | 172 |
| Slika 7.16 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz MKE proračunom i mjerenjem, na mjestu <i>P2</i> za simetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                                        | 172 |
| Slika 7.17 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku <i>Ms1</i> određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                      | 174 |
| Slika 7.18 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku <i>Ms1</i> određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 180 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                               | 174 |
| Slika 7.19 Usporedba valnog oblika napona induciranog u mjernom svitku <i>Ms5</i> određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                      | 175 |
| Slika 7.20 Usporedba harmonijskog sastava napona induciranog u mjernom svitku <i>Ms5</i> određenog MKE proračunom i mjerenjem za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                               | 175 |
| Slika 7.21 Usporedba valnih oblika radijalne sile na zube određenih MKE proračunom i na osnovi mjernja napona mjernih svitaka <i>Ms1</i> i <i>Ms5</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                       | 176 |
| Slika 7.22 Usporedba harmonijskog sastava valnih oblika radijalnih sila na zube određenih MKE proračunom i na osnovi mjernja napona mjernih svitaka <i>Ms1</i> i <i>Ms5</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ ..... | 176 |
| Slika 7.23 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu <i>P1</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                       | 178 |
| Slika 7.24 Spektar frekvencija akceleracija do 1500 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu <i>P2</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                       | 178 |
| Slika 7.25 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu <i>P1</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                       | 179 |
| Slika 7.26 Spektar frekvencija akceleracija do 6000 Hz određen na osnovi MKE proračuna i mjerenja na mjestu <i>P2</i> za nesimetrično opterećenje $U = 400 \text{ V}$ , $S = 104 \text{ kVA}$ , $\cos\varphi = 1$ .....                                                       | 179 |
| Slika 8.1 Valni oblici sile određeni mjernim svitcima za simetrično opterećenje .....                                                                                                                                                                                         | 181 |
| Slika 8.2 Svojstvena razlika valnih oblika sila u slučaju nesimetričnog električnog opterećenja uz poklapanje valnih oblika dijametralno postavljenih svitaka .....                                                                                                           | 181 |
| Slika 8.3 Nesimetrija valnih oblika uzrokovana poremećajem koji se razlikuje od nesimetričnog električnog opterećenja - valni oblici dijametralno postavljenih svitaka se ne poklapaju .....                                                                                  | 181 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 8.4 Dijagram toka algoritma za prepoznavanje nesimetričnog električnog opterećenja sinkronog generatora.....                                                                                                                                                      | 183 |
| Slika 8.5 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – ispravno simetrično radno stanje .....                                                                                                                                       | 188 |
| Slika 8.6 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – utvrđeno nesimetrično električno opterećenje .....                                                                                                                           | 189 |
| Slika 8.7 Izlazni rezultat algoritma za otkrivanje nesimetričnog električnog opterećenja – utvrđen poremećaj koji ne odgovara nesimetričnom električnom opterećenju.....                                                                                                | 189 |
| Slika 9.1 Komponenta radijalne sile zubi u smjeru odabrane lokacije oboda statora .....                                                                                                                                                                                 | 191 |
| Slika 9.2 Radijalne sile zubi na polovici stroja koja okružuje odabranu lokaciju na obodu paketa statora pri simetričnom opterećenju $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V .....                                                                                     | 192 |
| Slika 9.3 Komponente sila analiziranih zubi u smjeru odabrane lokacije na obodu jarma paketa statora pri simetričnom opterećenju $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V.....                                                                                          | 193 |
| Slika 9.4 Rezultantna radijalna sila odabrane lokacije na obodu paketa statora pri simetričnom opterećenju $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V .....                                                                                                               | 193 |
| Slika 9.5 Spektar harmonika sumarne sile u smjeru odabrane lokacije paketa statora pri simetričnom opterećenju $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V.....                                                                                                            | 194 |
| Slika 9.6 Uvećani prikaz amplituda harmonika sumarne radijalne sile (drugi harmonik djelomično prikazan) pri simetričnom opterećenju $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V - 1. harmoniku odgovara 50 Hz .                                                           | 194 |
| Slika 9.7 Radijalne sile zubi na polovici stroja koja okružuje odabranu lokaciju na obodu paketa statora pri nesimetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V .....                                                                                   | 195 |
| Slika 9.8 Komponente sila analiziranih zubi u smjeru odabrane lokacije na obodu jarma paketa statora pri nesimetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V.....                                                                                        | 195 |
| Slika 9.9 Rezultantna radijalna sila na odabranoj lokaciji oboda paketa statora pri nesimetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V .....                                                                                                            | 196 |
| Slika 9.10 Sastav harmonika rezultantne sile u smjeru odabrane lokacije paketa statora pri nesimetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V .....                                                                                                     | 196 |
| Slika 9.11 Povećani prikaz amplituda harmonika sumarne radijalne sile (drugi harmonik djelomično predodčen) pri simetričnom opterećenju $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V - 1. harmoniku odgovara 50 Hz                                                          | 197 |
| Slika 9.12 Usporedba spektra harmonika sumarne radijalne sile za simetrično opterećenje $S=180$ kVA i nesimetrično opterećenje $S=104$ kVA, uz $U=400$ V, $I=260$ A i $\cos\varphi=1$ (povećani prikaz harmonika s djelomično predodčenim drugim harmonikom) .....      | 198 |
| Slika 9.13 Usporedba sastava harmonika radijalne magnetske sile i akceleracije na mjestu P2 paketa statora za simetrično opterećenje $S=180$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V (povećani prikaz djelomičnim predodčenjem harmonika na 100 i 200 Hz) .....                | 199 |
| Slika 9.14 Usporedba sastava harmonika radijalne magnetske sile i akceleracije na mjestu P2 paketa statora za nesimetrično električno opterećenje $S=104$ kVA, $\cos\varphi=1$ , $U=400$ V (povećani prikaz s djelomičnim predodčenjem harmonika na 100 i 200 Hz) ..... | 200 |
| Slika 9.15 Dijagram toka algoritma za raspoznavanje harmonika vibracija uzrokovanih magnetskim radijalnim silama .....                                                                                                                                                  | 202 |
| Slika 9.16 Međusobni odnos pozicija akcelerometra i zuba za koji su učitane sile.....                                                                                                                                                                                   | 205 |
| Slika 9.17 Ispisna lista harmonika koji se podudaraju s EM silama iz <i>a_EM.txt</i> dokumenta .....                                                                                                                                                                    | 211 |
| Slika 9.18 Rezultat algoritma za razlučivanje harmonika vibracija: analiza za raspon $f=0-1600$ Hz .                                                                                                                                                                    | 212 |
| Slika 9.19 Rezultat algoritma za razlučivanje harmonika vibracija: analiza za raspon $f=0-6400$ Hz .                                                                                                                                                                    | 212 |

## Popis tablica

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablica 3.1 Projektni podaci sinkronog generatora 2S 783 – 4.....                                                                                                                                                       | 23  |
| Tablica 3.2 Shema ožičenja priključne kutije s izvodima mjernih svitaka.....                                                                                                                                            | 29  |
| Tablica 3.3 Tehničke specifikacije akcelerometra tipa <i>CCLD 4508</i> .....                                                                                                                                            | 36  |
| Tablica 3.4 Tehničke specifikacije senzora brzine tipa <i>VS – 080</i> .....                                                                                                                                            | 38  |
| Tablica 3.5 Tehničke specifikacije impulsnog čekića <i>Kistler 9724A2000</i> .....                                                                                                                                      | 39  |
| Tablica 3.6 Tehničke specifikacije akvizicijskog modula <i>LAN-XI 3050</i> .....                                                                                                                                        | 41  |
| Tablica 3.7 Tehnički podaci analizatora snage <i>NORMA AC Power Analyzer D 5255 S</i> .....                                                                                                                             | 42  |
| Tablica 3.8 Mjerna nesigurnost mjerne stanice .....                                                                                                                                                                     | 44  |
| Tablica 3.9 Mjerna nesigurnost analizatora snage.....                                                                                                                                                                   | 44  |
| Tablica 4.1 Razlike u detekciji kvara namota rotora, mehaničke i električne nesimetrije .....                                                                                                                           | 62  |
| Tablica 5.1 Veličina konačnih elemenata po dijelovima modela za EM proračune .....                                                                                                                                      | 65  |
| Tablica 5.2 Uvjeti elektromagnetskog simulacijskog proračuna.....                                                                                                                                                       | 66  |
| Tablica 5.3 Uvjeti mehaničkog simulacijskog proračuna .....                                                                                                                                                             | 70  |
| Tablica 5.4 Pregled računatih simetričnih i električki nesimetričnih pogonskih stanja generatora .....                                                                                                                  | 73  |
| Tablica 5.5 Efektivne i vršne vrijednosti napona mjernih svitaka međusobno razmaknutih za $\frac{1}{2} \tau_p$ pri različitim simetričnim opterećenjima .....                                                           | 87  |
| Tablica 5.6 Geometrijske veličine korištene pri određivanju odnosa $U_{Ms} - F_{rad}$ .....                                                                                                                             | 88  |
| Tablica 5.7 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za dva zuba međusobno razmaknuta $\frac{1}{2} \tau_p$ .....                                                                                                   | 105 |
| Tablica 5.8 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za tri zuba međusobno razmaknuta $\frac{2}{3} \tau_p$ .....                                                                                                   | 105 |
| Tablica 5.9 Razlike maksimalnih iznosa napona i sila određenih pomoću mjernih svitaka za nesimetrično opterećenje $S = 104 \text{ kVA}$ , $U = 400 \text{ V}$ , $\cos \varphi = 1$ , uz napajanje faza <i>A-B</i> ..... | 107 |
| Tablica 5.10 Razlike vršnih vrijednosti sila pri različitim stanjima nesimetričnog opterećenja temeljem proračunske analize za dva zuba međusobno razmaknuta $\frac{1}{2} \tau_p$ .....                                 | 108 |
| Tablica 5.11 Razlike vršnih vrijednosti sila pri različitim stanjima nesimetričnog opterećenja temeljem proračunske analize za tri zuba međusobno razmaknuta $\frac{2}{3} \tau_p$ .....                                 | 108 |
| Tablica 5.12 Razlike vršnih vrijednosti valnih oblika sila za tri zuba međusobno razmaknuta $\frac{2}{3} \tau_p$ .....                                                                                                  | 111 |
| Tablica 5.13 Razlike vršnih vrijednosti sila određenih pomoću dijametralno postavljenih svitaka .....                                                                                                                   | 114 |
| Tablica 5.14 Vlastite frekvencije mehaničkog modela statora s kućištem.....                                                                                                                                             | 116 |
| Tablica 5.15 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za analizirane četiri lokacije na modelu statora izračunatih za simetrična radna stanja generatora.....                                                         | 124 |
| Tablica 5.16 Efektivne vrijednosti akceleracija za analizirane četiri lokacije na modelu statora izračunatih za simetrična radna stanja generatora .....                                                                | 124 |
| Tablica 5.17 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za četiri analizirane lokacije na modelu statora izračunate za nesimetrična radna stanja generatora .....                                                       | 130 |
| Tablica 5.18 Efektivne vrijednosti akceleracija za četiri analizirane lokacije na modelu statora, izračunate za nesimetrična radna stanja generatora .....                                                              | 130 |
| Tablica 6.1 Parametri pasivnog tereta i struje kroz otpornik $I_R$ i prigušnicu $I_L$ za analizirana simetrična pogonska stanja generatora .....                                                                        | 136 |
| Tablica 6.2 Parametri pasivnog tereta i struje kroz otpornik $I_R$ i prigušnicu $I_L$ za analizirana nesimetrična pogonska stanja generatora .....                                                                      | 136 |
| Tablica 6.3 Izmjerene vlastite frekvencije za centralni dio stroja .....                                                                                                                                                | 140 |
| Tablica 6.4 Izmjerene vrijednosti induciranih napona mjernih svitaka za simetrična opterećenja .....                                                                                                                    | 143 |



|                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tablica 6.5 Vrijednosti radijalnih sila određene analizom izmjerenih induciranih napona u mjernim svitcima za niz pogonskih stanja .....                                                   | 145 |
| Tablica 6.6 Amplitude harmonika akceleracija na 100 Hz za analizirane četiri lokacije na statoru stroja, izmjerene za simetrična pogonska stanja generatora.....                           | 150 |
| Tablica 6.7 Vršne vrijednosti radijalnih sila određene analizom izmjerenih induciranih napona u mjernim svitcima za niz nesimetričnih pogonskih stanja .....                               | 155 |
| Tablica 6.8 Amplitude osnovnog harmonika akceleracije (100 Hz) izmjerene na četiri analizirane lokacije za nesimetrična pogonska stanja generatora .....                                   | 160 |
| Tablica 7.1 Usporedba izmjerenih i izračunatih vlastitih frekvencija kućišta i paketa statora u centralnoj zoni stroja .....                                                               | 162 |
| Tablica 7.2 Usporedba izračunatih i izmjerenih amplituda harmonika akceleracija na 100 Hz za lokacije <i>P1</i> i <i>P2</i> na paketu statora za analizirana simetrična radna stanja.....  | 170 |
| Tablica 7.3 Usporedba izračunatih i izmjerenih amplituda harmonika akceleracija na 100 Hz za lokacije <i>P1</i> i <i>P2</i> na paketu stroja za analizirana nesimetrična opterećenja ..... | 177 |
| Tablica 8.1 Pripadnost rednog broja učitano napona mjernim svitcima .....                                                                                                                  | 184 |
| Tablica 8.2 Podjela radijalnih sila na zube po pomoćnim nizovima .....                                                                                                                     | 186 |

## Prilog A1: Kôd algoritma za izračun radijalnih sila koje djeluju na zube generatora obradom induciranih napona 6 mjernih svitaka

```

clc; close all; clear all;

% 1. FAZA – ULAZNI PARAMETRI % podaci za generator 2S 783-4

u0=4*pi*0.0000001; % konstanta permeabilnosti vakuuma [Vs/Am]
f=50; % Frekvencija osnovnog harmonika [Hz]
Nsv=5; % Broj zavoja mjernog svitka
Lsv=198; % Srednja aksijalna duljina mjernog svitka [mm]
bsv=11.5; % Srednja širina mjernog svitka [mm]
N2=78; % Broj utora/zubi statora
Lz=402; % Aksijalna duljina zuba [mm]
bz=13.85; % Širina zuba pri zračnom rasporu [mm]
Ssv=Lsv*bsv/1e6; % Površina mjernog svitka [m^2]
Sz=Lz*bz/1e6; % Površina radijalne plohe zuba [m^2]
F_prag_nesim=6.07; % prag prorade obavijesti električne nesimetrije [%]
F_prag_odstup=4.74; % prag prorade obavijesti nesimetrije dijametralno postavljenih svitaka [%]

% 1. FAZA – UČITAVANJE PODATAKA (naponi mjernih svitaka)
ImeFile_CSV_U='U_MS.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaze inducirani naponi mjernih svitaka
Niz_U_Ms = dlmread(ImeFile_CSV_U, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka
NizTest=Niz_U_Ms(:, 1); % Formiranje niza podataka
N=length(NizTest); % Određivanje broja učitanih podataka
Delta_t=(1/f)/N; % Određivanje vremenskog koraka između dva podatka

% 2. FAZA – OBRADA PODATAKA
for i=1:6 % Za napon svakog od 6 učitanih mjernih svitaka
    Niz_U=Niz_U_Ms(:, i)/Nsv; % Postavljanje napona i-tog mjernog svitka u pomoćni niz i
    % dijeljenje s brojem zavoja mjernog svitka
    % Integracija valnog oblika (podatak o podatak) – Izračun magnetskog toka kroz mjerni svitak
    Niz_Fi(1)=Niz_U(1)*Delta_t; % Preuzimanje prve vrijednosti niza
    for j=2:N % Za svaki naredni podatak niza
        Niz_Fi(j)=Niz_Fi(j-1)-Niz_U(j)*Delta_t; % Zbroj prethodne vrijednosti i površine trenutne vrijednosti
    end % (integracija po vremenu)
    Fi_sr=mean(Niz_Fi); % Određivanje srednje vrijednosti (radi pomaka nule)
    Niz_Fi=Niz_Fi-Fi_sr; % Korekcija za srednju vrijednost

    Niz_B_Ms=Niz_Fi/Ssv; % Izračun radijalne magnetske indukcije
    Niz_F_Ms_zub=1/(2*u0)*(Niz_B_Ms.^2)*Sz; % Izračun valnog oblika radijalne sile
    Niz_F_Ms(:, i)= Niz_F_Ms_zub; % Smještanje izračunatog valnog oblika u dvodimenzionalni niz
end % Kraj for petlje

% 3. FAZA – SPREMANJE OBRADENIH PODATAKA (sile na zube)

Niz_F_Nazivi=('F_MS_A', 'F_MS_B', 'F_MS_C', 'F_MS_Ad', 'F_MS_Bd', 'F_MS_Cd')
fid = fopen('F_MS.csv', 'w'); % Otvaranje dokumenta u načinu pisanja uz prebrisanje postojećeg sadržaja
fdisp(fid, Niz_F_Nazivi); fclose(fid); % Upis naziva stupaca u 'F_MS.csv'
dlmwrite('F_MS.csv', Niz_F_Ms, '-append', 'delimiter', ',', 'roffset', 1); % Upis podataka u dokument

fprintf('\n Sile za 6 mjernih svitaka izračunate su i spremljene u dokument F_MS.csv \n'); % Ispisna poruka

```

## Prilog A2: Kôd algoritma za utvrđivanje električne nesimetrije analizom radijalnih sila koje djeluju ne zube međusobno razmaknute za $\frac{2}{3} \tau_p$

```
% 2. FAZA – NASTAVAK OBRADE PODATAKA
Niz_F_A=Niz_F_Ms(:,1);           % Formiranje niza za mjerni svitak A
Niz_F_B=Niz_F_Ms(:,2);           % Formiranje niza za mjerni svitak B
Niz_F_C=Niz_F_Ms(:,3);           % Formiranje niza za mjerni svitak C
Niz_F_Ad=Niz_F_Ms(:,4);          % Formiranje niza za dijametralno postavljen mjerni svitak A
Niz_F_Bd=Niz_F_Ms(:,5);          % Formiranje niza za dijametralno postavljen mjerni svitak B
Niz_F_Cd=Niz_F_Ms(:,6);          % Formiranje niza za dijametralno postavljen mjerni svitak C

Niz_F_Vrh(1)= max(Niz_F_A);       % Određivanje vršnog iznosa iz niza za mjerni svitak A
Niz_F_Vrh (2)= max(Niz_F_B);      % Određivanje vršnog iznosa iz niza za mjerni svitak B
Niz_F_Vrh (3)= max(Niz_F_C)       % Određivanje vršnog iznosa iz niza za mjerni svitak C
Maks_abc = max(Niz_F_Vrh)          % Određivanje maksimalnog iznosa od tri vršne vrijednosti
Min_abc = min(Niz_F_Vrh)           % Određivanje minimalnog iznosa od tri vršne vrijednosti
Delta_abc= Maks_abc- Min_abc       % Određivanje razlike između maksimalnog i minimalnog vrha
Delta_abc_p= Delta_abc/ Min_abc*100 % Određivanje postotnog odstupanja vrhova sila

Niz_F_A_r= Niz_F_A- Niz_F_Ad;     % Razlika dijametralno postavljenih mjernih svitaka A
Niz_F_B_r= Niz_F_B- Niz_F_Bd;     % Razlika dijametralno postavljenih mjernih svitaka B
Niz_F_C_r= Niz_F_C- Niz_F_Cd;     % Razlika dijametralno postavljenih mjernih svitaka C
Niz_F_Odstup_p(1)= max(Niz_F_A_r) / Niz_F_Vrh(1)*100; % Određivanje maksimalnog odstupanja svitaka A
Niz_F_Odstup_p(2)= max(Niz_F_B_r) / Niz_F_Vrh(2)*100; % Određivanje maksimalnog odstupanja svitaka B
Niz_F_Odstup_p(3)= max(Niz_F_C_r) / Niz_F_Vrh(3)*100 % Određivanje maksimalnog odstupanja svitaka C
Maks_Dia = max(Niz_F_Odstup_p)    % Određivanje maksimalnog iznosa odstupanja dijametralnih sila

% 3. FAZA – UTVRĐIVANJE VRSTE POGONSKOG STANJA
if ( Maks_Dia > F_prag_odstup) % Ako nema nedozvoljenog odstupanja između dijametralnih svitaka
    Tekst_ispis = ({['POREMEĆAJ NIJE ELEKTRIČNO NESIMETRIČNO OPTEREĆENJE'], ['RAZLIKA DIJAMETRALNIH
        SILA OD: ', num2str(Maks_Dia, '%4.1f') , ' %']}); % Tekst – pronađena nesimetrija
else
    % Ako detektirano odstupanje dijametralnih svitaka
    if (Delta_abc_p> F_prag_nesim) % Ako postoji razlika koja indicira nesimetriju struja po fazama
        Tekst_ispis = ({['ELEKTRIČNO NESIMETRIČNO OPTEREĆENJE'], ['RAZLIKA VRHOVA SILA OD: ',
            num2str(Delta_abc_p, '%4.1f') , ' %']}); % tekst – pronađena nesimetrija % Tekst-pronađena nesimetrija
    else
        % Ako je razlika ispod postavljenog praga aktivacije
        Tekst_ispis = ({['Regularno pogonsko stanje']}); % Tekst – nema nesimetrije
    end
end

% 4. FAZA – PRIKAZ REZULTATA
fprintf('\n %s', Tekst_ispis); % Ispisna poruka u glavnom sučelju Octave programa
t=[0: Delta_t:1/f- Delta_t]*1000; % Formiranje vremenskog niza u milisekundama
figure; hold on; grid; % Definiranje grafičkog prozora za iscrtavanje valnih oblika
plot(t,Niz_F_C, 'Color',[255/255,192/255,0],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba C
plot(t,Niz_F_Cd,'--','Color',[152/255,72/255,7/255],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba Cd
plot(t,Niz_F_B, 'Color',[0,176/255,240/255],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba B
plot(t,Niz_F_Bd, '--','Color',[0,32/255,96/255],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba Bd
plot(t,Niz_F_A, 'Color',[255/255,124/255,128/255],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba A
plot(t,Niz_F_Ad, '--','Color',[192/255,0,0],'LineWidth',2); % Crtanje valnog oblika – Sila zuba Ad RGB
Xlm=xlim; Ylm=ylim; X_x=Xlm(2); X_y=-2/3*Ylm(2)/10; Y_x=-Xlm(2)/8; Y_y=Ylm(2); % Lokacije koordinata
xlabel ('t [ms]','Position',[X_x X_y]); ylabel ('F [N]','Position',[Y_x Y_y],'Rotation',0); % Postavljanje natpisa osi
title(Tekst_ispis); % Ispisne vrijednosti u naslovu
legend ('Frad A', 'Frad B', 'Frad C', 'Frad Ad', 'Frad Bd', 'Frad Cd', 'Location', 'NorthEastOutside'); % Legenda
fprintf('\n Kraj \n');
```

## Prilog B1.1: Kôd algoritma za izračun sila na zube obuhvaćene prapolom generatora obradom induciranih napona mjernih svitaka

```

clc; close all; clear all;

% 1. FAZA – ULAZNI PARAMETRI % podaci za generator 2S 783-4

u0=4*pi*0.0000001; % Konstanta permeabilnosti vakuuma [Vs/Am]
f=50; % Frekvencija osnovnog harmonika [Hz]
Nsv=5; % Broj zavoja mjernog svitka
Lsv=198; % Srednja aksijalna duljina mjernog svitka [mm]
bsv=11.5; % Srednja širina mjernog svitka [mm]
N2=78; % Broj utora/zubi statora
Lz=402; % Aksijalna duljina zuba [mm]
bz=13.85; % Širina zuba pri zračnom rasporu [mm]
Ssv=Lsv*bsv/1e6 % Površina svitka [m^2]
Sz=Lz*bz/1e6 % Površina radijalne plohe zuba [m^2]
Nzubi=39; % Broj zubi prapola

% 1. FAZA – UČITAVANJE PODATAKA (naponi mjernih svitaka)
ImeFile_CSV_U='U_MS_prapol.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaze inducirani naponi svitaka
Niz_U_Ms = dlmread(ImeFile_CSV_U, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka
NizTest=Niz_U_Ms(:, 1); % Formiranje niza podataka
N=length(NizTest); % Određivanje broja učitanih podataka
Delta_t=(1/f)/N; % Određivanje vremenskog koraka između dva podatka snimka

% 2. FAZA – OBRADA PODATAKA
for i=1:Nzubi % Za napon svakog mjernog svitaka prapola
    Niz_U=-Niz_U_Ms(:, i)/Nsv; % Postavljanje napona i-tog mjernog svitka u pomoćni niz i
    % dijeljenje s brojem zavoja svitka

    % Integracija valnog oblika (podatak o podatak) – izračun magnetskog toka kroz svitak
    Niz_Fi(1)=-Niz_U(1)*Delta_t; % Preuzimanje prve vrijednosti niza
    for j=2:N % Za svaki naredni podatak niza
        Niz_Fi(j)=Niz_Fi(j-1)-Niz_U(j)*Delta_t; % Zbroj prethodne vrijednosti i površine trenutne vrijednosti
    end % (integracija po vremenu)
    Fi_sr=mean(Niz_Fi); % Određivanje srednje vrijednosti (radi pomaka nule)
    Niz_Fi=Niz_Fi-Fi_sr; % Korekcija za srednju vrijednost

    Niz_B_Ms=Niz_Fi/Ssv; % Izračun radijalne magnetske indukcije
    Niz_F_Ms_zub=1/(2*u0)*(Niz_Bsv.^2)*Sz; % Izračun valnog oblika radijalne sile
    Niz_F_Ms(:, i)=Niz_F_Ms_zub; % Smještanje izračunatog valnog oblika u dvodimenzionalni niz
end % Kraj for petlje

% 3. FAZA – SPREMANJE OBRADENIH PODATAKA (sile na zube)

Niz_F_Nazivi=('Valni oblici: sile zuba prapola [N ]'); % Formiranje naziva
fid = fopen('F_zubi_prapol.csv', 'w'); % Otvaranje dokumenta u načinu pisanja uz prebrisivanje
fdisp(fid, Niz_F_Nazivi); fclose(fid); % Upis naziva stupaca
dlmwrite('F_zubi_prapol.csv', Niz_F_Ms, '-append', 'delimiter', ',', 'roffset', 1); % Upis podataka u dokument

fprintf('\n Sile za zube prapola izračunate su i spremljene u dokument F_zubi_prapol.csv\n'); % Ispisna
poruka

```

## Prilog B1.2: Kôd algoritma za izračun sila na zube obuhvaćene prapolom generatora za prazni hod generatora

```

clc; close all; clear all;

% 1. FAZA – ULAZNI PARAMETRI % podaci za generator 2S 783-4
u0=4*pi*0.0000001; % Konstanta permeabilnosti vakuuma [Vs/Am]
p=2; % Broj pari polova
f=50; % Frekvencija osnovnog harmonika napona [Hz]
N_ms=6; % Broj mjernih svitaka
N2=78; % Broj utora/zubi statora
Nzubi=39; % Broj zubi prapola
Nsv=5; % Broj zavoja mjernog svitka
Lsv=198; % Srednja aksijalna duljina mjernog svitka [mm]
bsv=11.5; % Srednja širina mjernog svitka [mm]
Lz=402; % Aksijalna duljina zuba [mm]
bz=13.85; % Širina zuba pri zračnom rasporu [mm]
Ssv=Lsv*bsv/1e6 % Površina mjernog svitka [m^2]
Sz=Lz*bz/1e6 % Površina radijalne plohe zuba [m^2]
w=2*pi*f; % Kutna brzina [rad/s]
Delta_ang=2*pi/N2*p; % Električna kutna razlika između dva zuba [rad]

% 1. FAZA – UČITAVANJE PODATAKA (naponi mjernih svitaka)
ImeFile_CSV_U='U_MS_PH.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaze inducirani naponi mjernih svitaka
Niz_U_Ms = dlmread(ImeFile_CSV_U, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka
N=length(Niz_U_Ms(:,1)); % Određivanje broja učitanih podataka
Delta_t=(1/f)/N; % Određivanje vremenskog koraka između dva podatka [s]
k=1:N/2; % Raspon harmoničkih članova

% 2. FAZA – OBRADA PODATAKA
Niz_F_mag=zeros(N/2,N_ms); % Inicijalizacija niza
for i=1:N_ms % Za napon svakog mjernog svitka prapola
    Niz_U=-Niz_U_Ms(:,i)/Nsv; % Postavljanje napona zavoja i-tog mjernog svitka u pomoćni niz

    % Integracija valnog oblika (podatak o podatak) – Izračun magnetskog toka kroz mjerni svitak
    Niz_Fi(1)=-Niz_U(1)*Delta_t; % Preuzimanje prve vrijednosti niza
    for j=2:N % Za svaki naredni podatak niza
        Niz_Fi(j)=Niz_Fi(j-1)-Niz_U(j)*Delta_t; % Zbroj prethodne vrijednosti i površine trenutne vrijednosti
        % (integracija po vremenu)
    end
    Fi_sr=mean(Niz_Fi); % Određivanje srednje vrijednosti (radi pomaka nule)
    Niz_Fi=Niz_Fi'-Fi_sr; % Korekcija za srednju vrijednost
    Niz_B_Ms=Niz_Fi/Ssv; % Izračun radijalne magnetske indukcije
    Niz_F_Ms_zub=1/(2*u0)*(Niz_Bsv.^2)*Sz; % Izračun valnog oblika radijalne sile

    % Rastav valnog oblika pomoću brze Fourierove transformacije
    F_fft=fft(Niz_F_Ms_zub,N); % Rastav valnog oblika na Fourierove članove
    Niz_F_O(i)=F_fft(1)/N; % Izdvajanje istosmjerne vrijednosti
    F_am=2*real(F_fft(k+1))/N; % Izdvajanje elemenata realnog niza
    F_bm=-2*imag(F_fft(k+1))/N; % Izdvajanje elemenata imaginarnih članova
    Niz_F_mag(:,i)=sqrt(F_am.^2+F_bm.^2); % Pohrana amplituda harmonika sila i skupni niz
    if (i==1) % Ako se radi o 1. podatku
        F_ang=atan2(F_bm,F_am); % Utvrđivanje faznih zakreta harmonika sile
    end
end
end % Kraj for petlje

```

```

% Srednji iznosi amplituda na temelju učitanih N_ms podataka
F_0_sr=mean(Niz_F_0);           % Određivanje srednje vrijednosti istosmjerne komponente
F_mag_sr=mean(Niz_F_mag,2);     % Određivanje srednjih vrijednosti amplituda po harmonicima

% Određivanje valnih oblika za zube prapola temeljem električnog kutnog pomaka između dva zuba
Niz_F_zubi=zeros(N,Nzubi);     % Definiranje niza za valne oblike sila koje djeluju na prapol broj zuba
I= ones(N,1);                  % Jedinični niz
for i=1:Nzubi                  % Za svaki zub prapola
    ang=-w*t*k +(i-1)*Delta_ang*k + I*(F_ang+pi/2); % Određivanje kuteva po harmonicima za svaki
    trenutak t
    Niz_F_zubi(:,i)=F_0_sr+sin(ang)*F_mag_sr;       % Određivanje valnog oblika sile
end

% 3. FAZA – SPREMANJE OBRAĐENIH PODATAKA (sile na zube)
Niz_F_Nazivi=('Valni oblici: sile zubi prapola [N ]');
fid = fopen ('F_zubi_prapol.csv', 'w');    % Otvaranje dokumenta u načinu pisanja uz brisanje
fprintf (fid, Niz_F_Nazivi);               % Upis naziva stupaca
fclose (fid);
dlmwrite('F_zubi_prapol.csv', Niz_F_zubi, '-append', 'delimiter', ',', 'offset',1); % Upis podataka u
dokument

fprintf('\n Sile za zube prapola izračunate su i spremljene u dokument F_zubi_prapol.csv\n'); % Ispisna
poruka

```

## Prilog B2: Kôd algoritma za određivanje sile koja djeluje na odabrano mjesto vanjskog oboda paketa statora vektorskim zbrajanjem radijalnih sila zubi

```

clc; close all; clear all;

% 1. FAZA - INICIJALNI PARAMETRI % podaci za generator 2S 783-4

N2=78; % Broj utora/zubi statora
Nzubi=39; % Broj zubi prapola
alfa_Zub1= 25*360/N2; % Kut između akcelometra i zuba kojem odgovara prva učitana sila [deg]

% 1. FAZA - UČITAVANJE PODATAKA (valni oblici sila po zubima u zoni prapola)

ImeFile_CSV_F='F_zubi_prapol.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaze radijalne sile na zube prapola
Niz_F= dlmread(ImeFile_CSV_F, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka – valni oblici sila prapola [N]

N=length(Niz_F(:,1)); % Određivanje broja učitanih vremenskih podataka sile
TauS=360/N2; % Kut između dva zuba / utorski korak zuba statora [deg]
N2_pola=N2/2; % Broj zubi na polovini stroja
N2_cetvrtina=floor(N2_pola/2) % Cijeli broj zubi unutar četvrtine stroja
Nepar=mod(N2,4); % Ostatak dijeljenja kojim se utvrđuje ima li polovica stroja neparan broj zubi

% 2. FAZA - OBRADA PODATAKA

% Definiranje iznosa radijalnih sila na segmentu polovice stroja

N_prapol_seg=(N2_pola)/Nzubi; % Broj prapol segmenata unutar polovice stroja (uvijek je cijeli broj)
if (N_prapol_seg>1) % Ako se unutar polovice stroja nalazi više segmenata veličine prapola
    for j=2:N_prapol_seg % Za svaku dodatnu sekciju prapola
        for i=1:Nzubi % Za svaki zub prapola
            k=(j-1)*Nzubi+i; % Definiranje rednog broja podatka
            Niz_F(:,k)=Niz_F(:,i); % Definiranje iznosa radijalne sile dotičnog zuba
        end
    end
end

% Određivanje odmaka akcelometra od centra polovice zubi

alfa_acc= alfa_Zub1-(TauS*(N2_pola-1)/2)) % Kut akcelometra u odnosu na sredinu razmatrane sekcije zubi
Nzub_pomak=floor(alfa_acc/TauS) % Broj cijelih zubi između akcelometra i sredine sekcije zuba
Kut_acc=alfa_acc-Nzub_pomak*TauS; % Ostatak kuta pomaka

% Usklađivanje poretka sila u nizu s pozicijom akcelometra

if (Nzub_pomak>0) % Ako se akcelometar ne nalazi na centru razmatrane sekcije zubi
    Niz_F=circshift(Niz_F, [0,-Nzub_pomak]); % Cirkularna zamjena pozicija (indeksa) sila na zube u nizu
end

```

```
% Određivanje kuteva između zubi i pozicije akcelerometra
```

```
if (Nepar>0) % Ako prapol zona sadrži neparan broj zubi
```

```
    Kut_Start=-N2_cetvrtina*TauS-Kut_acc; % Kut između početnog zuba i akcelerometra
```

```
    Kut_Stop= N2_cetvrtina *TauS-Kut_acc; % Kut između završnog zuba i akcelerometra
```

```
else % Ako prapol zona sadrži paran broj zubi
```

```
    Kut_Start=-( N2_cetvrtina -1/2)*TauS-Kut_acc; % Kut između početnog zuba i akcelerometra
```

```
    Kut_Stop=( N2_cetvrtina -1/2)*TauS-Kut_acc; % Kut između završnog zuba i akcelerometra
```

```
end
```

```
Kut_Zub=[Kut_Start:TauS:Kut_Stop]; % Formiranje niza kuteva [deg];
```

```
Kut_Zub_rad= Kut_Zub*pi/180; % Niz kuteva zubi u radijanima (u odnosu na poziciju akcelerometra)
```

```
% Određivanje iznosa ukupne radijalne sile koja djeluje na poziciji akcelerometra
```

```
Niz_F_a=Niz_F.*cos(Kut_Zub_rad); % Određivanje komponenti sila koja djeluju u smjeru akcelerometra
```

```
for i=1:N
```

```
    % Za svaki vremenski trenutak
```

```
    F_suma(i)=sum(Niz_F_a(i,:)); % Zbrajanje iznosa komponenti koje djeluju u smjeru
```

```
akcelerometra
```

```
end
```

```
% 3. FAZA - ZAPIS PODATAKA
```

```
fid = fopen ('F_suma.csv', 'w'); % Otvaranje dokumenta u načinu pisanja uz prebrisivanje postojećeg
```

```
sadržaja
```

```
fdisp (fid, 'F_suma [N]'); fclose (fid); % Upis naslova
```

```
dlmwrite('F_suma.csv', F_suma, '-append', 'delimiter', ',', 'offset',1); % Upis niza F_suma u dokument
```

```
fprintf('\n Izračun sumarne sile završen. \n Podaci zapisani u dokument naziva: f_suma.csv \n'); % Ispis
```

```
teksta
```



## Prilog B3: Kôd algoritma za razlučivanje elektromagnetski uzrokovanih harmonika od mehanički uzrokovanih harmonika iz spektra vibracija

```

% 1. FAZA - INICIJALNI PARAMETRI % podaci za generator 2S 783-4

T=0.02; % Ukupno vrijeme snimka sila [s]
f1f=1/T; % Bazna frekvencija harmonika sila [Hz]
f1a=1; % Bazna frekvencija harmonika akceleracija [Hz]
F_prag_p=8.36; % Prag prorade istaknutog harmonika sile [%]
a_prag_p=8.36; % Prag prorade istaknutog harmonika akceleracija [%]
f_raspon=8*f1a; % Raspon susjednih frekvencija akceleracija koji se razmatra provjerom [Hz]
f_prikaz=6400 % Raspon frekvencija za grafički prikaz [Hz]

% 1. FAZA - UČITAVANJE PODATAKA (valni oblici sila po zubima i spektar frekvencija akceleracija paketa)

ImeFile_CSV_F='F_suma.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaz valni oblik sumarne sile
ImeFile_CSV_a='a_paket.csv'; % Naziv dokumenta u kojem se nalaze harmonici akceleracije paketa
F_suma = dlmread(ImeFile_CSV_F, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka – valni oblik sumarne sile [N]
a_mag = dlmread(ImeFile_CSV_a, ',', 1, 1); % Učitavanje .csv podataka – amplitude akceleracije [m/s^2]

% 2. FAZA - OBRADA PODATAKA

N=length(F_suma); % Određivanje broja učitanih vremenskih podataka sile
N_F=N/2+1; % Broj harmoničkih članova sile
N_a=length(a_mag); % Određivanje broja učitanih harmonika akceleracije
k_F=1:N_F; % Definiranje niza raspona harmoničkih članova sile
k_a=1:N_a; % Definiranje niza raspona harmoničkih članova akceleracije
f_F=f1f*k_F; % Formiranje niza frekvencija spektra harmonika sile
f_a=f1a*k_a; % Formiranje niza frekvencija spektra harmonika akceleracije

% Određivanje amplituda harmonika
% Brza Fourierova analiza
F_fft=fft(F_suma,N); % Rastav valnog oblika na Fourierove članove
F_0= F_fft(1)/N; % Izdvajanje istosmjerne vrijednosti
F_am=2*real(F_fft(k_F+1))/N; % Izdvajanje elemenata članova realnog niza
F_bm=2*imag(F_fft(k_F+1))/N; % Izdvajanje elemenata članova imaginarnog niza
F_mag=sqrt(F_am.^2+ F_bm.^2); % Utvrđivanje amplituda harmonika sila

% 3. FAZA - USPOREDBA PODATAKA

% Apsolutni prag vrijednosti za usporedbu podataka
F_prag= F_mag(1)*F_prag_p/100; % Definiranje graničnog iznosa sile u [N]
h_a1=find(f_a==(f1f)); % Pronalazak indeksa koji odgovara frekvenciji osnovnog harmonika sile
a_prag= a_mag(h_a1)*a_prag_p/100; % Definiranje graničnog iznosa akceleracije u [m/s^2]

for i=1:N_a % Za svaki harmonik akceleracije
    if (a_mag(i)<a_prag) % Ako harmonik akceleracije ima amplitudu manju od praga
        a_mag(i)=0; % Postavi dotičnu vrijednost na nulu
    end
end

```

```

EM_Flag=zeros(1,N_a); % Inicijalizacija flag niza s nulama
for i=1: N_F % Za svaki harmonik sile
    if (F_mag(i)> F_prag) % Ako harmonik sile ima amplitudu veću od praga
        f_start= f_F(i)- f_raspon; % Definiranje minimalne frekvencije za pregled
        if (f_start < f1a) f_start = f1a; end % Osiguranje da se startna frekvencija nalazi unutar raspona
        f_stop= f_F(i)+ f_raspon; % Definiranje aksimalne frekvencije za pregled
        if (f_stop> f_a(N_a)) f_stop = f_a(N_a); end % Osiguranje da se frekvencija nalazi unutar raspona
        h_start=find(f_a== f_start); % Pronalazak indeksa niza koji odgovara startnoj frekvenciji
        h_stop=find(f_a== f_stop); % Pronalazak indeksa niza koji odgovara završnoj frekvenciji
        for j=h_start: h_stop % Za elemente niza koji odgovaraju rasponu pregledanih frekvencija
            if (a_mag(i)> a_prag) EM_Flag(j)=1; end % Postavljanje indeksa za harmnik veći od praga
        end
    end
end

Det_Harm =sum(EM_Flag); % Utvrđivanje broja pronađenih harmonika
if (Det_Harm ==0); % Ukoliko nije pronađen ni jedan harmonik
    fprintf('\n Kraj – Nije pronađen ni jedan harmonik akceleracija koji se podudara s harmonicima sile \n');
    quit % Izlaz iz skripte bez daljnjeg nastavka izvršavanja koda
end

% 4. FAZA – PRIPREMA, SPREMANJE I PRIKAZ REZULTATA USPOREDBE

% Spremanje rezultata u izlazne datoteke
a_EM= EM_Flag.*a_mag; % Formiranje niza harmonika koji se podudaraju s harmonicima sile
f_a_EM= EM_Flag.*f_a; % Formiranje niza frekvencija EM harmonika vibracija
Niz_EM(:,1)=nonzeros(f_a_EM); % Reducirani niz – uklanjanje praznih mjesta
Niz_EM(:,2)=nonzeros(a_EM); % Reducirani niz – uklanjanje praznih mjesta
a_Nazivi_EM=' f_EM [Hz] a_EM [m/s^2] ' ; % Definiranje naziva stupaca
fid = fopen ('a_EM.txt', 'w'); fprintf (fid, a_Nazivi_EM); fclose (fid); % Upis naslova
dlmwrite('a_EM.txt', Niz_EM, '-append', 'delimiter', '\t', 'roffset',1); % Upis podataka u dokument

a_Meh=a_mag-a_EM; % Formiranje niza harmonika uzrokovanih mehaničkim pojavama
f_a_Meh= f_a- f_a_EM; % Formiranje niza frekvencija Meh harmonika vibracija
Niz_Meh(:,1)=nonzeros(f_a_Meh); % Reducirani niz – uklanjanje praznih mjesta
Niz_Meh(:,2)=nonzeros(a_Meh); % Reducirani niz – uklanjanje praznih mjesta
a_Nazivi_Meh=' f_Meh [Hz] a_EM [m/s^2] ' ; % Definiranje naziva stupaca
fid = fopen ('a_Meh.txt', 'w'); fprintf (fid, a_Nazivi_Meh); fclose (fid); % Upis naslova
dlmwrite('a_Meh.txt', Niz_Meh, '-append', 'delimiter', '\t', 'roffset',1); % Upis podataka u dokument

% Grafički prikaz razlučenih harmonika vibracija
BrHarm=find(f_a==f_prikaz)
Amplituda=[ a_EM (1: BrHarm), a_Meh(1: BrHarm)]; % Definiranje nizova za prikaz
figure; h=bar(f_a(1: BrHarm),Amplituda,1);grid % Definiranje prikaza harmonika na stupčastom grafu
set(h(1), 'facecolor', 'r', 'edgecolor', 'r'); % Prikaz elektromagnetski uzrokovanih sila u crvenoj boji
set(h(2), 'facecolor', 'b', 'edgecolor', 'b'); % Prikaz mehanički uzrokovanih sila u plavoj boji
axis([0 f_prikaz 0 5]); set(gca,'XTick',[0:f_prikaz_2/8:f_prikaz_2]); Xlm=xlim; Ylm=ylim; % Definiranje prikaza
X_x=Xlm(2); X_y=-2/3*Ylm(2)/10; Y_x=-Xlm(2)/8; Y_y=Ylm(2); % Definiranje pozicija naslova osi
xlabel('f [Hz]','Position',[X_x X_y]) % Postavljanje natpisa x-osi
ylabel('a [m/s^2]','Position',[Y_x Y_y],'Rotation',0) % Postavljanje natpisa y-osi
legend('EM vibracije', 'Meh vibracije','Location','NorthEastOutside'); % Postavljanje legende na prikaz
Tekst_ispis = ({['Raspodjela harmonika akceleracija na elektromagnetski i mehanički uzrokovane'], ['Raspon
frekvencija do: ', num2str(f_prikaz, '%d') , ' Hz']}); title(Tekst_ispis); % Tekst naslova grafa

fprintf('\n Kraj \n'); % Ispis teksta – kraj izvođenja algoritma

```

## **Životopis**

**Miroslav Petrinić** rođen je u Zagrebu 1983. godine. Srednju prirodoslovno matematičku (V.) gimnaziju završio je 2002. godine u Zagrebu, a diplomirao je 2007. godine na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Od 2007. godine je trajno zaposlen u KONČAR – Institutu za elektrotehniku u Zagrebu kao razvojni inženjer na području električnih rotacijskih strojeva. Znanstveno istraživačkim radom usmjeren je prema proračunskim analizama i razvojnim istraživanjima sinkronih električnih strojeva. Autor je i koautor nekoliko članaka objavljenih u časopisima, zbornicima, znanstvenim i stručnim konferencijama u zemlji i inozemstvu.

Nagrađen je dvjema godišnjim nagradama „JOSIP LONČAR“ za najboljeg studenta zavoda za elektrostrojarstvo i automatizaciju Fakulteta elektrotehnike i računarstva (FER) Zagreb. Član je studijskog odbora za rotacijske strojeve HRO CIGRÉ.

## **Popis objavljenih radova**

### **Radovi u časopisima**

1. A. Elez, Ma. Petrinić, Mi. Petrinić, B. Vaseghi, A. Abasian: "Salient Pole Synchronous Generator Optimization by Combined Application of Slot Skew and Damper Winding Pitch Methods", Progress in electromagnetics research M, Vol. 73, 81-90 – 2018.
2. A. Elez, J. Študir, Ma. Petrinić, Mi. Petrinić: "The slot skew method to reduce losses in salient pole synchronous generator windings", International journal on hydropower & dams, 24, 5, 102-107 – 2017.

### **Radovi na međunarodnim znanstvenim i stručnim konferencijama**

1. J. Študir, A. Elez, Ma. Petrinić, Mi. Petrinić, "Loss Reduction Methods of Salient Pole Synchronous Generator Damper Winding by Means of Slot Skew", Set of Papers: CIGRE SESSION 46, Paris, 21.-26. August 2016.
2. Tomičić, Branko; Petrinić, Miroslav; Tvorčić, Stjepan, "Calculation of Synchronous Generator Short Circuit Currents by Means of 3D Numerical Simulation", ISEF 2015 - XVII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Valencia, Spain, September 10-12, 2015
3. V. Poljančić, M. Brčić, Mi. Petrinić, "The Effect of Stator Clamping Plate Design on End Region Power Losses of Vertical Hydro Generators", CIGRE 2015, Madrid, Spain. pages. 1-10, September 6th-11th, 2015.
4. Mi. Petrinić, S. Tvorčić, S. Car: "The Effects of Pole Number and Rotor Wedge Design on Unbalanced Magnetic Pull of the Synchronous Generator", Proceedings 2014 International Conference on Electrical Machines - ICEM 2014, Berlin, 2-5 Sept. 2014.
5. Mi. Petrinić, S. Car, A. Elez, "Iterative Procedure for Determination of Synchronous Generator Load Point Using Finite Element Method", XXth International Conference on Electrical Machines, ICEM 2012 : Proceedings, Marseille, France, September 2-5, 2012.
6. A. Elez, B. Tomčić, Mi. Petrinić, "Detection of inter-coil short circuits in coils of salient poles synchronous generator excitement winding on the basis of analysis of magnetic field in the machine", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Granada, 2010.
7. Mi. Petrinić, Ž. Jakopović, "Modeling and simulation of PEM fuel cell – power converter system", MIPRO 2007, Opatija, Croatia, May 2007.

8. Mi. Petrinić, Ž. Štih, B. Tomičić, H. Vidović, “Elektromagnetske sile nesimetrično opterećenog sinkronog generatora”, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2017.
9. B. Tomičić, H. Vidović, Hrvoje, S. Đaković, Mi. Petrinić, “Sinkroni cijevni visokonaponski generator male snage”, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2017.
10. H. Vidović, B. Tomičić, Mi. Petrinić, “Agregat za napajanje transformatora namijenjen za tvornička ispitivanja”, 13. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2017.
11. H. Vidović, B. Tomičić, T. Tandarić, Mi. Petrinić, “Optimiranje projekta sinkronog uzbudnika za HE Dubrovnik obzirom na specifičnosti regulacijskog sustava”, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.
12. H. Vidović, B. Tomičić, S. Majer, P. Jagunić, Mi. Petrinić, “Sinkroni generator s cilindričnim rotorom u kompaktnoj izvedbi za MHE Prančevići”, 12. savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 2015.
13. H. Vidović, B. Tomičić, S. Đaković, S. Majer, Mi. Petrinić, Miroslav, “Sinkroni cijevni generator male snage”, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.
14. V. Poljančić, M Brčić, Mi. Petrinić, “Metode smanjenja gubitaka u tlačnim pločama statora vertikalnih hidrogeneratora”, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.
15. Mi. Petrinić, D. Šeremet, S. Car, J. Treger, “Sila jednostranog privlačenja magnetski zasićenog generatora i njen utjecaj na dinamičku stabilnost rotora”, 11. savjetovanje HRO CIGRÉ, Cavtat, 2013.
16. Mi. Petrinić, Ž. Jakopović, Z. Benčić, “Modeling and Simulation of PEM Fuel Cell-Power Converter System - Comparison of MatLab/Simulink and Simplorer”, Proceedings of EDPE 2007, Košice, 2007.

## **Biography**

**Miroslav Petrinić** was born in Zagreb, Croatia, in 1983. He graduated from the Natural and Mathematics High school (V. Gymnasium) in Zagreb, and studied at the University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER). After his college graduation in 2007, he was employed on the permanent basis at the KONČAR – Electrical Engineering Institute in Zagreb. There he works as a R&D engineer on the field of electrical rotating machines. His scientific research activities are aimed at analyses and calculation development of synchronous electric machines. He is a co-author of several papers published in proceedings of scientific and expert conferences and gatherings in the country and abroad.

M. Petrinić received two Annual rewards “JOSIP LONČAR” for best student of Dept. of Electrical Machines, Drives and Automation, Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER) Zagreb. He is a member of a Croatian Section HRO CIGRÉ A1 committee for rotating machines.